

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Strojní inženýrství – technologie a obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Experimentální zjišťování měrného řezného odporu u slitin neželezných
kovů

Autor: **Ondřej SPURNÝ**

Vedoucí práce: **Ing. Josef SKLENIČKA, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ondřej SPURNÝ**
Osobní číslo: **S19B0076P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Téma práce: **Experimentální zjišťování měrného řezného odporu u slitin neželezných kovů**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu – volba materiálu
3. Návrh a realizace experimentu
4. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

- Chladil, Josef. Přípravky a nástroje : část-obrábění. 3. vyd. Brno : VUT, 1992. ISBN 80-214-0408-6.
- Beneš, Vladimír; Mrkvica, Miloš. Teorie řezných nástrojů : určeno pro stud. fak. strojní. 1. vyd. Praha : ČVUT, 1990. ISBN 80-01-00265-9.
- Schmidt, Eduard. Příručka řezných nástrojů. 2. vyd. Praha : SNTL, 1974.
- Chvála, Břetislav; Votava, Josef. Přípravky : celost. vysokošk. učebnice pro strojní fakulty vys. škol techn.. 1. vyd. Praha : SNTL, 1988.
- ASM Handbook, Vol. 16: Machining. Ohio, 1999. ISBN 0871700077.
- Shaw, Milton Clayton. Metal cutting principles. New York : Oxford University Press, 2005. ISBN 0-19-514206-3.
- Childs, Thomas. Metal machining : theory and applications. New York : Elsevier, 2000. ISBN 0-340-69159-X.
- Příručka obrábění : kniha pro praktiky ; přel. Miroslav Kudela. Praha : Sadvik, 1997. ISBN 91-972299-4-6

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Josef Sklenička, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Kateřina Bícová, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Josefovi Skleničkovi Ph.D. za odborné vedení při tvorbě bakalářské práce a za přínosné odborné rady. Dále bych chtěl poděkovat paní Ing. Jaroslavě Fulemové, Ph.D. za odbornou pomoc při přípravě i samotné realizaci experimentu. V poslední řadě bych chtěl poděkovat panu Ing. Miroslavovi Gombárovi, PhD. za pomoc při statistickém vyhodnocení experimentu.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Spurný	Jméno Ondřej	
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Technologie a obrábění“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Sklenička Ph.D.	Jméno Josef	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Experimentální zjišťování měrného řezného odporu u slitin neželezných kovů		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	68	TEXTOVÁ ČÁST	42	GRAFICKÁ ČÁST	26
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)	Bakalářská práce obsahuje experimentální zjišťování měrného řezného odporu u slitin neželezných kovů. V rešeršní části je rozebráno představení problematiky obrábění, náhled z technického hlediska a samotný návrh, vyhodnocení experimentu. V závěrečné fázi jsou zhodnoceny výsledky, kde se ověřuje přesnost a pravdivost teorií obrábění. Výsledky experimentu rozšiřují znalost měrného řezného odporu u slitin neželezných kovů.
KLÍČOVÁ SLOVA	Řezný odpor, řezná síla, měrný řezný odpor, obrábění, soustružení, řezné podmínky, geometrie nástroje, nástroj, obrobek, tříska, síly, práce, trvanlivost

Obsah

1	Úvod.....	5
1.1	Cíl bakalářské práce	6
2	Rozbor současného stavu	7
2.1	Teoretická východiska.....	7
2.1.1	Vznik třísky.....	7
2.1.2	Teorie soustružení	9
2.2	Základní popis soustružnického nože	10
2.2.1	Pohyby nástroje	12
2.2.2	Geometrie nástroje	13
2.3	Řezná síla	15
2.3.1	Výpočet sil při obrábění	16
2.3.2	Faktory ovlivňující velikosti řezných sil.....	17
2.3.3	Měrný řezný odpor	21
2.4	Podobné práce	24
2.5	Rozbor současného stavu – volba materiálu	24
3	Návrh a realizace experimentu	26
3.1	Plán experimentu.....	26
3.1.1	Faktory experimentu	28
3.1.2	Volba experimentálních řezných podmínek.....	29
3.2	Materiál pro experiment	29
3.3	Vybavení pro experiment	30
3.3.1	Soustružnický nůž	30
3.3.2	Stroj EMCO MAXXTURN 25	31
3.3.3	Piezoelektrický dynamometr.....	32
3.4	Návrh vyhodnocování experimentu DoE	33
3.4.1	Základní rozdělení experimentů.....	34
3.4.2	Centrální kompozitní plán.....	34
3.4.3	Kóování podle DoE normování.....	35

3.4.4	Sestavení plánu experimentu.....	36
3.5	Statistické vyhodnocení experimentu.....	37
3.5.1	Vyhodnocení modelu pro materiál CuCrZr	40
3.5.2	Vyhodnocení modelu pro materiál EN AW 7075	42
3.5.3	Vyhodnocení modelu pro materiál EN AW 6012	46
3.5.4	Validace nalezených modelů pro Fc	50
3.6	Zhodnocení výsledků experimentu	52
4	Závěr.....	56
	Seznam použité literatury	58
	Seznam příloh.....	61
	Přílohy	62

Seznam použitých zkratek a 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)

RMSE... Střední kvadratická odchylka

DW... Durbin-Watsonův test autokorelace

F_x ... posuvová složka řezné síly [F]

F_y ... pasivní složka řezné síly [F]

F_z ... hlavní složka řezné síly [F]

k_c ... řezný odpor [MPa]

k_{c1} ... měrný řezný odpor [MPa]

a_p ... hloubka odřezávané vrstvy [mm]

S ... plocha odřezávané vrstvy [mm²]

a ... tloušťka odřezávané vrstvy [mm]

γ_o ... úhel čela [°]

m_c ... koeficient vyjadřující intenzitu změny k_c v závislosti na $h(a)$ [-]

f ... posuv [mm/ot]

X ... mocnitel pro hloubku řezu [-]

Y ... mocnitel pro posuv [-]

C, K ... jsou odvozeny z laboratorních měření [-]

v_c ... řezná rychlost [m/min]

Seznam obrázků:

Obrázek 1: Druhy třísek	7
Obrázek 2: Deformace třísky	8
Obrázek 3: Soustružení	10
Obrázek 4: Popis soustružnického nože	11
Obrázek 5: Pohyby při soustružení	12
Obrázek 6: Geometrie soustružnického nože	15
Obrázek 7: Rozložení řezné síly do složek	16
Obrázek 8: Velikost koeficientu m_c	20
Obrázek 9: Velikost k_{c1} pro třídy obrobitelnosti materiálů	20
Obrázek 10: Závislost k_c na řezné rychlosti, posuvu, hloubce řezu, úhlu čela a úhlu nastavení, platí pro obrábění kovů	22
Obrázek 11: Hodnoty měrného řezného odporu	23
Obrázek 12: Nastavení rozsahu u zesilovače	27
Obrázek 13: Vyhodnocování řezné síly v programu DynoWare	28
Obrázek 14: Výkres polotovaru	30
Obrázek 15: Soustružnický nůž s VBD	30
Obrázek 16: VBD destička	31
Obrázek 17: Stroj MAXXTURN 25	32
Obrázek 18: Piezoelektrický dynamometr s nástrojem	33
Obrázek 19: Názorné schéma vyhodnocení pomocí DoE	34
Obrázek 20: Rozložení centrálního kompozitního plánu	35
Obrázek 21: Graf F_c materiálu CuCrZr pro faktory z centrálního kompozitního plánu, kde x_1 je rychlost posuvu v_c a x_2 je posuv f_{ot}	41
Obrázek 22: Graf reziduí pro materiál CuCrZr	41

Obrázek 23: Graf Gaussovo rozdělení reziduí	42
Obrázek 24: Graf F_c materiálu EN AW 7075 pro faktory z centrálního kompozitního plánu, kde x_1 je rychlost posuvu v_c a x_2 je posuv f_{ot}	43
Obrázek 25: Graf reziduí pro materiál EN AW 7075	44
Obrázek 26: Graf reziduí pro materiál EN AW 7075, kde je vyjádřeno v %	45
Obrázek 27: Graf Gaussovo rozdělení reziduí pro materiál EN AW 7075	46
Obrázek 28: Graf F_c materiálu EN AW 6012 pro faktory z centrálního kompozitního plánu, kde x_1 je rychlost posuvu v_c a x_2 je posuv f_{ot}	47
Obrázek 29: Graf reziduí pro materiál EN AW 6012	48
Obrázek 30: Graf reziduí pro materiál EN AW 6012, vyjádřeno v %	49
Obrázek 31: Graf Gaussovo rozdělení reziduí pro materiál EN AW 6012	50
Obrázek 32: Graf závislosti měrného řezného odporu pro materiál EN AW 7075 v závislosti na posuvu f a rychlosti řezu V_c	54
Obrázek 33: Graf závislosti měrného řezného odporu pro materiál CuCrZr v závislosti na posuvu f a rychlosti řezu V_c	54
Obrázek 34: Graf závislosti měrného řezného odporu pro materiál EN AW 6012 v závislosti na posuvu f a rychlosti řezu V_c	55

Seznam tabulek

Tabulka 1: Srovnání zvolených materiálů	25
Tabulka 2: Faktory experimentu	29
Tabulka 3: Rozměrů VBD	31
Tabulka 4: Parametry experimentu	35
Tabulka 5: Řezné podmínky centrálního kompozitního plánu experimentu	36
Tabulka 6: Analýza vhodnosti F_c pro testované materiály	38
Tabulka 7: ANOVA – analýza rozptylu F_c pro materiál CuCrZr a EN AW 7075	38

Tabulka 8: ANOVA – analýza rozptylu Fc pro materiál EN AW 6012	39
Tabulka 9: Chyba přizpůsobení modelu.....	39
Tabulka 10: Odhad parametrů modelu Fc pro materiál CuCrZr	40
Tabulka 11: Odhad parametrů modelu Fc pro materiál EN AW 7075	43
Tabulka 12: Odhad parametrů modelu Fc pro materiál EN AW 6012	47
Tabulka 13: Validace Fc experimentu	51
Tabulka 14: Podmínky pro výpočet měrného řezného odporu pomocí získaného modelu	52
Tabulka 15: Vypočítané síly dle podmínek uvedených v Tabulce 14 a přepočítání na měrný řezný odpor.....	53

1 Úvod

Technologie obrábění je dnes zaměřena na zmenšení výrobních nákladů, dále se klade důraz na konkurenceschopnost a hospodárnost. S rychlým růstem technologií vznikají nová moderní obráběcí centra nebo stroje s novými řeznými nástroji. Díky tomuto technologickému vývoji dosahujeme vysoké produktivity obrábění při zachování geometrických a rozměrových přesností kladených na obrobek. Aby mohly být splněny tyto podmínky, tak se musí nastavit optimální pracovní podmínky.

Z důvodu snižování hmotnosti výrobků při zachování mechanických vlastností je nutno volit i různé druhy materiálů. Jednou skupinou slitin, které se hojně využívají, jsou slitiny neželezných kovů. Tyto slitiny nalézají často využití v leteckém a automobilovém průmyslu, též v cyklistice. Obrábění při použití klasických nebo moderních strojů a materiálů je často využíváno. Při použití jiných výrobních technologií se nedosahuje přesnosti a jakosti povrchu jako při použití obrábění. Hojné využití obrábění se nachází v oblasti výroby přesných součástek v leteckém, automobilovém a energetickém průmyslu. S postupným zdokonalováním technologií využíváme moderní počítačem řízené stroje a nové nástrojové materiály. Díky novým obráběcím materiálům lze použít velkých úběrů nebo vysokých řezných rychlostí, tím se zvýší produktivita a náklady na obrábění. Ve snaze dosáhnout vysokých rychlostí obrábění se ve výrobních obráběcích prostředích se často používají nevhodné řezné podmínky, které mají veliký vliv na nástroj. Pokud nebude dostatečné tuhé upnutí, nebo vhodný nástrojový materiál a nebudou zvoleny optimální řezné podmínky, tak dochází k vzniku chvění. Během toho se v místě řezu objevují nadměrné řezné síly, a to v důsledku větší teploty.

Výrazný vliv na kvalitu obrobku mají vlastnosti materiálu, přičemž zásadní jsou mechanické a chemické vlastnosti materiálu. Materiál vhodný k obrábění by měl mít dobrou obrobitelnost, která ovlivní tvoření třísek a jejich tvar. Třísky by mohly značně ovlivnit přesnost a drsnost povrchu. Při obrábění se může tříška přilepit na špičku nástroje a tím snižuje kvalitu obráběné plochy, také značně snižuje trvanlivost nástroje.

Znalost hranice stability je nezbytná pro maximalizaci rychlosti odstraňování materiálů při zachování kvality výrobku, ale také prodloužení či udržení trvanlivosti nástroje, ačkoliv experimenty s obráběním mohou být navrženy a prováděny tak, aby lokalizovaly hranici mezi

stabilními a nestabilními oblastmi. Alternativou k tomuto problému je předvídat řezné síly, jež mohou být použity pro různé podmínky řezání (hloubka řezu, rychlost řezu, aj.). Motivací tohoto výzkumu bylo proto nalezení časově úsporných a nákladově efektivních prostředků předvídání řezných sil a z nichž lze odvodit vhodné obráběcí podmínky. A určit měrný řezný odpor pro skupiny materiálů, u kterých jej neznáme. [1]

1.1 Cíl bakalářské práce

Hlavní cíl bakalářské práce je experimentálně zjistit měrný řezný odpor u slitin neželezných kovů, u kterých lze jen odhadovat dle mechanických a chemických vlastností testovaného materiálu. Odpor materiálu vůči vniknutí bude klíčovým v tomto experimentu, na nástroj působí tři na sebe navzájem kolmé síly, ze kterých bude využita jejich největší složka síly, která působí kolmo na obráběný materiál. Tato složka síly bude sledována a dle něj bude sestaven experiment. Se změnou řezných podmínek můžeme analyzovat měrný řezný odpor a jeho závislosti.

Důležité cíle bakalářské práce lze shrnout do několika bodů:

- analýza a poznání řešené problematiky
- návrh a realizace experimentu
- analýza vývoje měrného řezného odporu při změnách řezných podmínek

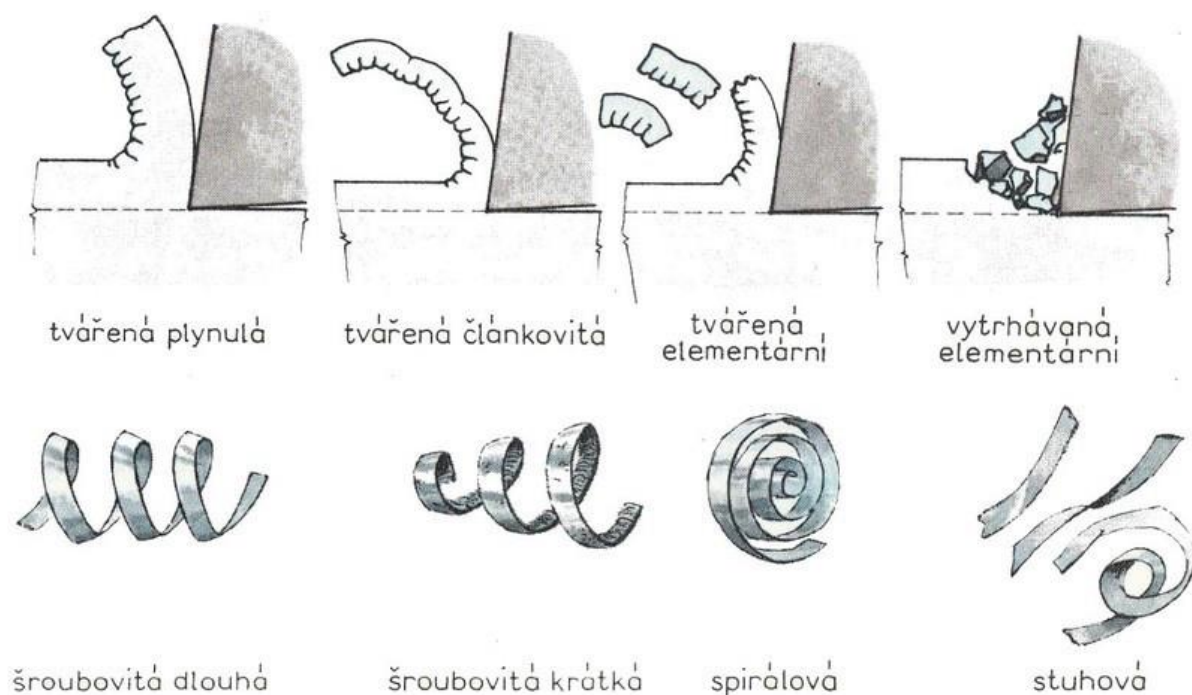
Podstatou této práce je prostudovat pečlivě literaturu, která se týká daného experimentu. Následně uskutečnit experimenty se změnou měrného řezného odporu. Poté tyto hodnoty porovnat s hodnotami vypočítanými pomocí nalezeného modelu. Důležité je shrnutí výsledků a vyhodnocení daného experimentu. A v neposlední řadě validace samotného nalezeného modelu.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Teoretická východiska

2.1.1 Vznik třísky

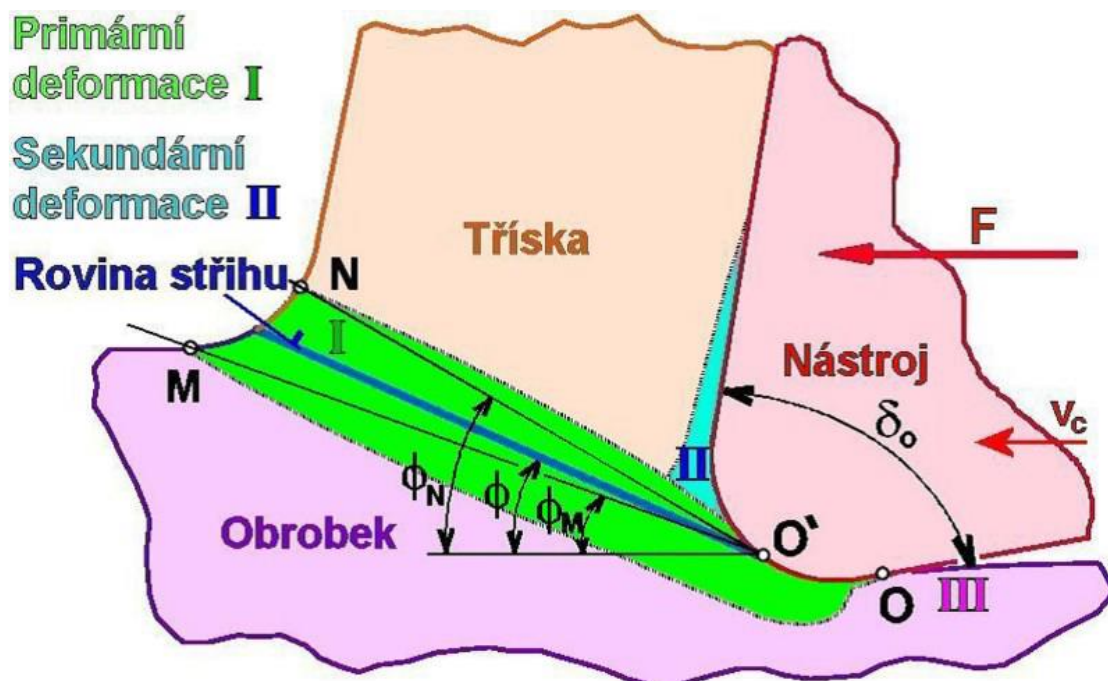
Tříška je část materiálu deformovaná a odříznutá během procesu obrábění z obrobku pomocí nástrojů pro obrábění. Při tvoření třísek vzniká velké množství tepla, proto je žádoucí chladit nástroj při obrábění. Chlazení má také za následek zlepšení mazacího efektu. Při obrábění vznikají za normálních podmínek dva druhy třísek. Ty jsou závislé na obráběném materiálu, řezné rychlosti a úhlu čela nástroje. Sdružené třísky jsou typické při obrábění ocelí, tvárných litin a slitin hliníku a mědi. Elementární třísky jsou nejčastěji viditelné u obrábění křehkých kovů, litin, bronzů, aj. Jak lze vidět na následujícím obrázku. (viz Obrázek 1)



Obrázek 1: Druhy třísek [31]

Při použití vyšších řezných rychlostí splývají smyková a plastická napětí v jednu, a proto používáme jejich náhradu, kterou určujeme úhlem střižné roviny. Pokud se jedná o materiál, jehož plastičnost je výrazná, tak plastická deformace může sahat při obrábění až před břit nástroje, tím pádem se úhel střižné roviny zmenšuje. Dalším faktorem při vzniku třísky je rostoucí řezná rychlost, ta zvýší naopak úhel střižné roviny. Při porušení soudržnosti materiálu

mezi nástrojem vznikají při nejvyšší deformační rychlosti zároveň i největší tahové napětí zpravidla v bezprostřední blízkosti ostří, kde vznikne obrobena plocha. Při obrábění má materiál sklon ke zpevňování, čímž poruší soudržnost ve střižné rovině a vytváří tvášené třísky elementární. Pokud k těmto porušením nedojde, vzniknou elementární třísky soudržné, dále pak záleží na soudržnosti materiálu a následujícímu druhu vzniklých třísek, které mohou být plynulé nebo článkovité. Tvorbu třísky lze rozdělit do více druhů deformace (viz Obrázek 2). Druh této deformace dělíme na primární, sekundární a terciální toto můžete vidět v Obrázku 2, kde jsou deformace barevně odlišeny. Kdy při primární deformaci začíná vznikat tříška směrem od nástroje, té se říká plastická deformace, sekundární plastická deformace třísek probíhá při kontaktu třísky s čelem nástrojem.



Obrázek 2: Deformace třísky [30]

V sekundární plastické deformaci dochází k vzniku adhezivních sil v místech, kde dochází k částečnému spojení odchozího materiálu s čelem nástroje, (kysličníky na čele nástroje se naruší) a dochází k navařování třísek na nástroj. Při následujícím odchodu třísky z místa řezu, se tyto vrstvy buď naruší a odstraní, nebo při dostatečné pevnosti nárůstku vzniká plastické přetvoření vrstvy třísky u čela. V tomto důsledku může nárůstek zastat funkci řezného břitů nástroje. Nárůstek se skládá obvykle ze dvou částí, z nepohyblivé pevné části proti nástroji a z části poměrného váznutí, kde se výrazně mění rychlost pohybu. Hodnoty se pohybují od nuly,

kdy se nárůstek dostane do kontaktu s obrobkem, až po rychlost odchodu třísky z místa řezu. Nárůstek se tvoří periodicky při obrábění s určitou frekvencí, která se pohybuje od 100 do 1000 Hz. To má za následek výrazné zhoršení drsnosti povrchu, ale také má částečně pozitivní vliv na nástroj, jelikož zastává z části funkci nástroje, a tak dochází k menšímu otupování břitu. Dále usnadňuje vnikání do materiálu v důsledku zvětšeného úhlu čela γ_n , čímž se snižuje měrný řezný odpor a součinitel pěchování. Jelikož nárůstek se periodicky opakuje, kolísají řezné síly a vzniká chvění. Může také dojít k vylomení břitu, z tohoto důvodu je brán nárůstek jako nežádoucí jev zásadně při obrábění „na čisto“.

Poslední deformace terciální vzniká mezi špičkou nástroje a obrobenou plochou obrobku. Na obrobený povrch působí normálová třecí síla, při které vznikají plastické deformace, čímž se zpevňují obrobené povrchové vrstvy. Vlastnosti zpevňování a jeho průběh výrazně ovlivňují řezné podmínky a geometrie nástroje. Zpevněná část obrobeného povrchu má výrazně lepší vlastnosti, konkrétně zvýšenou odolnost proti opotřebení a korozi, bohužel může docházet také k negativním vlastnostem. [2]

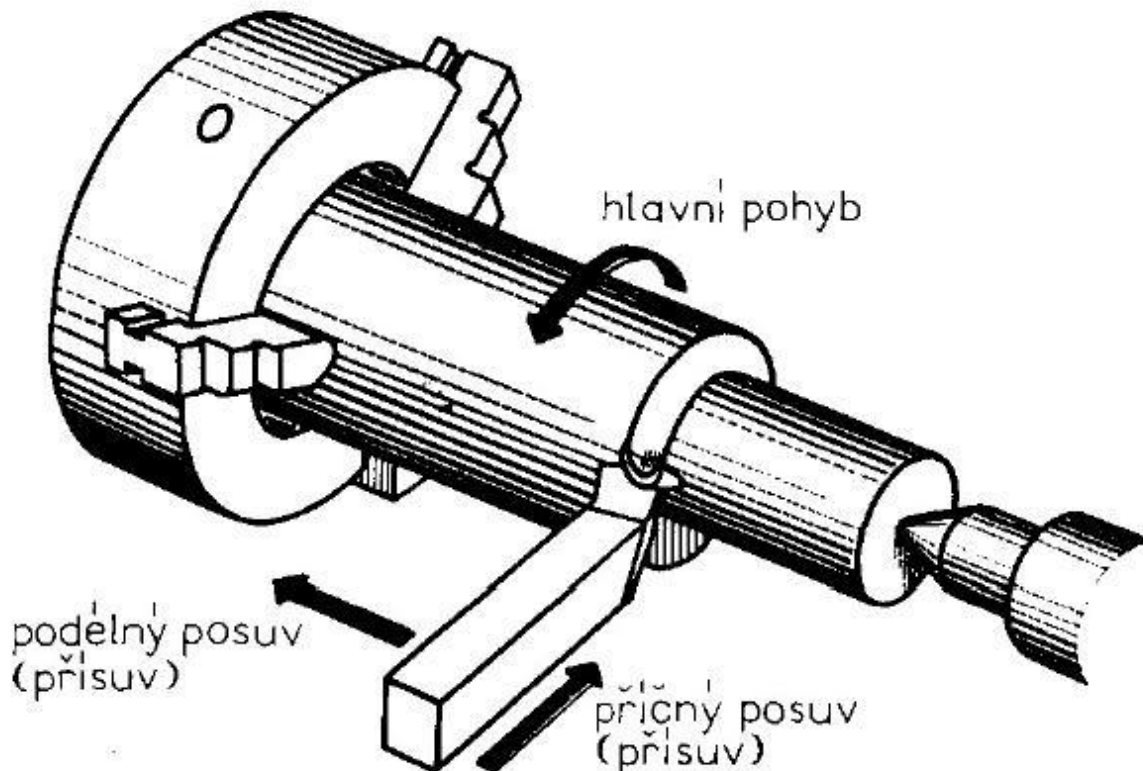
2.1.2 Teorie soustružení

Soustružení je jednou z nejpoužívanějších obráběcích technologií, používanou pro vytváření válcových ploch vnějších i vnitřních. Je to mnohdy jediná možnost, jak dosáhnout požadovaných rozměrových a jakostních vlastností. Je to obráběcí proces, při kterém se obrobek (obráběný materiál) otáčí kolem své osy a tím koná hlavní řezný pohyb. Obrobek je uchycen ve sklíčidle, které je poháněné strojem.

Nástroj (nůž) pro obrábění je upevněn v suportu, který koná posuvový pohyb ve směru podélném nebo příčném, též je možné pohybu ve směru obecném vůči ose obrobku. Soustruhy lze použít na více operací, jako jsou například vrtání, závitování, srážení hran, aj.

V současné době máme mnoho druhů soustruhů, které vykazují různé stupně automatizace. Rozdělení soustruhů se dělí z hlediska konstrukce na hrotové, svislé, čelní, revolverové a speciální. Další rozdělení je dle stupně automatizace, používají se soustruhy ručně ovládané, poloautomatické a automatické. Poloautomatické a automatické soustruhy lze použít pro jakýkoliv stupeň objemu výroby.

Na závěr máme CNC obráběcí centra, která se ovládají pomocí ISO kódu (G-kódu). Jsou to automatizované stroje, které vyžadují jen občasný dohled, pomocí počítače a kódu se nastaví program, kterým se řídí obrábění. Lze použít i pro více obráběcích os pomocí zapřáhnutí posuvů současně. CNC obráběcí centra lze ovládat ručně nebo číslicově (počítačem), obdobný typ soustruhu bude použit pro realizaci experimentu. [3] [4]

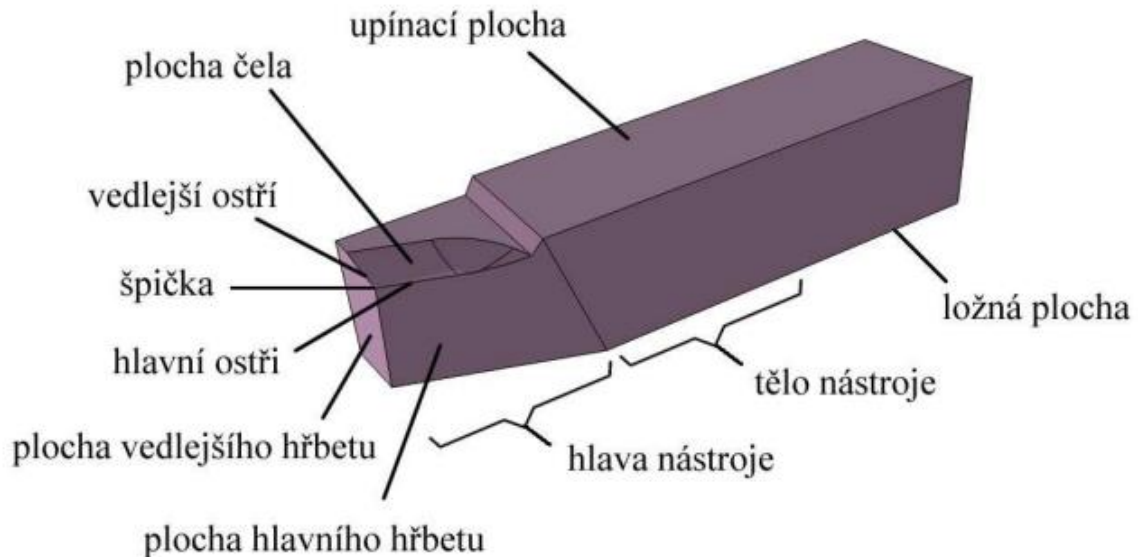


Obrázek 3: Soustružení [5]

2.2 Základní popis soustružnického nože

Soustružnický nůž je řezný nástroj, který je kinematickým prvkem obrábění sloužícím k oddělování materiálu z obrobku. Účelem řezného nástroje je získání požadovaných vlastností obrobku, jako jsou stupeň přesnosti a drsnost povrchu. Nástroj se rozděluje podle tvaru nástroje na pravý a levý. Má funkční část, jež se nazývá břit. Ta je pracovní řezná část složená z ploch, a to z čela, hřbetu a vedlejšího hřbetu. Společně tyto plochy tvoří klín, ten obsahuje části, které pomáhají vytvářet třísku, jedná se o hřbet a ostří. V současné době jsou dostupné různé druhy a materiály nástrojů. Další část nástroje je upínací část. Upínací část nástroje (stopka) je část nástroje, která slouží pro upínání. Za tuto část nástroje se upíná nástroj do suportové hlavy nebo

se vkládá do revolverové hlavy. Mohou být i použity jiné styly upnutí nástrojů dle rozdílných druhů obráběcích strojů a center. [3] [6]



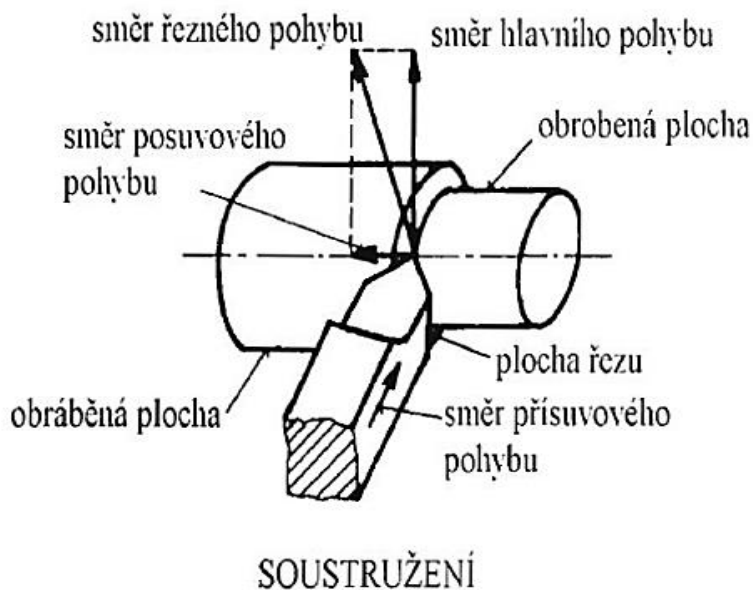
Obrázek 4: Popis soustružnického nože [29]

Plocha nástroje slouží pro umístění a orientaci nástroje při jeho výrobě, ostření nebo kontrole se nazývá základna. Ta je zpravidla rovnoběžná nebo kolmá plocha k nástrojové základní rovině. Následující částí nástroje je těleso, to je plocha nástroje, na které jsou veškeré vytvořené části jako řezná část a upínací část. Samotné těleso má účel upínání. Hřbet je tvořen plošky nebo jako ploška na nástroji, která je při obrábění na přivrácené straně k obrobku. Čelo je plocha nebo více ploch, na které tříška odchází. Je vytvořené z více se protínajících se ploch. Rozeznáváme dva druhy čela, v závislosti na poloze se jedná o čelo, které přiléhá k hlavnímu nebo vedlejšímu břitu. Čelo, které je blíže k ploše řezu, se nazývá hlavní čelo, plocha, která je nejbližší k již obrobené ploše, nese název vedlejší čelo. Ostří je průsečnice hřbetu a čela, část břitu slouží k obrábění. Špička spojuje vedlejší a hlavní ostří, tato plocha je zaoblená nebo sražená. U soustružnického nože je na špičce zaoblení ve tvaru oblouku. Dle tohoto zaoblení lze rozdělovat nástroje. Poloměr zaoblení nám výrazně ovlivňuje řezné síly. S rostoucím poloměrem špičky rostou řezné síly ve všech směrech. Fazetka je ploška na nástroji, která je speciálně

upravena, výrazně ovlivňuje utváření a odchod třísky, značný vliv má také na drsnost vznikajícího povrchu. Utvařecí třísky, plocha a její účel jsou k utváření nebo lámání třísek dle potřeby. [2]

2.2.1 Pohyby nástroje

Všechny pohyby, směry a rychlosti pohybů jsou spojené s obrobkem. Mezi základní pohyby patří hlavní pohyb. Jedná se o pohyb, který koná pracovní stroj nebo se koná ručně. Zajišťuje vzájemný pohyb nástrojů a obrobku. Při soustružení se jedná o hlavní pohyb rotační, který koná obrobek. Ten spolu s hlavním pohybem a posuvem umožňuje vícenásobné nebo plynulé odebrání obráběného materiálu během několika otáček. Ve většině případů hlavní pohyb spotřebovává nejvíce výkonu nutného k obrábění. Směr hlavního pohybu je kolmý na směr posuvového pohybu (viz obrázek 5).



Obrázek 5: Pohyby při soustružení [6]

Rozlišujeme dva různé druhy vedlejších pohybů při obrábění, jedná se o pohyb přísuvo-
vový a o pohyb posuvový. Posuvový pohyb je okamžitý pohyb, jež vyvozuje posuvový me-
chanismus stroje, ale také jej lze ovládat ručně. Tento pohyb zabezpečuje následující relativní
pohyb s nástrojem a obráběným materiálem. Společně s hlavním pohybem zajišťuje opakované
nebo plynulé odebrání materiálu z obráběné plochy. Pohyb může být realizován jako plynulý

nebo přerušovaný. Je schopen působit v radiálním, axiálním nebo také v obecném směru. Spotřeba výkonu je výrazně menší než u hlavního pohybu. Směr posuvového pohybu se určuje podle okamžitého posuvového bodu na ostří nástroje vzhledem k obrobku. Přisuvový pohyb je pohyb nástroje vzhledem k obrobku, kde lze nastavit relativní polohu nástroje a obrobku ještě před zahájením obrábění. Směr prisuvového pohybu je směrem okamžitého pohybu bodu na ostří vtaženému k obrobku. [7]

2.2.2 Geometrie nástroje

Řezné a nástrojové řezné úhly určující jednoznačně tvar břitu nástroje za klidu v souřadnicovém systému orientovaném ve směru hlavního pohybu (viz Obrázek 6). Další polohy čela, hřbetu, hlavních a vedlejších ploch břitu se určují pomocí takzvaných nástrojových úhlů. Tyto úhly jsou definovány dle souřadnicových rovin. Hlavní pracovní úhly nástroje se nacházející v nástrojové boční rovině.

Nástrojová základní rovina P_r , prochází uvažovaným bodem ostří, který je kolmý na vektor řezné rychlosti v_c .

Nástrojová boční rovina P_f , prochází bodem uvažovaným kolmo k ose nástroje a základní nástrojové rovině P_r .

Nástrojová zadní rovina P_p je taková, která prochází bodem ostří a je kolmá k rovinám P_r a P_f .

Nástrojová rovina ostří P_s , se dotýká ostří a je kolmá na základní rovinu P_r .

Normálová rovina P_n , je kolmá na ostří a prochází uvažovaným bodem.

Nástrojová ortogonální rovina P_o , prochází uvažovaným bodem a zároveň je kolmá na rovinu základní P_r a rovinu ostří P_s .

Rovina největšího spádu čela P_g a hřbetu P_b .

Úhel nastavení hlavního ostří κ_r . Tento úhel se nachází v nástrojové rovině hlavního ostří a nástrojovou boční rovinou.

Úhel nastavení vedlejšího ostří κ'_r je úhel, kde je nastavení vedlejšího ostří měřený v nástrojové základní rovině mezi rovinou nástroje vedlejšího ostří a nástrojovou boční rovinou.

Nástrojový úhel nastavení doplňkový ψ_r , který je měřený v nástrojové základní rovině mezi dvěma rovinami nástrojovou rovinou ostří a nástrojovou rovinou zadní.

Nástrojový úhel sklonu ostří λ_s se dá změřit v nástrojové rovině ostří mezi ostřím S a nástrojovou základní rovinou.

Nástrojový úhel špičky ϵ_r se nachází u špičky nástroje a měří se v nástrojové základní rovině mezi hlavním a vedlejším ostřím.

Nástrojový úhel čela γ mezi základní rovinou P_r a čelem A_γ je měřený v nástrojové rovině.

Nástrojový úhel břitu β je úhel, který svírá čelo A_γ s hřbetem nástroje A_α .

Nástrojový úhel hřbetu α se nachází mezi hřbetem nástroje A_α a nástrojovou rovinou ostří P_s a je viditelný v nástrojové rovině.

Úhel čela γ má největší vliv na celý řezný proces.

Úhel nastavení κ_r a úhel vedlejšího nastavení κ'_r má vliv na polohu ostří a k obrobené ploše v základní rovině.

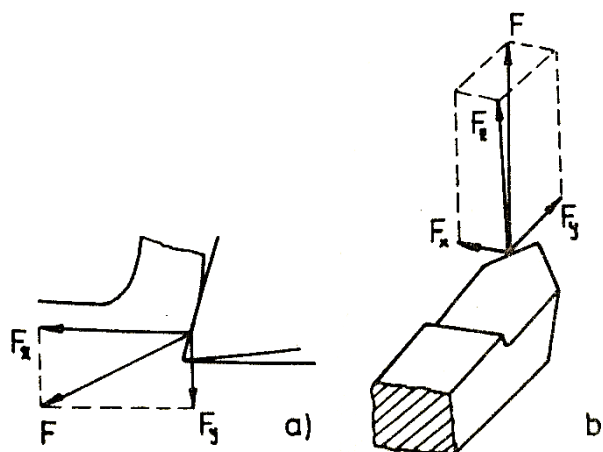
Úhel hřbetu α zásadně ovlivňuje polohu hřbetu břitu s ohledem k ploše řezu.

Úhel sklonu ostří λ_s má zásadní vliv na pevnost břitu a určuje i směr odchodu třísky po čele nástroje. [7] [2]

Druhý druh řezání se jmenuje vázané řezání, které je typické pro podélné soustružení a frézování frézou s šikmým ozubením, také při vrtání aj.

Ortogonální řezání lze rozložit řeznou silou do dvou složek F_z, F_y , jejich složením se získá výsledná síla F (viz Obrázek 7a). Vázaným řezáním se výsledná síla rozkládá na tři složky F_z, F_y, F_x , jak lze vidět na následujícím obrázku 7b (viz Obrázek 7b). [3] [8]

Řezná síla se dá učit dvěma typy metod – přímou a nepřímou. Přímou metodou se měří řezné síly speciálním siloměrem. Nepřímou metodou například za využití přepočtu z příkonu hlavního elektromotoru obráběcího stroje wattmetrem.



Obrázek 7: Rozložení řezné síly do složek [3]

2.3.1 Výpočet sil při obrábění

Síly, které vznikají při obrábění, lze určit pomocí výpočtů. Jeden postup při výpočtu řezné síly je z hodnoty měrného řezného odporu k_c [MPa]. Další možná metoda je pomocí takzvaných empirických vztahů.

- Výpočet z měrného řezného odporu

$$k_c = \frac{F_z}{S} = \frac{F_z}{f \cdot a} [\text{MPa}], \quad (1)$$

kde F_z [N] je tangenciální složka síly, S [mm^2] je průřez odřezávané vrstvy $S = f \cdot a$. Vzorec lze upravit pro výpočet řezné síly

$$F_z = k_c \cdot a^x \cdot s^y = k_c \cdot S [\text{N}] \quad (2)$$

Tloušťka odřezávané vrstvy je značena pomocí symbolu a [mm]. Posuv se značí znakem f , udává se v jednotkách [mm/ot]. X je mocnitel pro hloubku řezu [-]. Y je mocnitel pro posuv [-].

- **Výpočet z efektivního výkonu elektromotoru**

$$P_{ef} = \frac{F_z * v_c}{6 * 10^4} [kW], \quad (3)$$

kde $v_c [m * min^{-1}]$ je řezná rychlost.

- **Výpočet z empirických vztahů**

Výpočet tangenciální složky síly (působící ve směru hlavního řezného pohybu)

$$F_z = c_{F_z} * a^{X_{F_z}} * f^{Y_{F_z}} * K_z [N]. \quad (4)$$

Výpočet radiální složky síly (působící ve směru přísluvu)

$$F_y = c_{F_y} * a^{X_{F_y}} * f^{Y_{F_y}} * K_y [N]. \quad (5)$$

Výpočet složky ve směru posuvu f (axiální složka pohybu)

$$F_x = c_{F_x} * a^{X_{F_x}} * f^{Y_{F_x}} * K_x [N]. \quad (6)$$

Koeficienty v empirických vztazích C a exponenty X , Y a opravných součinitelů K jsou odvozeny z výsledků laboratorních měření, které jsou bezrozměrné. [9] [3] [8] [10]

- **Vztah pro celkovou sílu je**

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} [N]. \quad (7)$$

2.3.2 Faktory ovlivňující velikosti řezných sil

Obrobitelnost materiálu je souhrn vlastností, které jednoznačně určují, jakých hodnot bude nabývat otupení břitu a jakou jakost bude mít obráběný materiál. Produktivita a hospodárnost je závislá na obrábění a vlastnostech materiálu, na chemickém složení obrobku, mechanických vlastnostech a také na jeho způsobu tepelného zpracování. Obrobitelnost materiálu určuje velikost práce potřebné k oddělení třísky, lze také uvažovat o práci potřebné k vytvoření požadovaného stupně drsnosti povrchu. Z hospodárného hlediska lze o obrobitelnosti říci, že se

jedná o objem odřezávaného materiálu za jednotku času při použití ideálních řezných podmínek. Lze také formulovat větu o obrobiteľnosti materiálu, která je definována jako velikost energie spotřebované pro odříznutí materiálu o požadovaných vlastnostech určitou řeznou rychlostí a nástrojem s předem danou geometrií. Obrobiteľnost materiálu lze brát jako relativní hodnotu, která určuje závislost mezi různorodostí materiálů, které mají rozdílné stupně obrobiteľnosti, ať se jedná o větší či menší stupně obrobiteľnosti při stejných podmínkách.

Řezné prostředí, ve kterém se obrábí, může svými vlastnostmi přispět ke zvýšení nebo snížení řezných sil. Zároveň řezné prostředí má vliv na hospodárné i ekonomické aspekty obrábění. Kvůli velkému vzniku tepla při obrábění je vhodné užití chladících, mazacích nebo jen čistících prvků obrábění. Nejčastěji se jedná pouze o přísadu vzduchu do obrábění, která odvádí třísky z místa řezu a také chladí nástroj i obrobek. Dalšími prostředími, které se používají v obrábění, je kapalina a mlha. Řezné prostředí lze rozdělit podle funkce do několika kategorií. První z nich má za účel snížení teploty v místě řezu, tudíž se jedná o chladící účinek. Druhá kategorie je mazací, která sníží tření stykových ploch břitu. Dalšími kategoriemi jsou čistící, kde se odstraňují třísky, a chemický, kde se používají různé emulze a oleje, lze také použít chemické roztoky vodních sloučenin. Chemické kapaliny nesmějí narušit materiál obrobku nebo nástroje. Nejdůležitějším faktorem v řezném prostředí je chladící účinek, ten vyjadřuje odvod tepla z místa řezu, proto výchozí hodnotou by měl být součinitel přenosu tepla. [11]

Při obrábění je nutné použít řeznou rychlost v_c s ohledem na faktory, které by mohly zvýšit řezné síly, a tím přispět k poškození nebo otupení nástroje. Při příliš vysokých řezných rychlostech v_c se mohou vytvářet na břitu nástroje nárůstky, které budou poškozovat nástroj i samotný obrobek. Přispívá to také k rychlejšímu otupení břitu, což vede k nehospodárnosti obrábění. Vysokými řeznými rychlostmi dojde ke zhoršení kvality obrobeného povrchu a ke zvýšení řezných sil. Použití nízkých řezných rychlostí má za následek rychlejší opotřebení hřbetu nástroje. Také vzniká horší kvalita povrchu a vytváří se opotřebení na nástroji, jehož tvar se přibližuje žlábků. Obrobek může nést na sobě při nízkých řezných rychlostech plastické deformace.

Dalším důležitým faktorem, který má vliv na řezné síly, je hloubka řezu a_p . Použitím příliš malých hloubek řezu se nám výrazně sníží hospodárnost. Vznikajícími vibracemi se tvoří třísky náhodného charakteru. Vzniká velké množství tepla v místě řezu, ale se snižujícími se

hloubkami řezu dosahujeme menších řezných sil. Při zvyšování hloubky řezu můžeme pozorovat zvýšení řezných sil. To může přispět k vylomení břitové destičky. Při vyšších řezných silách se také rapidně zvyšuje nárok na výkon stroje.

Rychlost posuvů v_f má také odůvodnění v oblasti řezných sil.

Velikost intenzity práce má značný vliv na trvanlivost nástroje a ten souvisí s produktivitou nástroje, která je určena jako výdrž v minutách nástroje při nepřetržitém obrábění. Uhlíkové materiály se dobře obrábí, ale obtížně brousí, protože při broušení vzniká v místě řezu vysoká teplota až 1500 °C, která vede k porušení tvrdosti povrchové vrstvy a ke zvyšování řezných sil. [7] [8] [4]

Měrný řezný odpor je odpor materiálu vůči zatížení vnějších sil vztahený na jednotku plochy řezu. Pro překonání tohoto odporu se používá vnější řezná síla. Ta lze rozložit do tří složek: F_z (tangenciální působící ve směru hl pohybu), F_y (radiální složka řezné síly ve směru přísuvu, kolmo na F_z), F_a (axiální složka ve směru posuvu nástroje rovnoběžně s osou obrobku je kolmá na F_z a F_y). Střední velikost měrného řezného odporu se obvykle pohybuje řádově 3 až 5krát výše než pevnost obráběného mat. v tahu. Měrný řezný odpor se zvětšuje s klesající se tloušťkou odřezávané vrstvy. Řezný odpor lze vypočítat pomocí této rovnice:

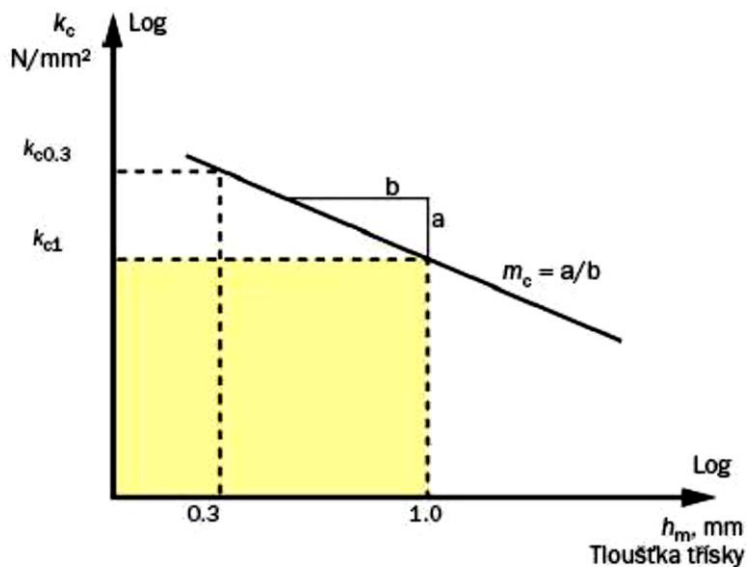
$$k_c = k_{c1} * a^{-m_c} * \left(1 \frac{\gamma_o}{100}\right) [MPa] \quad (8)$$

Kde:

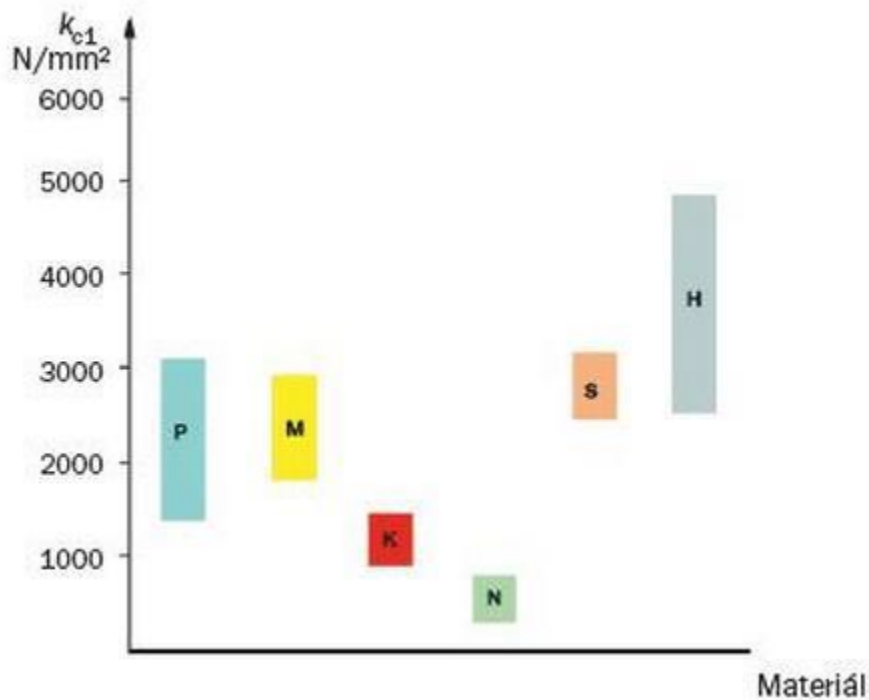
k_{c1} ... je měrný řezný odpor [MPa]

γ_o ... je úhel čela měřený v ortogonální rovině [°]

m_c ... je koeficient změny intenzity měrného řezného odporu ve vztahu k tloušťce třísky [-], velikost koeficientu m_c lze určit z následujícího grafu, kde $m_c = a/b$. (viz Obrázek 8)



Obrázek 8: Velikost koeficientu m_c [32]



Obrázek 9: Velikost k_{c1} pro třídy obrábivosti materiálů [32]

Měrný řezný odpor lze přibližně určit pomocí grafu výše (viz Obrázek 9), který popisuje, jakou má velikost jednotkový měrný řezný odpor pro různé druhy obrábivosti materiálů.

Se snižujícím se úhlem čela nebo se záporným úhlem čela se zvětšuje intenzita plastických deformací a tření mezi čelem nástroje a třískou odcházející z obrobku. Se zvětšujícím se úhlem čela se zvětšuje mechanické namáhání břitu, které vede k mechanickému poškození nástroje z důvodu zeslabování břitu, může docházet k vylamování nástroje. Lze vyvodit z těchto důsledků, že při obrábění obrobků s vyšší pevností se musí volit úhel čela menší než při obrábění obrobků s nižší pevností. Při volbě velkého úhlu čela se také zhoršuje drsnost obrobené plochy, protože břit materiál vytrhává. Úhel čela se při obrábění pohybuje v hodnotách od 40° až do -15° . Z důvodu zmenšení namáhání břitu se vytváří u větších úhlů čela malá negativní fazetka ve tvaru úzké plošky. Šířka plošky je obvykle od 0,3 mm do 2 mm dle velikostí posuvů.

Velikost tření se mění s geometrií nástroje. Se snižujícím se úhlem hřbetu se zvětšuje styková plocha hřbetu a plocha řezu, také se tím zvětšuje tření mezi těmito plochami. Při velkých řezných rychlostech a také při menších posuvech je vhodné volit větší úhel hřbetu. Obvyklá velikost úhlu hřbetu je v rozmezí od 3° až do 20° .

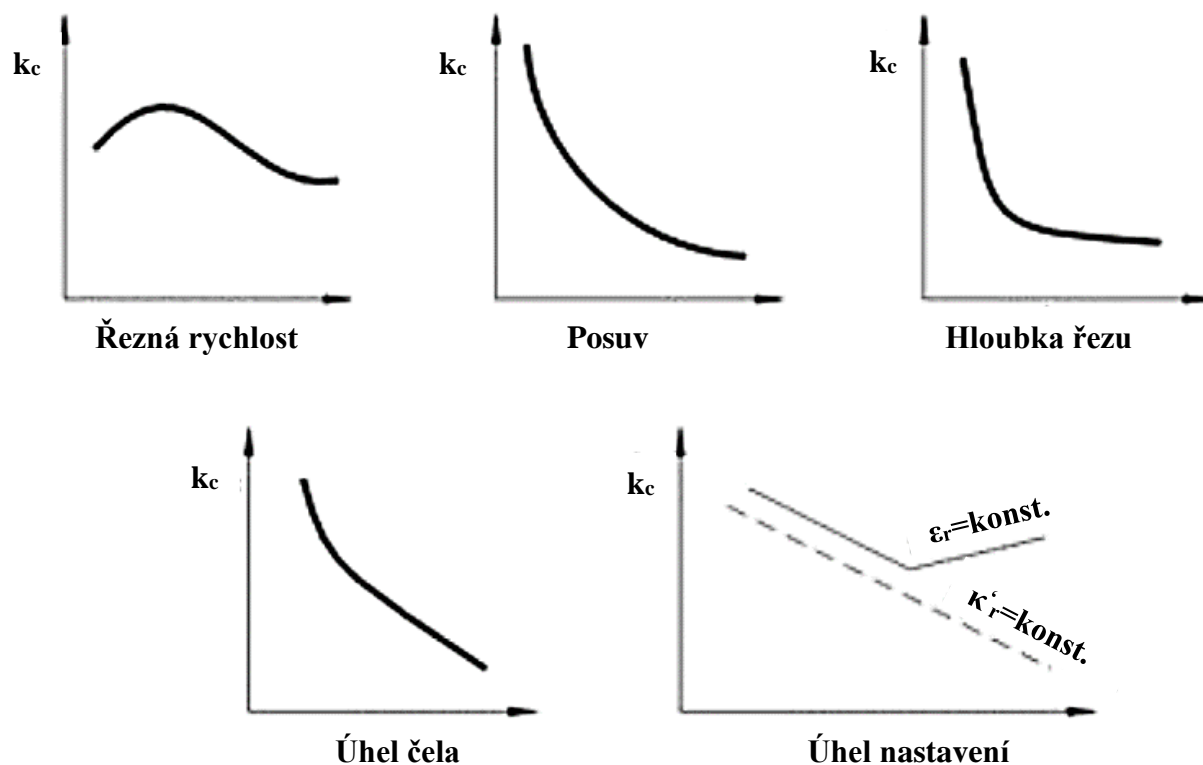
Velikost úhlu nastavení κ_r ovlivňuje i průřez odebírané třísky. Velikost měrného řezného odporu i velikost měrného zatížení břitu je ovlivněna kromě toho s proměnným poměrem tloušťky a šířky třísky. Změnou úhlu lze snížit i radiální složku řezné síly, ale u štíhlých součástí může docházet ke chvění a většímu průhybu. Při změně κ'_r ovlivňujeme drsnost povrchu obrobku. S klesajícím úhlem nám klesá i drsnost povrchu obrobku.

Úhel sklonu ostří dosahuje v zásadě hodnot od $+20^\circ$ až do -30° . Při úhlu sklonu ostří rovnému nule máme rovnoběžné ostří se základní rovinou. Dle polohy špičky nástroje se nám určuje úhel sklonu ostří. V případě, kdy je špička nejvyšším bodem, tak je úhel kladný. Pokud tato podmínka není splněna, úhel je záporný. Použití záporných hodnot úhlu se používá při přerušovaném řezání, protože nedochází k prvnímu dotyku na špičce nástroje, ale na ostří nástroje v určité vzdálenosti od špičky nástroje. Z teorie vyplývá, že je vhodné užití záporných úhlů λ , γ a tím docílíme, že budeme prvotně obrábět plochou, která leží uvnitř plochy čela. [2] [7] [3]

2.3.3 Měrný řezný odpor

Měrný řezný odpor je síla působící na břit nástroje při obrábění, která je vztažená na jednotkovou plochu. Měrný řezný odpor je ovlivněn mnoha faktory. Zásadní vliv mají řezné síly a vlastnosti obráběného materiálu. Dalšími důležitými faktory jsou řezné rychlosti, tloušťka

odřezávané vrstvy, geometrie nástroje, jak lze vidět z Obrázku 10. Podle této teorie lze formulovat a ověřit hypotézu zvětšování tloušťky odřezávané vrstvy, při které se zmenšuje měrný řezný odpor.



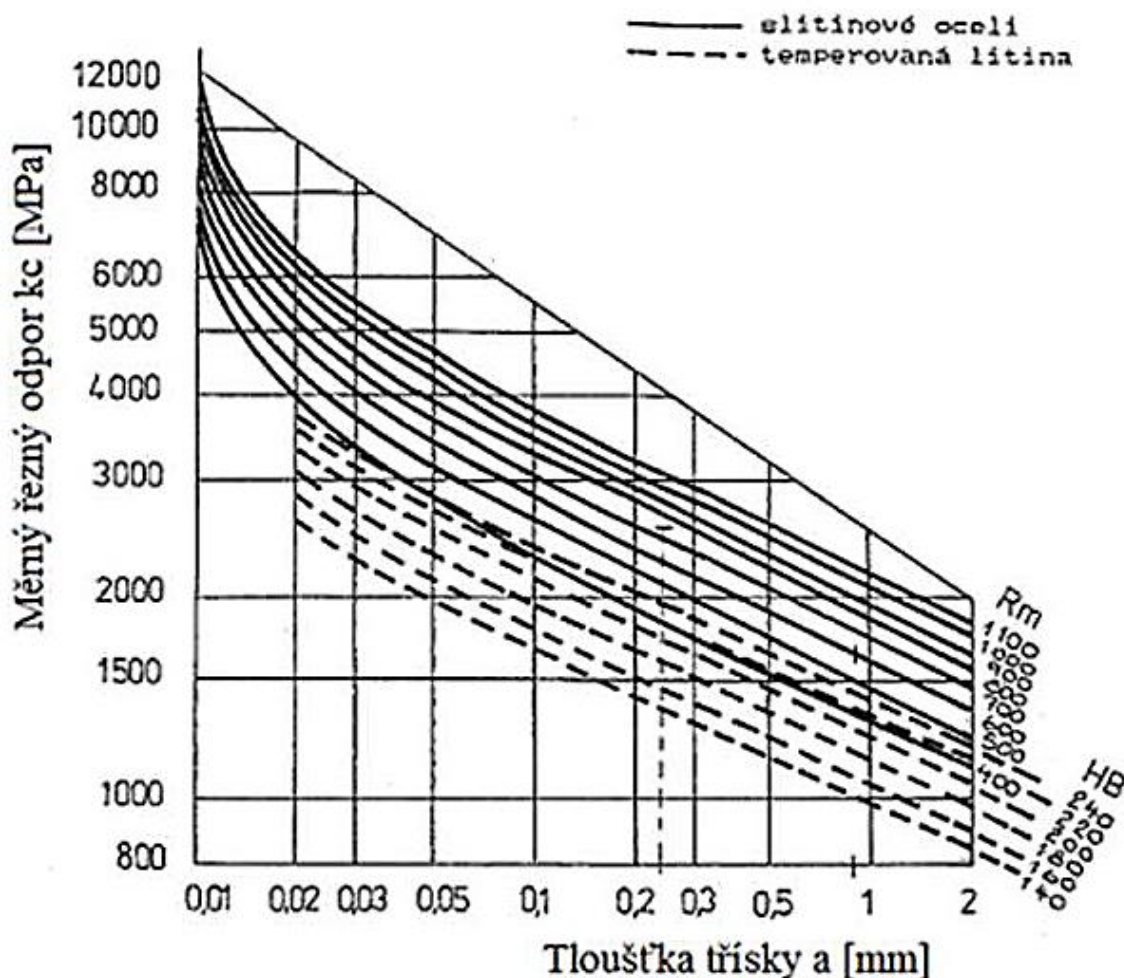
Obrázek 10: Závislost k_c na řezné rychlosti, posuvu, hloubce řezu, úhlu čela a úhlu nastavení, platí pro obrábění kovů [33]

Faktory ovlivňující řeznou sílu jsou zmíněné v kapitole 2.3.2. Mezi základní prvky patří pevnost, tvrdost a houževnatost. Velký vliv má používání chladicích a mazacích emulzí. Vliv má na řezné síly i soustava stroj, nástroj, obrobek a přípravek (SNOP). U této soustavy je zásadní její tuhost, která by měla být co největší, aby nedocházelo k vibracím a nežádoucím účinkům spojeným s obráběním. [3]

V dnešní době je kladen důraz na snížení měrného řezného odporu kvůli snížení zatížení stroje. Tato teorie je velice důležitá při navrhování podmínek pro experiment obrábění, především pak pro optimalizace procesu obrábění. [12]

V praxi je důraz na co největší produktivitu a kvalitu. Kvůli produktivitě se často snaží obrábět celý obrobek najednou, při dokončovacích operacích je tato zásada vhodná, ale kvůli

hospodárnosti je optimální volit co nejmenší přídávky na obrábění a tloušťku odebíraného materiálu při dokončovacích operacích. Dosáhneme tím lepší drsnosti a přesnosti povrchu. Do přídávky na obrábění se musí zahrnout velikost nepřesnosti předchozí operace, změna měrného řezného odporu, zaoblčení ostří. [11]



Obrázek 11: Hodnoty měrného řezného odporu [9]

Při hrubovacích operacích tato zásada obvykle neplatí. Může být i výhodnější odebírat obráběný materiál na více úběřů kvůli výraznému zmenšení řezných sil. Když se odebírá velké množství materiálu, tak se musí dle teorie snížit posuv, což má za následek snížení tloušťky odřezávané vrstvy. Následné snížení tloušťky odřezávané vrstvy má za následek zvýšení měrného řezného odporu, jak lze vidět z grafu (viz. Obrázek 11).

2.4 Podobné práce

Podobnou prací je diplomová práce pana Ing. Josefa Marka, která zkoumá závislost měrného řezného odporu na tloušťce odebírané vrstvy při soustružení.

V práci bylo zjištěno, že největší vliv na měrný řezný odpor má řezná rychlost. Při experimentu se potvrdilo, že hloubka řezu nemá prakticky vliv na velikost měrného řezného odporu. Dále pak že při minimální tloušťce odřezávané vrstvy dosahuje měrný řezný odpor nejvyšších hodnot a se zvětšováním tloušťky odřezávané vrstvy následně klesá jeho hodnota. V experimentu bylo zjištěno, že vliv řezné rychlosti při $a_p=0,2$ mm nemá statisticky významný vliv a projeví se až při hloubce řezu 0,4 mm. Největší vliv byl prokázán u tloušťky odřezávané vrstvy menší než 0,1 mm, kde při vyšších řezných rychlostech se dramaticky snižuje měrný řezný odpor. [13]

Disertační práce pana Ing. Josefa Skleničky Ph.D. je zaměřená na experimentální stanovení modelu silového zatížení šroubovitého vrtáku. V této práci se rovněž zjišťuje měrný řezný odpor při technologii vrtání pomocí šroubovitého vrtáku.

Na základě výsledků z experimentů lze usoudit, že nejméně popsanou oblast z pohledu výpočtu silového zatížení šroubového vrtáku byla oblast statistického modelování. Dále pak bylo zjištěno, že doposud nebyla nalezena žádná uspokojivá metoda experimentálního zjišťování měrného odporu, kterou tato práce zkoumala. Potvrdilo se při nalezení modelů, že v praxi používané výpočty jsou téměř stejně přesné jako nalezený model. U jednoho z modelů se dokonce prokázala lepší přesnost než u výpočtů používaných v praxi. V práci byla poté nalezena efektivní metoda určování jednotkového měrného odporu. Následující část práce prokazovala, že polohy vrtaného otvoru nemá vliv na velikost kroutícího momentu. Bohužel pro posuvovou sílu získaný statistický model neměl dostatečnou vypovídající hodnotu a při porovnávání vykazoval vyšší nepřesnosti, proto nebyl získán vliv polohy na měrnou hodnotu. [14]

2.5 Rozbor současného stavu – volba materiálu

Materiály byly voleny s ohledem na realizaci experimentu, která vyžaduje co nejpřesněji určit měrný řezný odpor materiálů. Zvolení zástupci neželezných slitin jsou:

- a) Materiál 7. třídy slitiny hliníku, zinku, hořčíku a mědi – AlZn5.5MgCu

- b) Materiál slitina mědi chromu a zirkonu – CuCrZr
- c) Materiál 6. třídy slitiny hliníku hořčíku a křemíku – AlMgSiPb

Vlastnosti zvolených slitin jsou:

- a) AlZn5.5MgCu (EN AW 7075) znakem této slitiny je velmi vysoká pevnost v tahu 460-540 MPa. Obsah zinku ve slitině se pohybuje 5-8 %. Pomocí přísady mědi lze dosáhnout vyšší pevnosti až 600 MPa, ale odolnost vůči korozi klesá s množstvím přísady mědi a náchylnosti k vrubům. Při výskytu ostrých vrubů (buď to slabých, nebo silných rýh) materiál špatně snáší cyklické zatížení a rychle praská. Legujícími prvky jsou chrom, titan. Tyto slitiny se často používají např. v leteckém průmyslu a automobilovém průmyslu. [13] [14]
- b) CuCrZr (EN CW106C) je slitina která, se hojně využívá v strojním a ručním svařování. Slitina obsahuje 0,5-1,2 % chromu, který společně se zirkoniem s obsahem od 0,03 % do 0,3 %, zlepšují mechanické vlastnosti slitiny v porovnání s E-Cu. Lze pozorovat také změnu teploty měknutí kolem 450°C. Obsah železa se pohybuje okolo 0,08 % a obsah křemíku ve slitině je 0,1 %. Tvrdost slitiny je 130-160 HB, velice dobrá je elektrická a tepelná vodivost slitiny. Dále je dobře obrobiteľná, pevnost v tahu 430-540 MPa a mez kluzu slitiny je 450MPa. Slitinu lze vytvrzovat tvářením za studena, má dobrou odolnost vůči korozi. [13] [15]
- c) AlMgSiPb (EN AW 6012) je slitina převážně používaná v leteckém a automobilovém průmyslu. Slitina má velice dobré vlastnosti tváření a korozivzdornosti. Tato slitina je dobře obrobiteľná označující se také jako avialy nebo pantaly. Obsah přísadových prvků nepřesahuje 1,5 %. Lze vytvrzovat, čímž se dosáhne meze pevnosti v tahu 300–350 MPa. Hojně využívané na součásti karosérie, žebrované hlavy válců automobilů. [14] [16]

Srovnání zvolených slitin materiálů podle meze pevnosti v tahu a tvrdosti je v Tabulce 1.

Název slitiny	AlZn5.5MgCu	CuCrZr	AlMgSiPb
Mez pevnosti v tahu [MPa]	500	430	300
Tvrdost [HB]	140	130	85

Tabulka 1: Srovnání zvolených materiálů [17] [18] [15]

3 Návrh a realizace experimentu

3.1 Plán experimentu

V této kapitole bude podrobně popsáno plánování experimentu, kterému se věnují následující podkapitoly.

Měrný řezný odpor je funkcí více proměnných a to a_p , f , F_c , v_c , kde řezná síla F_c je funkcí a_p , f , v_c , a tedy podmínka nezávislosti vstupních proměnných není dodržena. Z tohoto důvodu není možné měřit přímo měrný řezný odpor. Vzhledem k tomuto faktu bylo rozhodnuto, že se budou modelovat velikosti řezných sil. A poté z nalezeného modelu se bude počítat měrný řezný odpor.

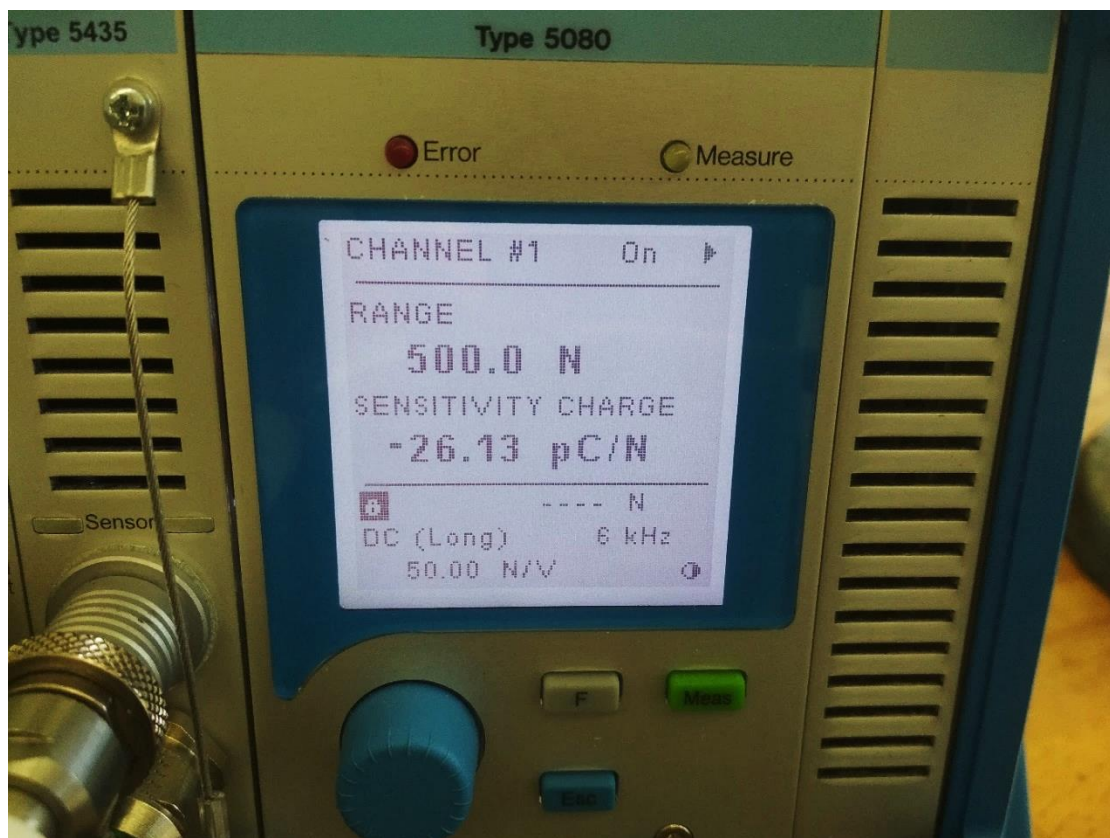
Experiment se bude provádět na CNC soustruhu vybaveného dynamometrem. Proto aby se dosáhlo lepší manipulace a realizace, bude se měřit experimentálně hlavní složka řezné síly při změně posuvů a otáček, tím se změní i tloušťka odřezávané vrstvy. Hlavní složka řezné síly bude přepočítána na měrný řezný odpor. Kvůli vlivu možných nepřesností se musí experiment provést několikrát pro každý bod, čímž dosáhneme nejpřesnějších výsledků. Důležité je také sledování tvorby nárůstků, protože ta mění geometrii nástroje a tím ovlivňuje řezné síly. Vyhodnocení experimentu proběhne grafickou metodou a statistickou metodou. Po vyhodnocení následuje zhodnocení experimentu a vyhodnocení získaných hodnot.

Experiment byl realizován na Západočeské univerzitě v Plzni v prostorách Regionálního technologického institutu, pomocí stroje MAXXTURN 25. Před zahájením experimentu je nezbytně nutné nastavit a připravit pracoviště. V první řadě je důležité upnout dynamometr s držákem na soustružnický nůž s vyměnitelnými břitovými destičkami. Bez této operace není možné realizovat měření. Následujícím krokem je nastavit rozsah hodnot pro měření a rovněž nastavit další vybavení (zesilovač, počítač a digitalizační karta, pomocí nichž lze vyhodnocovat změřené řezné síly).

Přenos dat z dynamometru probíhá pomocí elektrického náboje, jenž je veden skrz zesilovač a digitalizační kartu až do počítače. V počítači je lze poté možné zobrazit grafy řezných sil v programu s názvem DynoWare. Ještě před zahájením měření je nezbytné vyzkoušet funkčnost všech součástí soustavy pro měření. Nutné je též synchronizovat nastavená data v pro-

gramu se zbytkem sestavy. Pokud by došlo k nesprávnému nastavení hodnot v programu a zesilovači, měření by bylo chybné a došlo by k přetížení kanálů. Na přetížení upozorní červené LED diody. Naměřené hodnoty by v tomto případě byly zkreslené a mnohdy i nesmyslné. Proto je nutné měření opakovat a zvětšit či zmenšit rozpětí měřených sil. Kvůli úspoře času je potřeba určit maximální délku snímání dat.

Rozsah vyhodnocovaných sil byl odhadnut v návaznosti na plánované řezné podmínky. Tyto podmínky mohou být v průběhu dle nutnosti upraveny. Nastavení zesilovače je vidět na Obrázku 12 a jedno z vyhodnocení změřených hodnot na Obrázku 13. Při sledování hlavní složky řezné síly měřicí soustava také sleduje posuvovou a normálovou složku sil. Pro tento experiment je ovšem zásadní pouze hlavní složka řezné síly, která poslouží při výpočtu měrného řezného odporu.

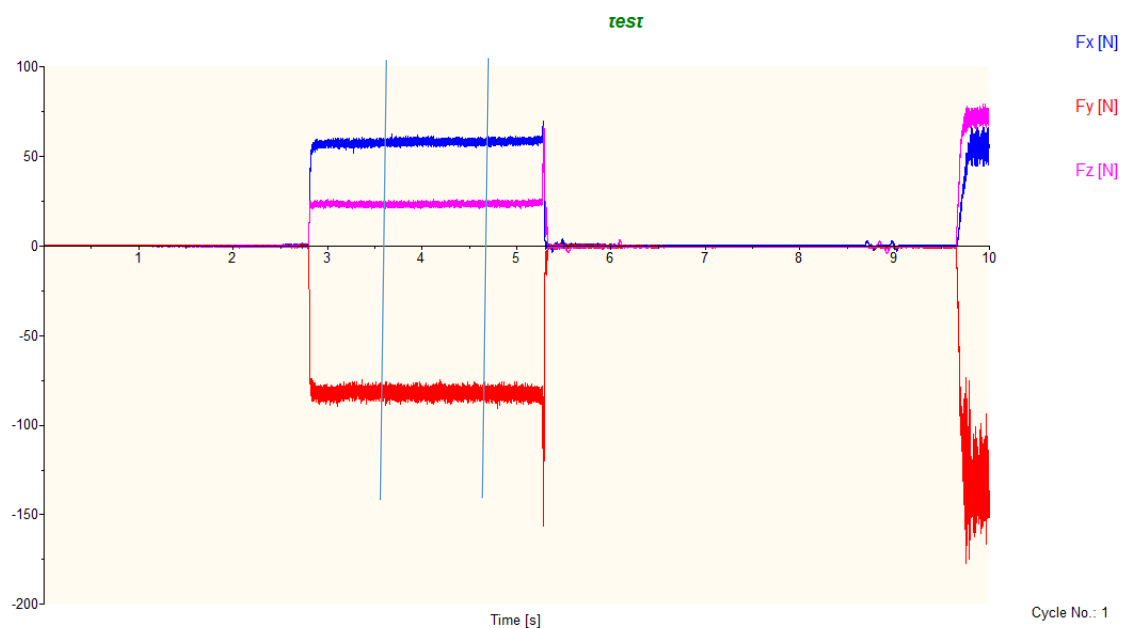


Obrázek 12: Nastavení rozsahu u zesilovače

Z Obrázku 13 lze vidět, jak program DynoWare vykreslil křivku naměřených řezných sil. Pozorováním můžeme vyčíst kdy nástroj přijde do kontaktu s materiálem a dojde k rozkmitání

soustavy S-N-O-P, které má za následek ovlivnění řezných sil. Proto je důležité brát při vyhodnocování v úvahu střední hodnoty, která je již v ustáleném stavu. Pro odhad střední hodnoty můžeme použít nástroje software DynoWare. Oblast výběru se ohraničí dvěma svislými čarami a software poté zobrazí průměrnou hodnotu v oblasti výběru.

Po každém měřeném pokusu je důležité přerovnat obrobek na výchozí drsnost a kvalitu povrchu. Tím bude dosaženo co nejpřesnějšího měření, protože pro každý naměřený kus budou stejné výchozí podmínky. Získané hodnoty jsou k dispozici v příloze (viz Příloha 2).



Obrázek 13: Vyhodnocování řezné síly v programu DynoWare

3.1.1 Faktory experimentu

Mezi důležité faktory experimentu patří:

- Sledovaná odezva je hlavní složka řezné síly v tomto případě se jedná o sílu F_z
- Důležitým parametrem je průběžné sledování opotřebení břitové destičky, jeho přítomnost, respektive nepřítomnost lze vidět v Příloze 1
- Opakovatelnost měření – každý bod se bude na základě zkušeností 6krát opakovat

- Samostatně bude provedeno měření měrného řezného odporu (řezné síly) pro průřez třísky 1x1mm

Je důležité stanovit, jaké faktory jsou konstantní a které jsou kontrolované. Mezi kontrolované faktory patří: posuv na otáčku f [mm] a řezná rychlost v_c [m/min]. Nastavení těchto parametrů má vliv na měrný řezný odpor, jak lze vypočítat z Rovnice 1.

Hloubka řezu a_p je v tomto experimentu zvolena jako konstanta, její velikost je pro celý experiment stejná. Další konstantou je řezné prostředí, kde bude experiment probíhat bez přítomnosti procesních kapalin, které by mohly zapříčinit nepřesnosti v experimentu. Parametry vstupující do procesu jsou zvoleny jako konstantní, jedná se o geometrii nástroje a VBD. Kromě toho se jedná o tvorbu nárůstků, která se musí též sledovat. Posledním důležitým faktorem je, aby se materiál vždy přerovnával stejnými řeznými podmínkami, aby nerovnosti způsobené při přerovnání byly shodné během celého experimentu.

3.1.2 Volba experimentálních řezných podmínek

Kontrolované faktory budou popsány v tabulce níže. (viz Tabulka 2) Z tohoto intervalu budou vybrány náhodné hodnoty, ze kterých se bude přepočítávat měrný řezný odpor.

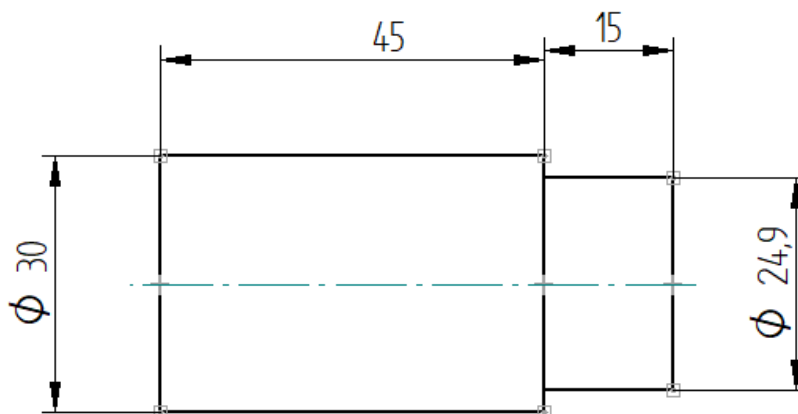
Řezná rychlost v_c [m/min]	50-560
Posuv na otáčku f_{ot} [mm/ot]	0,008-0,4
Hloubka řezu a_p [mm]	1
Opakovatelnost	6x

Tabulka 2: Faktory experimentu

3.2 Materiál pro experiment

Materiál dodávaný výrobcem je v podobě tyčí, které jsou nařezané na požadovanou délku. Výkres polotovaru lze vidět na Obrázku 12 níže. Kvůli dosažení co nejmenší chyby experimentu bude materiál obrobku před každou testovací operací přesoustružen na nižší průměr. Výchozí průměr materiálu obrobku je 30 mm pro EN AW 6012 a pro EN AW 7075 s osazeným koncem. Materiál CuCrZr měl výchozí průměr 29 mm s osazeným koncem pro upínání. Při experimentu budou použity vysoké rychlosti. Proto pro upínání bude použit klešťový upínač,

který není omezený maximálními otáčkami. Ale stroj přímo je omezen na maximálně 8000 otáček za minutu, tudíž minimální průměr, který lze obrobit, je 15 mm.

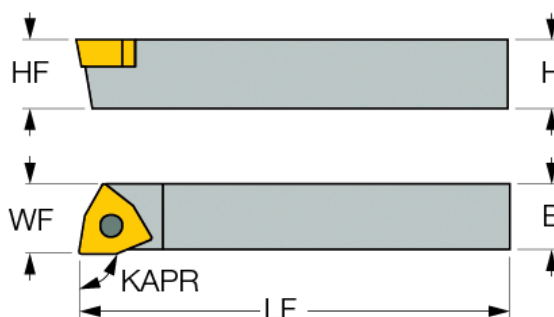


Obrázek 14: Výkres polotovaru

3.3 Vybavení pro experiment

Vzhledem k vybavení a náročnosti experimentu byl zvolen stroj Emco MAXXTURN 25 vybavený soustružnický nůž s VBD od firmy ISCAR a piezoelektrický dynamometr.

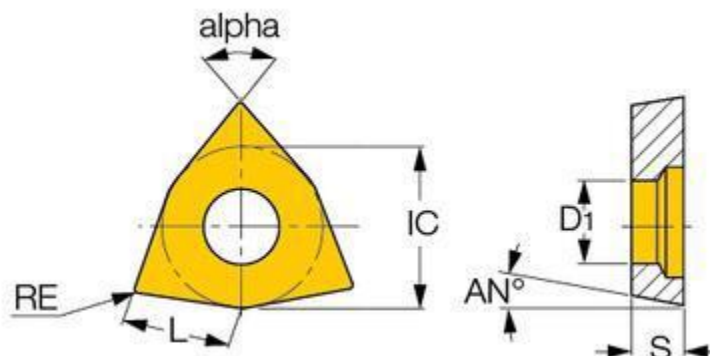
3.3.1 Soustružnický nůž



Obrázek 15: Soustružnický nůž s VBD [19]

Při experimentu bude použit soustružnický nůž pro podélné soustružení s VBD a úhlem nastavení hlavního ostří (κ_r) 90° , s úhlem čela $\gamma_o = 0^\circ$, tyto úhly jsou důležité pro experiment. Bude se provádět podélné soustružení. Pokud se tyto úhly nedodrží, bude nutné provést korekci nástroje. [9]

VBD byla zvolena od firmy Iscar s označením WPEB060404N08 IC908. Geometrii VBD lze vidět na následujícím obrázku (viz Obrázek 16).



Obrázek 16: VBD destička [20]

Kóty jsou popsány v následující tabulce, ze které vyplývá, že maximální posuv je $f=0,2\text{mm/ot}$. Maximální hodnota hloubky řezu je $a_p=3\text{ mm}$. [20] (viz Tabulka 3)

Hodnoty kót popisující VBD [mm]					
RE	L	IC	D ₁	S	AN°
0,4	6	9,52	3,7	4	8

Tabulka 3: Rozměrů VBD [20]

3.3.2 Stroj EMCO MAXXTURN 25

EMCO MAXXTURN 25 je komplexní stroj navržený na opracování menších součástí. Obráběním lze dosáhnout vysoké přesnosti. Stroj je vybavený opěrným vřetenem, osou Y a poháněnými nástroji. V revolverové hlavě lze upnout až 12 nástrojů v držákách VDI 16. Pomocí indexovaných poloh lze rozšířit počet řezných nástrojů až na 42. Stroj je vybaven řídicím systémem SIEMENS nebo FANUC, kde je obvykle i ShopTurn nebo ManualGuide. Pracovní prostor má tři programovatelné osy X, Y a Z. Posuv os je omezen na rozměry v ose X=100 mm, Y na 35 mm a Z na 300 mm. Maximální průměr, který lze obrábět, je 114 mm. Vzdálenost mezi vřeteny je 485 mm a maximální průměr ve vřeteně je 25,4 mm. Při maximálním výkonu hlavního vřetená 6,5 kW lze dosáhnout maximálních otáček 8000 za minutu. Velikost kroutícího momentu dosahuje až 30 Nm. Stroj má rozměry (délka x šířka x výška) 2180 x 1425 x 1870

mm a hmotnost stroje se pohybuje okolo 2100 kg. Protivřetenem a revolverová hlava jsou také poháněné. Pro menší průměry obrobků lze použít automatický podavač tyčí. [4]



Obrázek 17: Stroj MAXXTURN 25

3.3.3 Piezoelektrický dynamometr

Experiment byl realizován s dynamometrem od společnosti KISTLER. Jak napovídá název, tak princip jeho funkce je založen na piezoelektrickém jevu. Ten vzniká tvorbou elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Na následujícím obrázku (viz Obrázek 18) lze vidět zmiňovaný dynamometr.

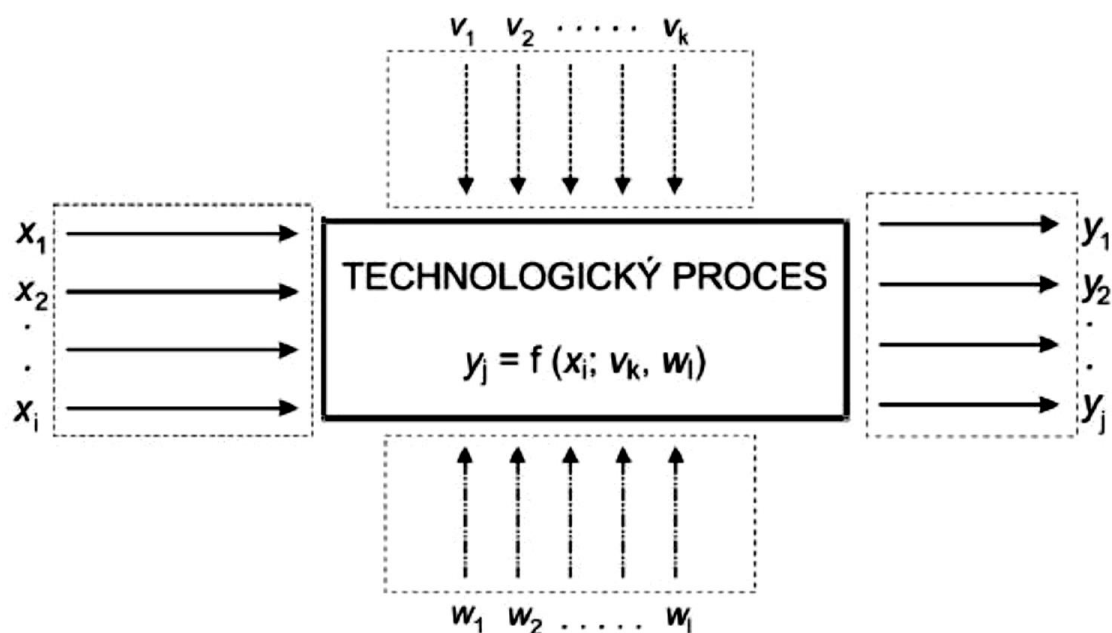
Nejčastějšími materiály pro piezoelektrické nástroje jsou křemeny, dále potom materiály na bázi titaničitanu barnatého, Seignettovy soli apod. Základem snímače je měřicí deska vhodně vyříznutá z některého ze zástupců krystalů. Při zatížení je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly. S poklesem zatížení se velikost náboje lineárně snižuje, až téměř vymizí při nulovém zatížení. [21]



Obrázek 18: Piezoelektrický dynamometr s nástrojem

3.4 Návrh vyhodnocování experimentu DoE

Mezi jeden ze základních principů statistického vyhodnocování experimentů patří systém DoE (Design of Experiment) používaný v statistické matematice. Zjednodušeně se jedná o návod, který slouží k samotnému návrhu a vyhodnocení experimentu. Proces, kterým bude prováděn experiment, je ovlivněn mnoha vlivy. Část z nich je možné aktivně upravovat, ale část ovlivnit nemůžeme. Hodnoty vstupující do procesu se jmenují faktory. Hodnoty výstupu z procesu nazýváme odezvy. Cílem metody DoE je vyhledat vhodnou kombinaci faktorů tak, aby byly odezvy co nejvíce věrohodné a popsaly zkoumaný jev. Pro získání nejpřesnějších výsledků je nezbytné odezvy sledovat ve více bodech experimentálního prostoru. Se zvyšujícím se počtem sledovaných bodů úměrně roste čas a finance potřebné pro vyhodnocení experimentu. Vzorové schéma experimentu vyhodnocovaného podle této metody lze vidět na obrázku níže. (viz Obrázek 19) [22]



Obrázek 19: Názorné schéma vyhodnocení pomocí DoE [22]

3.4.1 Základní rozdělení experimentů

Experimenty lze rozdělit na několik různých typů. Jedná se například o typy 2_{k-p} a 3_{k-p} základní návrhy (Box, Hunter a Hunter), rozšířené o návrhy se dvěma nebo třemi úrovněmi, o D a $A(T)$ optimální plány nebo o centrální kompozitní plány. Je nezbytné předpokládat nelineární závislost mezi proměnnými. Tudiž lze předpokládat, že interakce proměnných se jeví jako nejvýhodnější, a proto se volí centrální kompozitní plán.

3.4.2 Centrální kompozitní plán

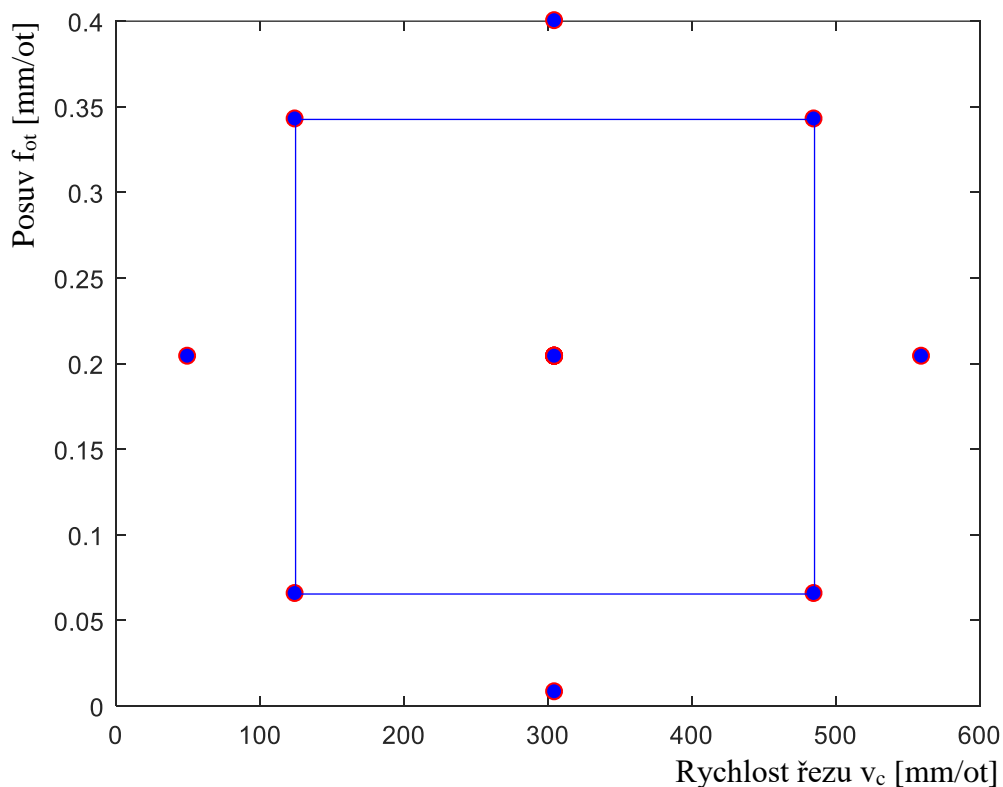
Centrální kompozitní plán se skládá ze tří základních částí. V první části se tvoří krychlové body, které jsou v plánu nezbytné. Jejich počet se určuje pomocí vztahu: $n = 2^{k-p}$. Účel těchto bodů je pro výpočet efektů faktorů. Následující částí jsou centrální body, díky kterým se vyjadřují čisté chyby měření. Nejmenší možný počet bodů jsou dva, pokud jsou všechny faktory kvantitativní, tak mohou být přidány centrální body. Centrální body nelze využít pro výpočet efektů faktorů. Na závěr centrálního kompozitního plánu se vytváří hvězdicové body. Počet těchto bodů lze určit pomocí vztahu: $n = 2k$. Hvězdicové body se používají pro určení koeficientů v úplném kvadratickém modelu a tím zvyšují přesnost výpočtu regresivních koeficientů. [22]

3.4.3 Kóování podle DoE normování

Podle plánu experimentu se jeho vyhodnocování provádí v tzv. kódovaném měřítku, kde každý z faktorů se uvažuje na dvou úrovních. Dolní úroveň se označuje hodnotou -1, horní úroveň se potom označuje hodnotou +1. Použití centrálního kompozitního plánu a takto kódované body souřadnice lze vidět na následujícím Obrázku 20. Konkrétní body jsou k dispozici v následující Tabulce 4, kde rychlové body jsou zastoupeny čísly 125; 485 a 0,065; 0,343. Body 50; 560 a 0,008; 0,4 jsou tzv. hvězdicové body. Číslo 305 a 0,204 označuje centrální bod. Součet těchto čísel tvoří celkový počet bodů centrálního kompozitního plánu. [23]

	Body	-1	-0,7071	0	0,7071	1
Faktor 1	Vc [m/min]	50	125	305	485	560
Faktor 2	fot. [mm/ot]	0,008	0,065	0,204	0,343	0,4

Tabulka 4: Parametry experimentu



Obrázek 20: Rozložení centrálního kompozitního plánu

3.4.4 Sestavení plánu experimentu

V návaznosti na předchozí kapitolu byl sestaven experiment pro zjištění statistického modelu průběhu řezné síly v závislosti na posuvu a rychlosti řezu. Jak je zmíněné v minulé kapitole, pro vyhodnocení experimentu byl zvolen centrální kompozitní plán v blokovém uspořádání. Plán sestavený pro tento experiment lze vidět v Tabulce 5. Tato tabulka představuje blok pro jeden druh materiálu experimentu. Kompletní experiment je složený ze tří druhů materiálu. Z plánu experimentu jde vidět, že každý blok se bude skládat ze čtrnácti bodů. Centrální body jsou 2, 5, 6, 8, 13, 14, a rychlové body jsou 1, 3, 4, 7 a hvězdicové body 9, 10, 11, 12. Centrální body představují kontrolu, jestli se korektně nastaven experiment. V případě bude

Měření	V_c [m/min]	f_{ot} [mm/ot]
1	560	0,204
2	50	0,204
3	305	0,204
4	305	0,204
5	305	0,4
6	305	0,008
7	305	0,204
8	125	0,343
9	305	0,204
10	485	0,343
11	305	0,204
12	485	0,065
13	125	0,065
14	305	0,204

Tabulka 5: Řezné podmínky centrálního kompozitního plánu experimentu

v těchto bodech odhaleno např. vytvoření nárůstku nebo případné otupení VBD (výrazná změna získaných dat). Na základě zkušeností a pro zvýšení vypovídající hodnoty se každý bod měření opakuje šestkrát. Pomocí takto sestaveného experimentu vyplývá, že v každém bloku je po-

třebné provést 84 měření. Celkový počet naměřených hodnot bude 252. Vzhledem k počtu měření a nezbytného přerovnání obrobené plochy mezi každými jednotlivými body a k omezení otáček stroje vyplývá celkový počet polotovarů, který bude potřeba připravit. Každý materiál lze použít třikrát až čtyřikrát, proto na provedení experimentu je potřeba 24 polotovarů od každého druhu materiálu. Vzhledem k možnému vzniku chyby při měření nebo při obsluze, případně při ulomení špičky nástroje je nutné připravit minimálně 35 kusů polotovaru pro každý druh testovaného materiálu.

3.5 Statistické vyhodnocení experimentu

V následující kapitole se věnuju statistickému vyhodnocení získaných dat z experimentu. Metody pro vyhodnocení dat budou testování hypotéz, Fisherův test, metoda ANOVA, Studentův T-test. V matematické statistice lze využít mnoho nástrojů, jako jsou například Shapiro – Wilkův test normality a podobné. [24]

Vyhodnocení bude rozděleno do jednotlivých bloků experimentu podle druhu materiálu, tím se dosáhne větší vypovídající hodnoty změřených dat. Důležitým předpokladem pro správné vyhodnocení je dodržení nezávislosti vstupních a výstupních proměnných, což v tomto případě nelze, jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách. Proto se budou modelovat řezné síly a z nich se pomocí rovnice (1) se bude vypočítávat měrný řezný odpor.

Protože v experimentu jsou použity jen dvě nezávislé proměnné, řezná rychlost v_c a posuv na otáčku f , výsledná funkce bude hledána ve tvaru: $F_c = f(v_c, f)$

Souhrn analýzy vhodnosti modelu lze vidět v Tabulce 6, pro F_c při konstantní hloubce řezu $a_p = 1$ mm. Z tabulky lze určit, že podíl variability hodnot F_c (RSquare) představuje hodnoty od 98,7475 % až do 99,6769 %. Upravený index determinace (RSquare Adj), podmiňující míru vysvětlení variability daného modelu, dosahuje hodnot 98,1908 % až 99,4749 %. Pomocí těchto hodnot lze vzhledem k hodnotě upraveného indexu determinace mluvit o tzv. funkčních modelech. Kde průměrná hodnota F_c pro materiálu CuCrZr 418,9461 N. Dále pak pro materiál EN AW 7075 to je hodnota 202,8274 N, pro materiál EN AW 6012 jde o hodnotu 172,5852 N.

RMSE (střední kvadratická odchylka) je používána jako míra rozdílu mezi hodnotami predikovanými modelem a hodnotami skutečně získanými z prostředí, jež modelujeme.

V tomto případě RMSE dosahuje pro jednotlivé materiály hodnot 25,45723, 6,397831 a 8,419683.

Analýza vhodnosti Fc pro testované materiály			
Ukazatel	CuCrZr	EN AW 7075	EN AW 6012
RSquare	0,987475	0,996769	0,991194
RSquare Adj	0,981908	0,994749	0,988552
Root Mean Square Error (RMSE)	25,45723	6,397831	8,419683
Mean of Response	418,0461	202,8274	172,5852
Observations (or Sum Wgts)	14	14	14

Tabulka 6: Analýza vhodnosti Fc pro testované materiály

Tabulky 7 a 8 popisují analýzu rozptylu (ANOVA), ze kterých je možné usoudit, že variabilita způsobená náhodnými chybami je značně menší než variabilita změřených hodnot určená modelem. Hladina významnosti dosahuje hodnot ($\text{Prob} > F$), které poukazují na průměrnost použitých modelů na základě Fisher-Snedecorova testovacího kritéria, z důvodu povahy testu. Při testování nulové statistické hypotézy, která je použita, lze vyvodit že žádný z členů modelu není závislý na hodnotě zkoumané proměnné. Při práci s hladinou významnosti 5% a dosažením hodnoty $\text{Prob} > F$, která je menší než samotná hladina významnosti, lze usoudit, že existuje alespoň jeden nenulový člen v modelu, jenž ovlivňuje hodnotu hledané proměnné.

Analýza rozptylu pro materiál CuCrZr					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	4	459836,7	114959	177,3868	<,0001
Error	9	5832,64	648		
C. Total	13	465669,4			
Analýza rozptylu pro materiál EN AW 7075					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	5	101006,6	20201,3	493,5307	<,0001
Error	8	327,46	40,9		
C. Total	13	101334			

Tabulka 7: ANOVA – analýza rozptylu Fc pro materiál CuCrZr a EN AW 7075

Analýza rozptylu pro materiál EN AW 6012					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	3	79793,07	26597,7	375,191	<,0001
Error	10	708,911	70,9		
C. Total	13	80501,98			

Tabulka 8: ANOVA – analýza rozptylu Fc pro materiál EN AW 6012

Následující testování použitých modelů se provádí testem na chyby při nedostatečném přizpůsobení modelu. Hodnotí se rozptyl reziduí a rozptyl získaných dat uvnitř skupin. Tímto se otestuje, zda byl regresivní model dobře navržen pro danou závislost. Tabulka 9 popisuje hodnoty z tohoto testu.

Chyba přizpůsobení modelu pro materiál CuCrZr					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Lack Of Fit	4	5609,168	1402,29	31,3756	0,078
Pure Error	5	223,4687	44,69		
Total Error	9	5832,637			
Chyba přizpůsobení modelu pro materiál EN AW 7075					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Lack Of Fit	3	312,577	104,192	75,0086	0,059
Pure Error	5	14,88097	2,976		
Total Error	8	327,4579			
Chyba přizpůsobení modelu pro materiál EN AW 6012					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Lack Of Fit	5	691,4676	138,294	69,6415	0,052
Pure Error	5	17,44301	3,489		
Total Error	10	708,9106			

Tabulka 9: Chyba přizpůsobení modelu

Při analýze chyby modelu bylo dosaženo hodnoty významnosti pro materiál CuCrZr 0,078 a dosažení hodnoty významnosti dalších materiálu, kde EN AW 7075 dosáhl hodnoty

0,059 a materiál EN AW 6012 dosáhl významnosti 0,052 pro F_c . Můžeme přijmout nulovou statistickou hypotézu, která vyplývá z povahy testu chyby nedostatečného přizpůsobení. Také lze usoudit, že modely dostatečně vystihují variabilitu experimentálně získaných údajů.

3.5.1 Vyhodnocení modelu pro materiál CuCrZr

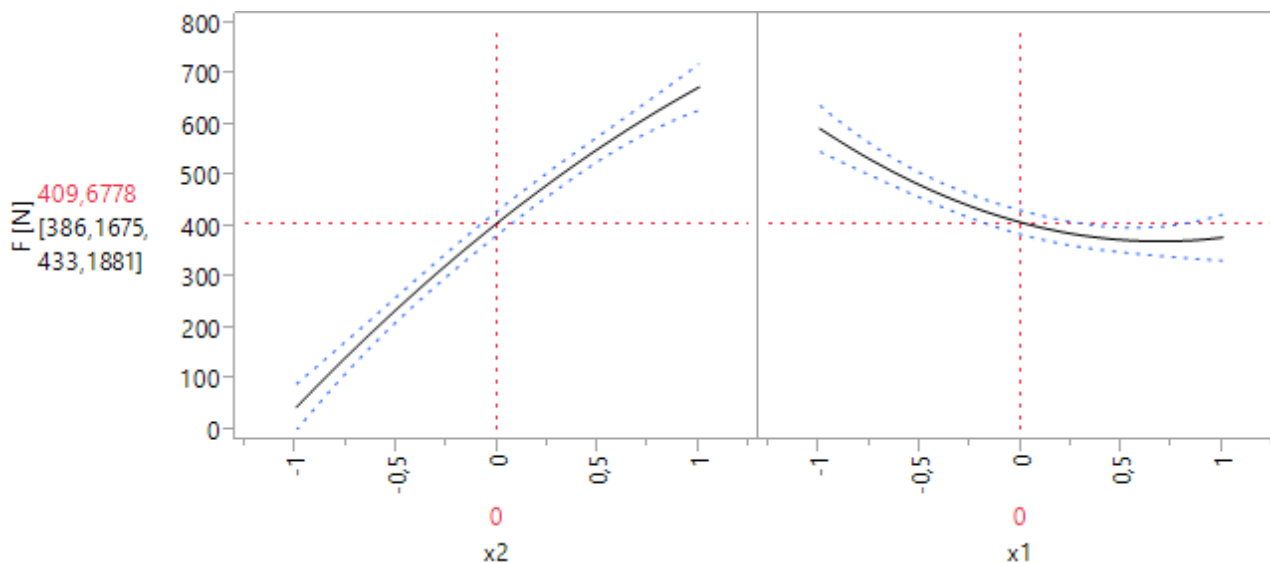
Vzhledem k potvrzení základních předpokladů kladených na model, můžeme tedy model považovat za adekvátní. Dále je vytvořena Tabulka 10 odhadu parametrů modelu. Nyní můžeme říci, že signifikantním faktorem na hladině významnosti 5 %, který ovlivňuje změnu hodnoty F_c , je posuv a rychlost posuvu a druhé mocniny těchto hodnot.

Odhad parametrů modelu F_c pro materiál CuCrZr						
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	409,6778	10,39287	39,42	<,0001	386,1675	433,1881
x_2	315,1289	12,72868	24,76	<,0001	286,3347	343,9232
x_1	-107,196	12,72868	-8,42	<,0001	-135,991	-78,402
$x_2 * x_2$	-48,4357	18,73611	-2,59	0,0294	-90,8198	-6,0517
$x_1 * x_1$	77,7251	18,73611	4,15	0,0025	35,34107	120,1091
* - signifikantní na hladině významnosti 5%, x_2 – posuv [mm/ot], x_1 – rychlost posuvu [m/min]						

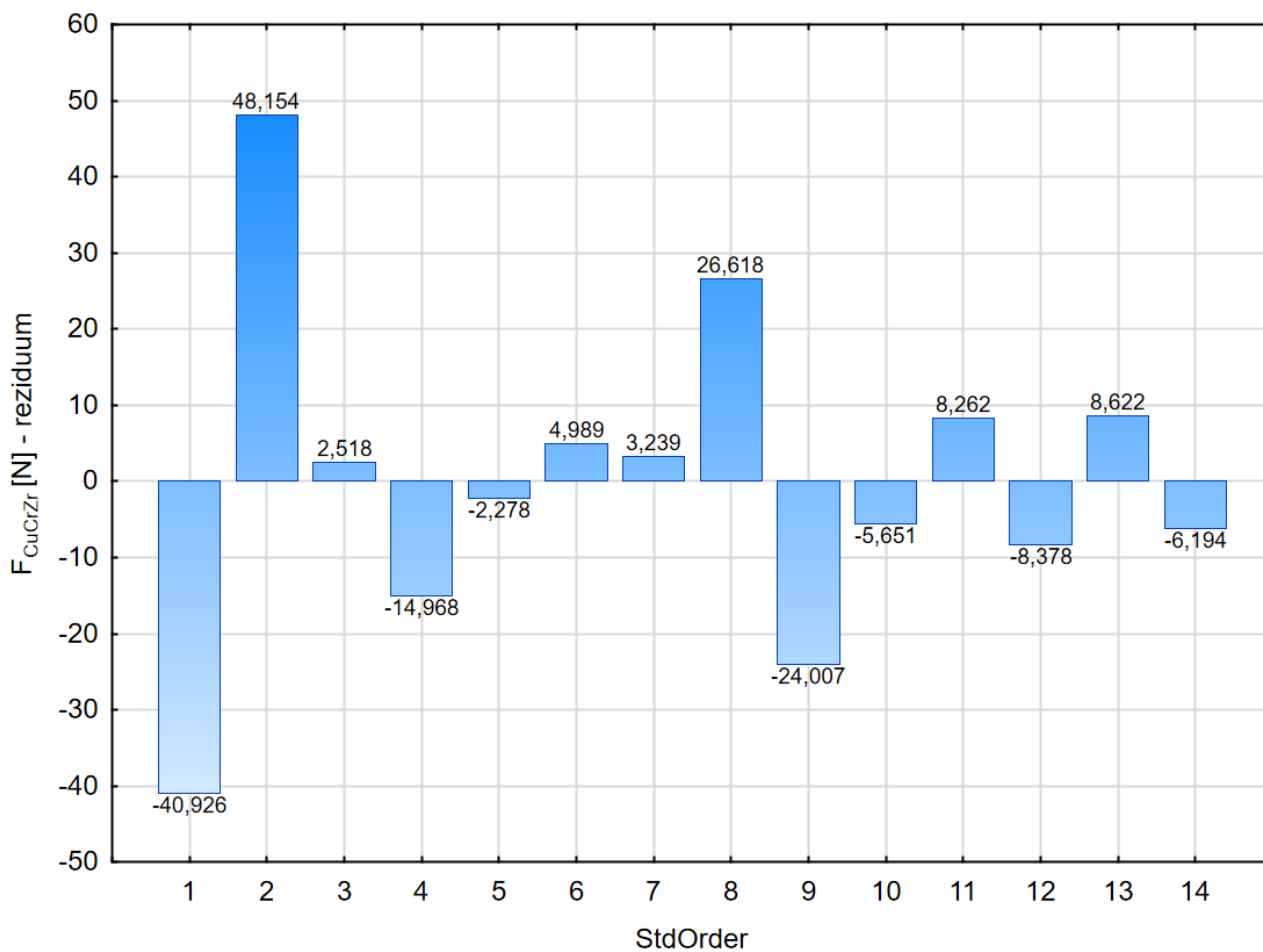
Tabulka 10: Odhad parametrů modelu F_c pro materiál CuCrZr

Dostáváme výslednou funkci závislosti řezné síly F_c na velikosti posuvu f_{ot} při změně rychlosti posuvu v_c ve tvaru:

$$\hat{F}_{CuCrZr} = -1260.821 \cdot f_{ot}^2 + 2122.216 \cdot f_{ot} + 1.195 \cdot 10^{-3} \cdot v_c^2 - 1.149 \cdot v_c + 268.625 \quad (9)$$

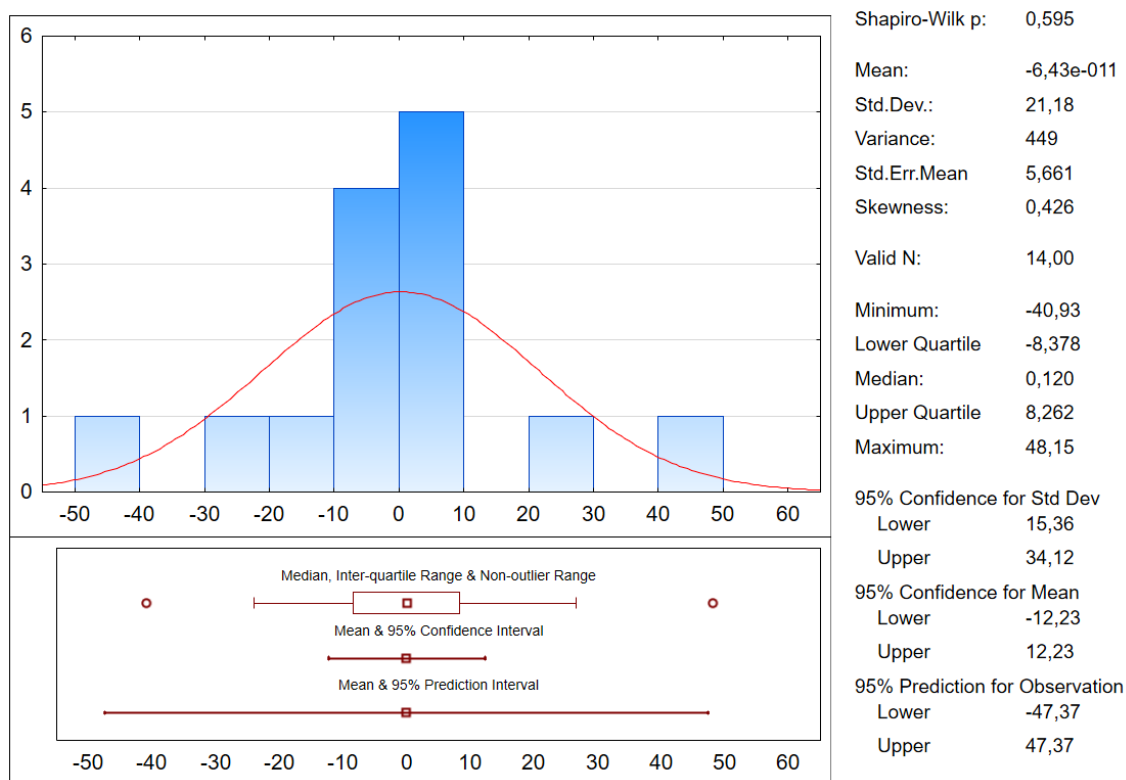


Obrázek 21: Graf F_c materiálu CuCrZr pro faktory z centrálního kompozitního plánu, kde x_1 je rychlost posuvu v_c a x_2 je posuv f_{ot}



Obrázek 22: Graf reziduí pro materiál CuCrZr

Pro dokončení vykonané analýzy a potvrzení správnosti i vhodnosti zvoleného modelu je zapotřebí ještě ověřit rezidua. To znamená vypočíst rozdíl mezi skutečně naměřenými hodnotami a hodnotami predikovanými (vypočítanými pomocí predikčního modelu). Za pomoci hodnoty z Durbin-Watsonova testu (autokorelace DW $p=0,000324$). Je možné přijmout nulovou statistickou hypotézu o neexistenci autokorelace a dosažená hladina významnosti Shapiro-Wilksova testu (viz Obrázek 23) poukazuje na Gaussovo rozdělení reziduí. Můžeme tedy zhodnotit predikční model jako statisticky a numericky korektní.



Obrázek 23: Graf Gaussovo rozdělení reziduí

3.5.2 Vyhodnocení modelu pro materiál EN AW 7075

Vzhledem k potvrzení základních předpokladů kladených na model, můžeme tedy model považovat za adekvátní. Dále je vytvořena Tabulka 11 odhadu parametrů modelu. Nyní můžeme vidět (podobně jako pro materiál CuCrZr), že signifikantním faktorem na hladině významnosti 5 %, který ovlivňuje změnu hodnoty F_c , je posuv a rychlost posuvu a druhé mocniny těchto hodnot.

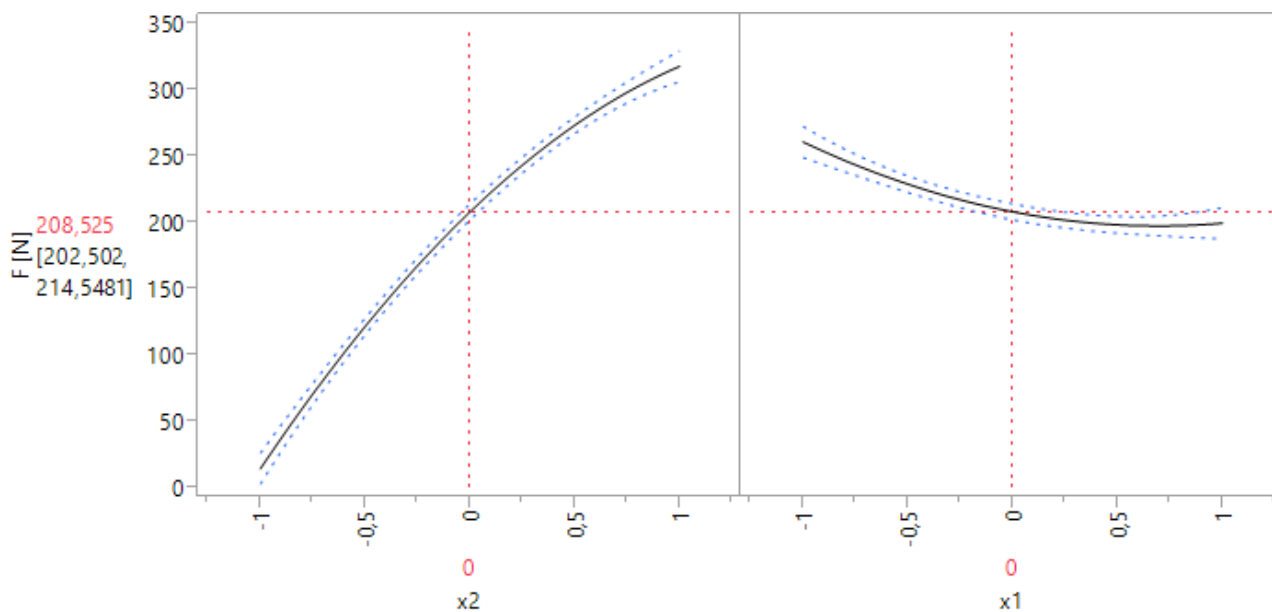
Odhad parametrů modelu Fc pro materiál EN AW 7075						
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	208,525	2,611904	79,84	<,0001	202,502	214,5481
x ₂	151,7228	3,198931	47,43	<,0001	144,3461	159,0996
x ₁	-30,6291	3,198931	-9,57	<,0001	-38,0059	-23,2524
x ₂ *x ₂	-41,9635	4,7087	-8,91	<,0001	-52,8217	-31,1052
x ₂ *x ₁	-27,2172	6,397954	-4,25	0,0028	-41,9709	-12,4635
x ₁ *x ₁	22,02154	4,7087	4,68	0,0016	11,16326	32,87982

* - signifikantní na hladině významnosti 5 %, x₂ – posuv [mm/ot], x₁ – rychlost posuvu [m/min]

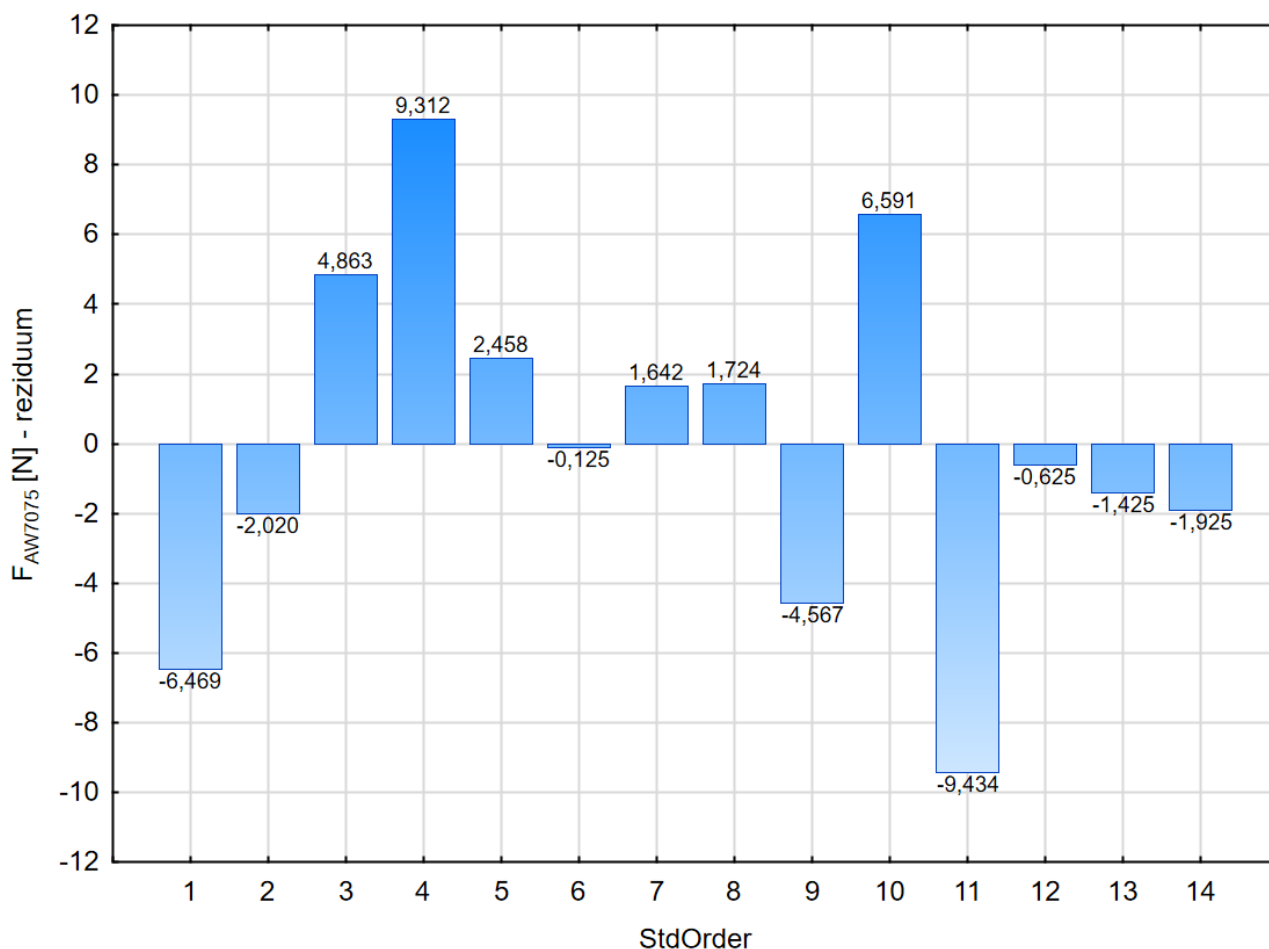
Tabulka 11: Odhad parametrů modelu Fc pro materiál EN AW 7075

Dostáváme výslednou funkci závislosti řezné síly F_c na velikosti posuvu f_{ot} při změně rychlosti posuvu v_c ve tvaru:

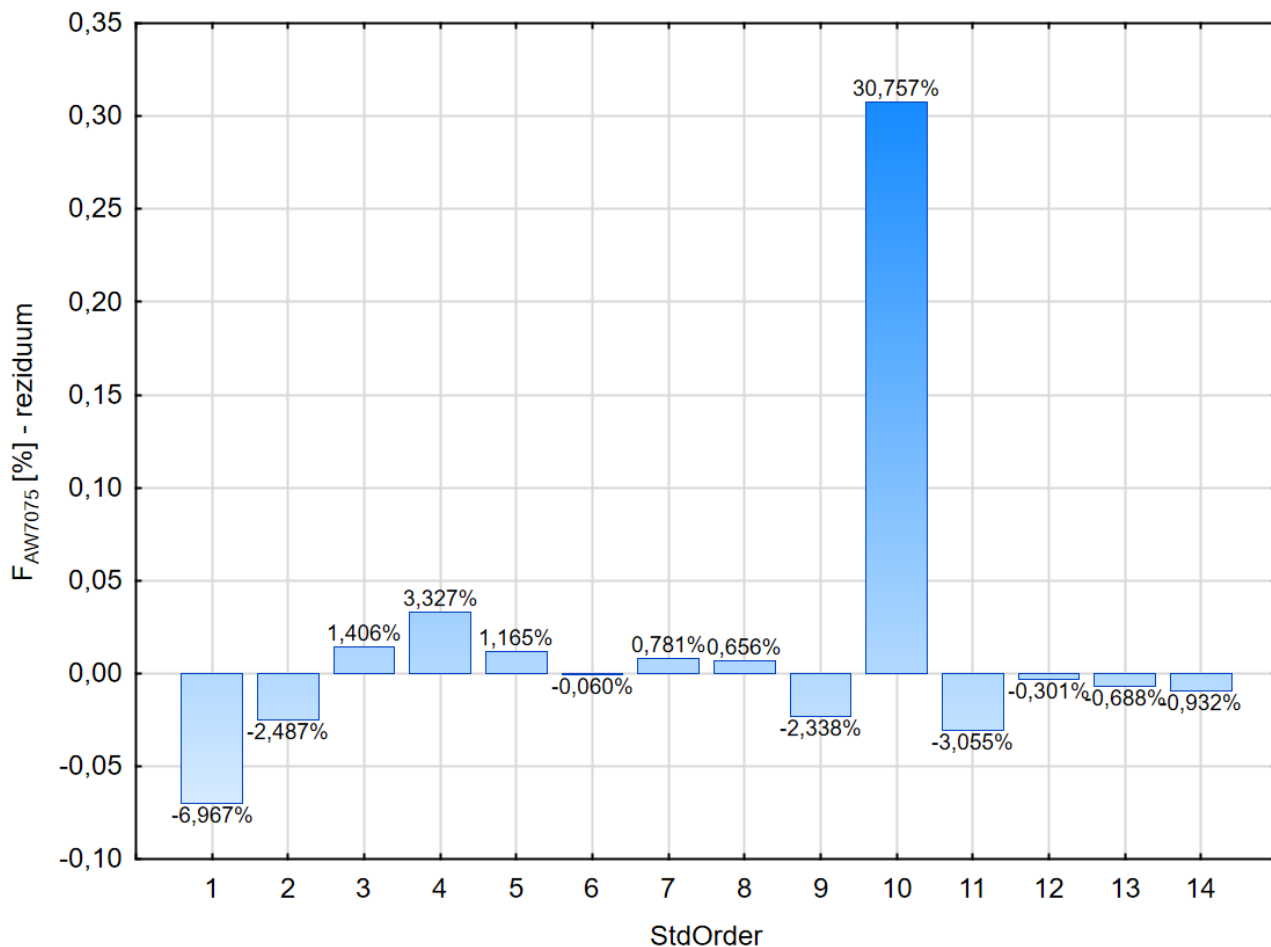
$$\hat{F}_{AW7075} = -1092.344 \cdot f_{ot}^2 - 0.545 \cdot f_{ot} \cdot v_c + 1385.864 \cdot f_{ot} + 3.386 \cdot 10^{-4} \cdot v_c^2 - 0.215 \cdot v_c + 39.407 \quad (10)$$



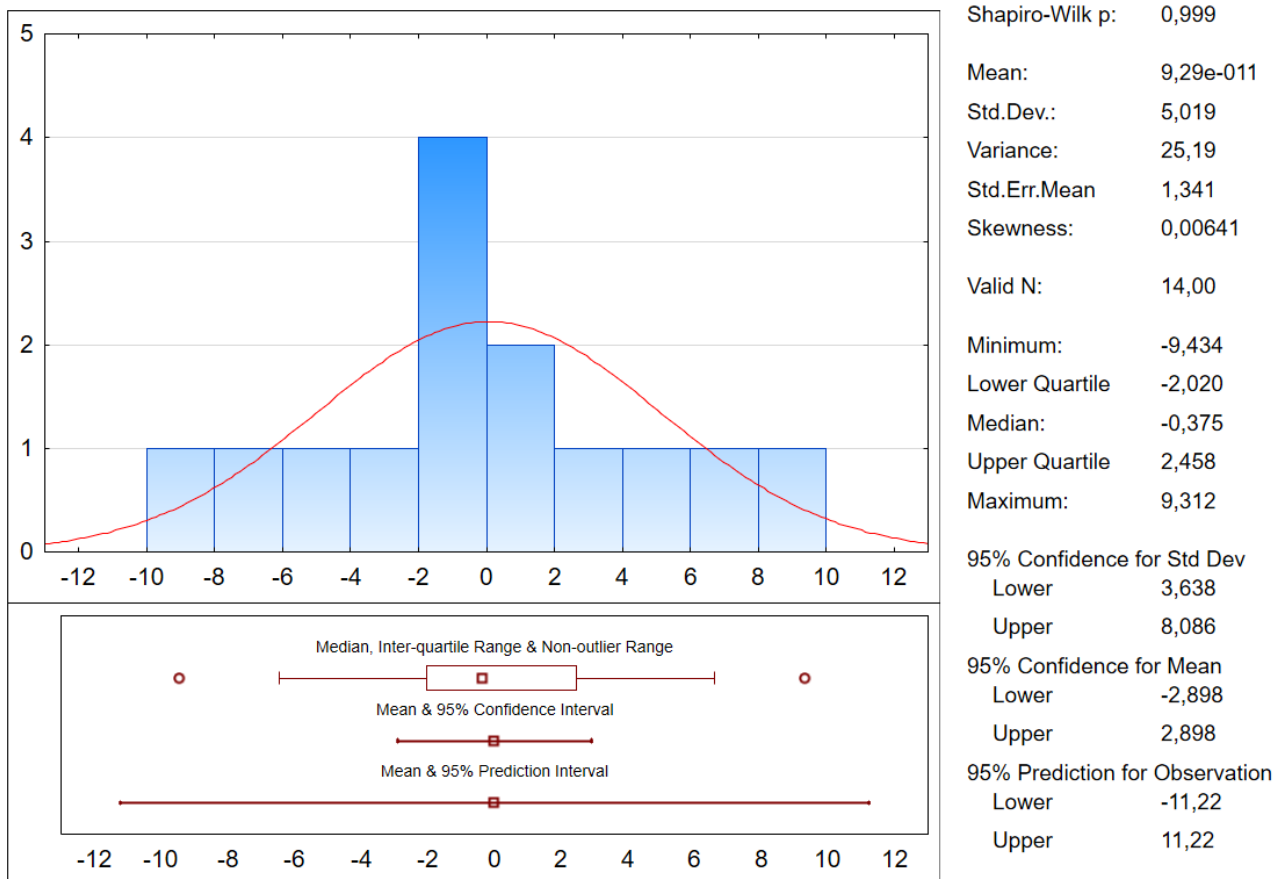
Obrázek 24: Graf Fc materiálu EN AW 7075 pro faktory z centrálního kompozitního plánu, kde x₁ je rychlost posuvu v_c a x₂ je posuv f_{ot}

**Obrázek 25: Graf reziduí pro materiál EN AW 7075**

Pro dokončení vykonané analýzy a potvrzení správnosti i vhodnosti zvoleného modelu je zapotřebí ještě ověřit rezidua. To znamená, že rozdíl mezi skutečně naměřenými hodnotami a hodnotami predikovanými, vypočítanými pomocí predikčního modelu, je z hlediska jejich rozdělení a autokorelace. Podobně jako v předchozích případech lze za pomoci hodnoty Durbin-Watsonova testu autokorelace ($DW\ p=0,028439$). Je možné přijmout nulovou statistickou hypotézu o neexistenci autokorelace a dosažená hladina významnosti Shapiro-Wilksova testu (viz Obrázek 27) poukazuje na Gaussovo rozdělení reziduí. Můžeme tedy zhodnotit predikční model jako statisticky a numericky korektní.



Obrázek 26: Graf reziduí pro materiál EN AW 7075, kde je vyjádřeno v %



Obrázek 27: Graf Gaussovo rozdělení reziduí pro materiál EN AW 7075

3.5.3 Vyhodnocení modelu pro materiál EN AW 6012

Vzhledem k potvrzení základních předpokladů kladených na model, můžeme tedy model považovat za adekvátní. Dále je vytvořena tabulka odhadů parametrů modelu (viz Tabulka 12). Nyní můžeme vidět, že signifikantním faktorem na hladině významnosti 5 %, který ovlivňuje změnu hodnoty F_c , je posuv a rychlost posuvu a druhé mocniny těchto hodnot.

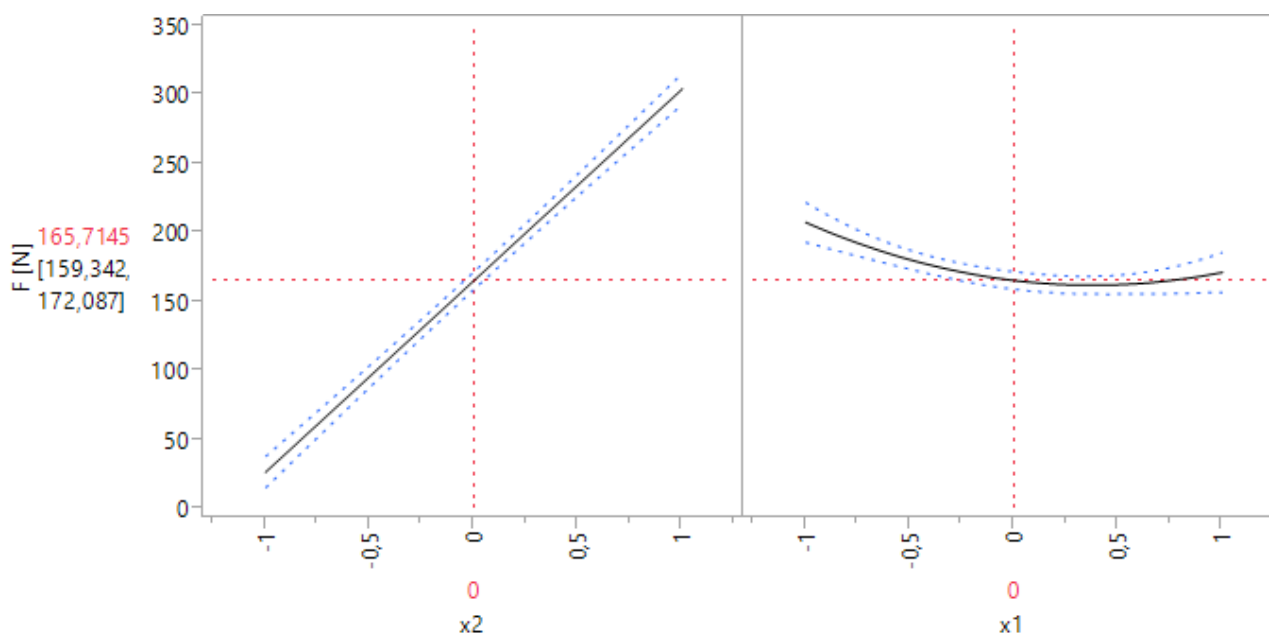
Odhad parametrů modelu F_c pro materiál EN AW 6012						
Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	165,7145	2,860018	57,94	<,0001	159,342	172,087
x_2	139,1102	4,209862	33,04	<,0001	129,73	148,4903
x_1	-18,1197	4,209862	-4,3	0,0016	-27,4999	-8,73958
$x_1 \cdot x_1$	24,0478	6,178385	3,89	0,003	10,2815	37,8141

* - signifikantní na hladině významnosti 5 %, x_2 – posuv [mm/ot], x_1 – rychlost posuvu [m/min]

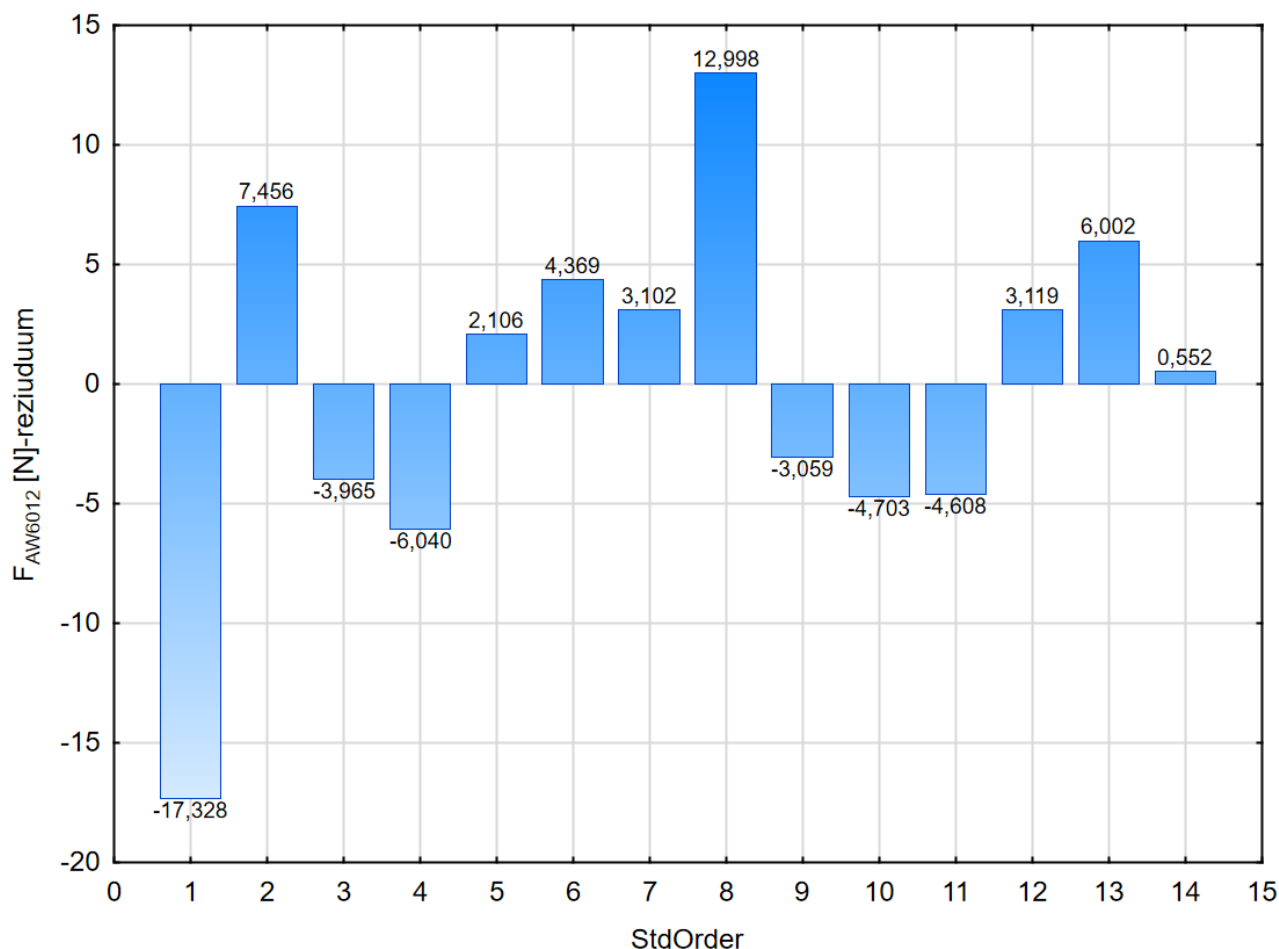
Tabulka 12: Odhad parametrů modelu F_c pro materiál EN AW 6012

Dostáváme výslednou funkci závislosti řezné síly F_c na velikosti posuvu f_{ot} při změně rychlosti posuvu v_c ve tvaru:

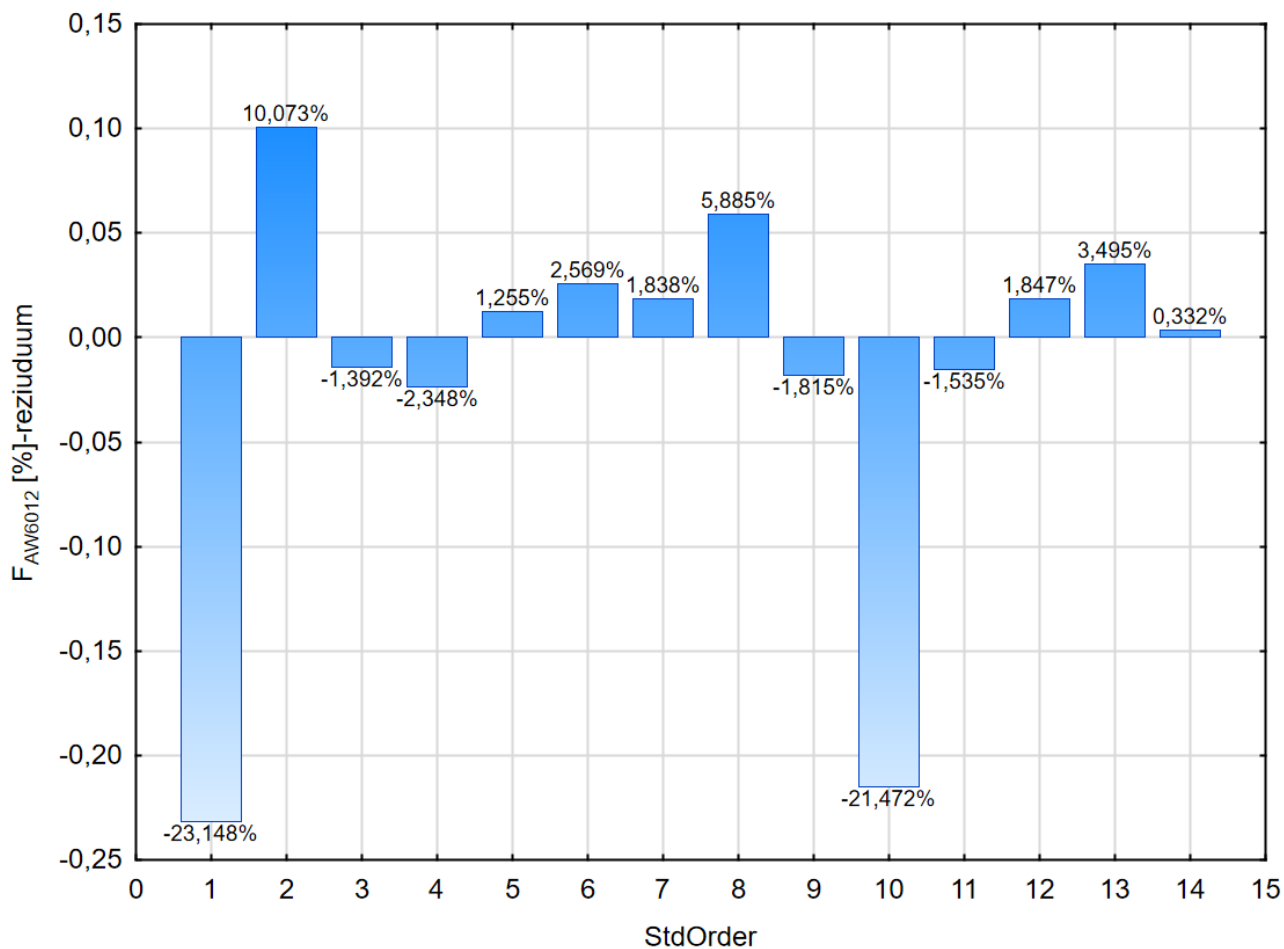
$$\hat{F}_{AW6012} = 3.698 \cdot 10^{-4} \cdot v_c^2 - 0.296 \cdot v_c + 709.746 \cdot f_{ot} + 77.002 \quad (11)$$



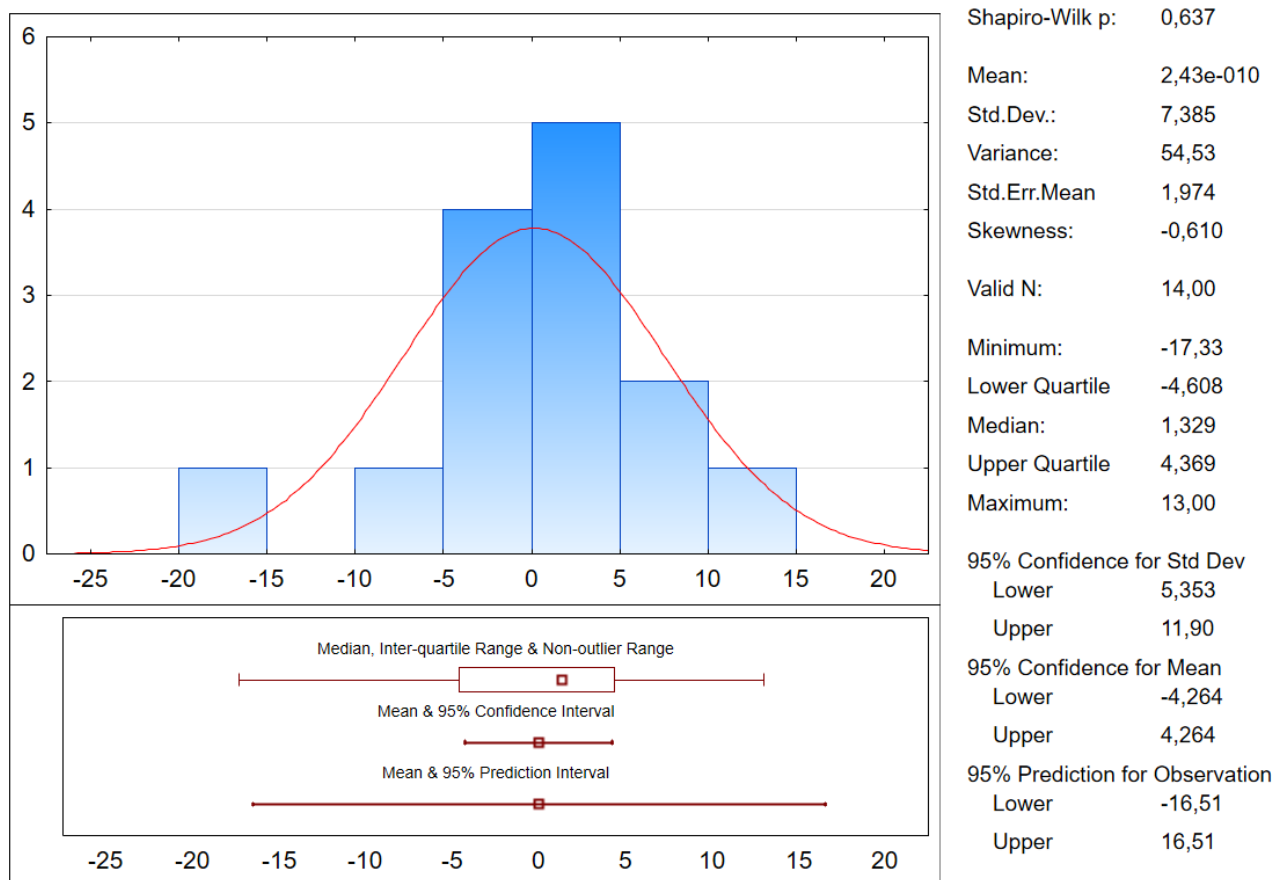
Obrázek 28: Graf F_c materiálu EN AW 6012 pro faktory z centrálního kompozitního plánu, kde x_1 je rychlost posuvu v_c a x_2 je posuv f_{ot}

**Obrázek 29: Graf reziduí pro materiál EN AW 6012**

Pro dokončení vykonané analýzy a potvrzení správnosti i vhodnosti zvoleného modelu je zapotřebí ještě ověřit rezidua. To znamená, že rozdíl mezi skutečně naměřenými hodnotami a hodnotami predikovanými, vypočítanými pomocí predikčního modelu, je z hlediska jejich rozdělení a autokorelace. Hodnotou Durbin-Watsonova testu je autokorelace $DW p=0,034735$, nyní je možné přijmout nulovou statistickou hypotézu o neexistenci autokorelace a dosažená hladina významnosti Shapiro-Wilksova testu (viz Obrázek 31) poukazuje na Gaussovo rozdělení reziduí. Můžeme tedy zhodnotit predikční model jako statisticky a numericky korektní.



Obrázek 30: Graf reziduí pro materiál EN AW 6012, vyjádřeno v %



Obrázek 31: Graf Gaussovo rozdělení reziduí pro materiál EN AW 6012

3.5.4 Validace nalezených modelů pro F_c

Správnost funkce výpočtových modelů bude ověřena pomocí validace, která bude probíhat ve dvou bodech. V prvním bodě je měření hlavní složky řezné síly pro náhodně zvolené řezné podmínky při dodržování konstantní hloubky řezu. Tento experiment pro validaci byl proveden obdobně jako v samotném hlavním experimentu. Změnou je, že se měření každého bodu nebude opakovat šestkrát, ale pouze jen jednou. Náhodně zvolené řezné podmínky se získanými hodnotami lze vidět v následující Tabulce 13.

Druhá část validace je provedení výpočtů podle nalezených modelů (rovnic 9,10,11) z kapitoly 3.5. a provedení výpočtu chyby dle následující rovnice:

$$Chyba_i = \frac{m_i v_i}{m_i} * 100 [\%] \quad (12)$$

Kde:

$m_{(i)}$... je změřená hodnota v i-tém bodě

$v_{(i)}$... je vypočítaná hodnota v i-tém bodě

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

	V_c [m/min]	f_{ot} [mm/ot]	F_c změřená [N]	F_c vypočítaná [N]	Chyba [%]	Průměrná chyba pro každý druh materiálu [%]
CuCrZr	540	0,25	385,5	448,38	16,31	7,192667597
	80	0,21	596,2	574,41	3,65	
	310	0,1	243,3	226,89	6,75	
	350	0,12	253	249,37	1,43	
	400	0,15	308,8	290,19	6,02	
	280	0,2	393,3	414,60	5,42	
	340	0,26	449,3	482,65	7,42	
	120	0,28	705,4	643,33	8,80	
	308	0,11	267,8	246,28	8,03	
	495	0,32	502,1	542,68	8,08	
Al7075	500	0,335	276,1	374,37	35,59	39,2817103
	70	0,185	234	252,97	8,11	
	290	0,135	149,5	213,70	42,94	
	280	0,245	241,5	302,48	25,25	
	270	0,385	323,7	379,00	17,08	
	260	0,04	65,85	110,30	67,51	
	250	0,315	268,6	345,74	28,72	
	110	0,215	248,9	278,04	11,71	
	330	0,125	140,2	209,94	49,74	
	425	0,06	80,46	165,88	106,15	
Al6012	530	0,1	96,96	94,97342	2,048866	5,36
	60	0,12	157,5	145,7428	7,464889	
	300	0,21	178,3	170,5307	4,357454	
	345	0,31	242,4	238,9187	1,436178	
	410	0,3	229,7	230,7292	0,448054	
	155	0,05	60,6	75,49375	24,57714	
	365	0,09	88,28	82,10575	6,993945	
	325	0,08	80,06	76,64181	4,269542	
	240	0,16	141,8	140,8218	0,689817	
	220	0,2	169,5	171,7295	1,315351	

Tabulka 13: Validace F_c experimentu

3.6 Zhodnocení výsledků experimentu

S ohledem na zadání práce, experimentální zjištění měrného řezného odporu u slitin ne-železných kovů, je nutné sestavit graf závislosti měrného řezného odporu.

Síly byly vypočítané pomocí modelů určených v předchozích kapitolách. Výpočty dílčích sil jsou k dispozici v Tabulce 15. Zvolené podmínky vyhodnocení měrného řezného odporu jsou zvoleny na základě centrálního kompozitního plánu v Tabulce 14. Vzhledem k použití nástroje s nastavením hlavního ostří 90° je tloušťka odřezávané vrstvy rovna posuvu na otáčku. To lze použít při $a_p >$ zaoblení špičky nástroje, tato podmínka je splněna. Plochy odřezávané vrstvy lze vidět v Tabulce 14.

Materiál	V_{c1} [m/min]	V_{c2} [m/min]	V_{c3} [m/min]	V_{c4} [m/min]	V_{c5} [m/min]	f [mm/ot]	S [mm ²]
CuCrZr	50	125	305	485	560	0,4	0,395824
	50	125	305	485	560	0,343	0,340126
	50	125	305	485	560	0,204	0,203232
	50	125	305	485	560	0,065	0,064971
	50	125	305	485	560	0,008	0,008
7075	50	125	305	485	560	0,4	0,395824
	50	125	305	485	560	0,343	0,340126
	50	125	305	485	560	0,204	0,203232
	50	125	305	485	560	0,065	0,064971
	50	125	305	485	560	0,008	0,008
6012	50	125	305	485	560	0,4	0,395824
	50	125	305	485	560	0,343	0,340126
	50	125	305	485	560	0,204	0,203232
	50	125	305	485	560	0,065	0,064971
	50	125	305	485	560	0,008	0,008

Tabulka 14: Podmínky pro výpočet měrného řezného odporu pomocí získaného modelu

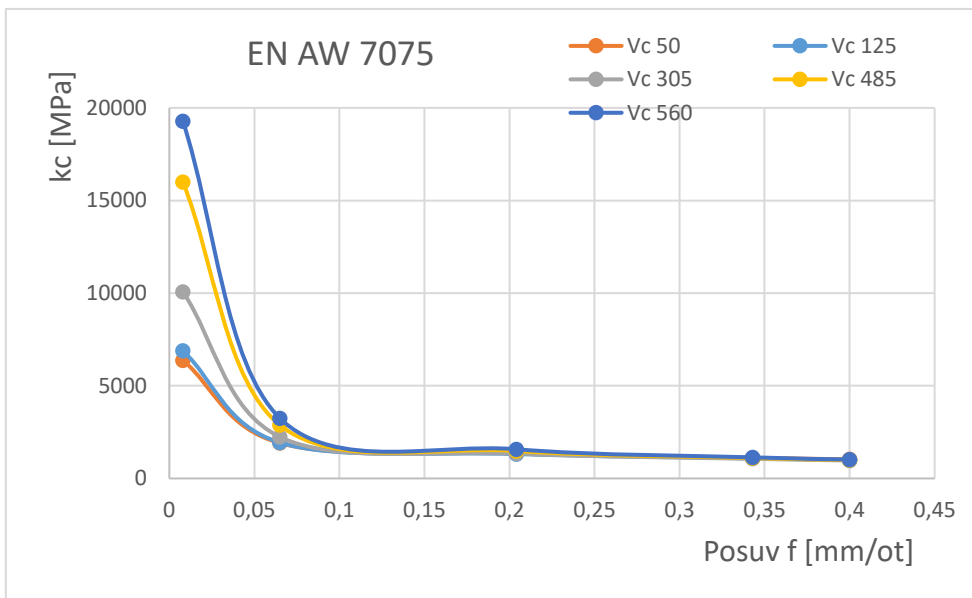
Následující Tabulka 15 ukazuje jak se mění měrný řezný odpor při změně řezných podmínek a velikosti řezných sil.

Materiál	F _{c1} [N]	F _{c2} [N]	F _{c3} [N]	F _{c4} [N]	F _{c5} [N]	K _{c1} [MPa]	K _{c2} [MPa]	K _{c3} [MPa]	K _{c4} [MPa]	K _{c5} [MPa]
CuCrZr	861,32	790,83	676,50	639,61	647,09	2176,01	1997,9 3	1709,09	1615,89	1634,80
	793,75	723,26	608,93	572,04	579,52	2333,69	2126,4 4	1790,31	1681,85	1703,85
	594,62	524,13	409,81	372,92	380,40	2925,84	2578,9 9	2016,45	1834,93	1871,75
	346,78	276,29	161,96	125,07	132,55	5337,45	4252,5 0	2492,83	1925,03	2040,20
	231,06	160,57	46,24	9,35	16,83	28882,4 4	20071, 11	5780,24	1168,86	2104,25
EN AW 7075	408,84	396,93	383,90	392,81	403,00	1032,88	1002,8 0	969,88	992,38	1018,12
	377,67	368,10	360,65	375,16	387,67	1110,39	1082,2 3	1060,36	1102,99	1139,79
	271,91	268,01	274,21	302,35	320,54	1337,92	1318,7 6	1349,24	1487,69	1577,23
	123,93	125,72	145,55	187,33	211,21	1907,53	1935,0 4	2240,27	2883,21	3250,77
	51,05	55,17	80,59	127,95	154,17	6381,35	6895,9 9	10073,8 4	15994,3 6	19270,7 1
EN AW 6012	347,02	329,68	305,02	304,33	311,11	876,72	832,89	770,60	768,84	785,98
	306,57	289,22	264,57	263,87	270,65	901,34	850,34	777,85	775,80	795,75
	207,91	190,57	165,91	165,22	172,00	1023,04	937,69	816,36	812,94	846,32
	109,26	91,91	67,26	66,56	73,34	1681,67	1414,6 9	1035,17	1024,48	1128,88
	68,80	51,46	26,80	26,11	32,89	8600,56	6432,2 6	3350,08	3263,27	4111,16

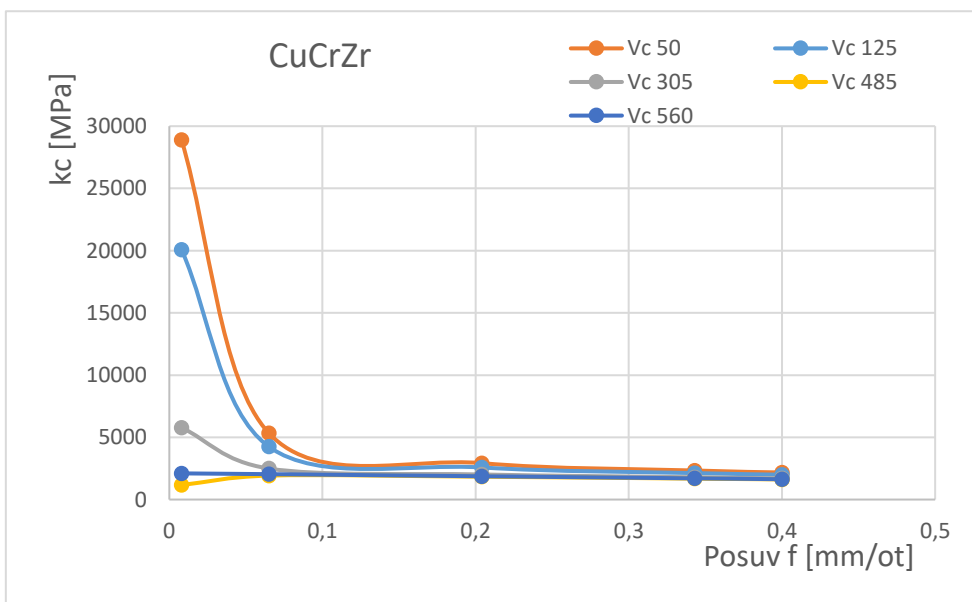
Tabulka 15: Vypočítané síly dle podmínek uvedených v Tabulce 14 a přepočet na měrný řezný odpor

Graf (viz Obrázek 32) ukazuje na závislost měrného řezného odporu materiálu EN AW 7075 při tloušťce odřezávané vrstvy $a_p=1$ mm. Potvrzuje se zde uvedená teorie z rešeršní části, kde je popsáno, že při použití vysokých rychlostí řezu a nízkých hodnot posuvů se dosáhne nejvyšších hodnot měrného řezného odporu. Tato závislost ale neplatí u materiálu CuCrZr (viz Obrázek 33), protože použitím vysokých rychlostí a nízkého posuvu se dosáhne nejmenších hodnot měrného řezného odporu. Podobně je tomu v posledním grafu (viz Obrázek 34) pro materiál EN AW 6012, lze vidět že při použití nízkých rychlostí a posuvů se získávají nejvyšší

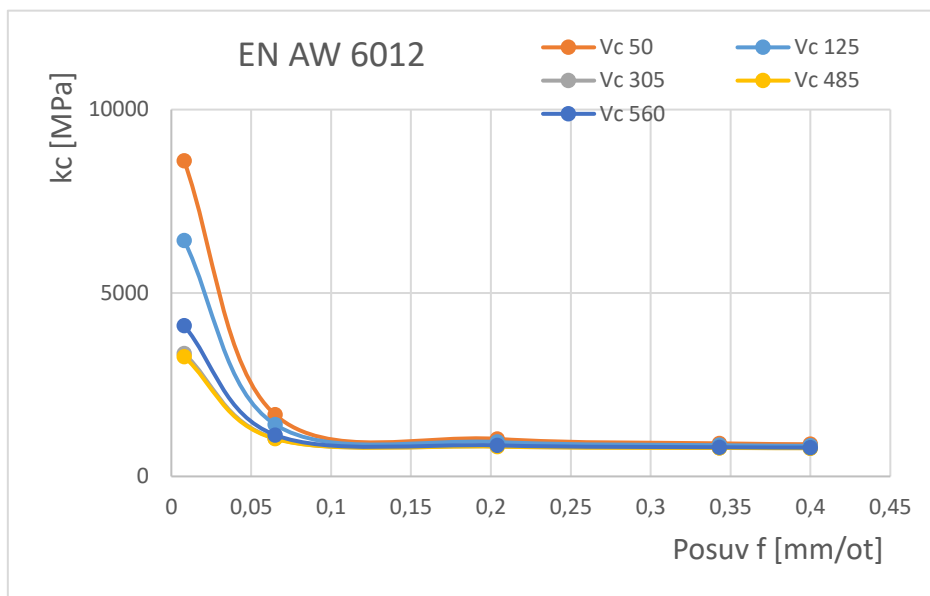
hodnoty měrného řezného odporu, kde naopak při použití vysokých rychlostí a nízkých posuvů se dosáhne menších hodnot.



Obrázek 33: Graf závislosti měrného řezného odporu pro materiál EN AW 7075 v závislosti na posuvu f a rychlosti řezu Vc



Obrázek 32: Graf závislosti měrného řezného odporu pro materiál CuCrZr v závislosti na posuvu f a rychlosti řezu Vc



Obrázek 34: Graf závislosti měrného řezného odporu pro materiál EN AW 6012 v závislosti na posuvu f a rychlosti řezu V_c

4 Závěr

Podle rešeršní části lze usoudit, že měrný řezný odpor u slitin neželezných kovů je nejméně probádanou částí těchto slitin. V této práci je popsáno, že měrný řezný odpor je závislý na tloušťce odřezávané vrstvy, protože se zvětšuje s klesající tloušťkou odřezávané vrstvy. Tato vlastnost se mění v závislosti na posuvu a tloušťce odřezávané vrstvy. Další pozorovanou vlastností je závislost vlivu posuvu na velikosti měrného řezného odporu (přičemž se zvětšujícím se posuvem klesá měrný řezný odpor). Další zkoumanou vlastností, která byla zde popsána, je vliv řezné rychlosti na měrný řezný odpor. S rostoucí řeznou rychlostí ze začátku roste měrný řezný odpor, ale po dosažení maxima začíná klesat.

Pro experiment se zvolily jednotlivé vstupní faktory k naplánování a samotné realizaci experimentu. Které měly vyvrátit nebo potvrdit tato tvrzení o závislostech. Během experimentů byly použité řezné rychlosti a tloušťky odřezávané vrstvy, které by se při normálním obrábění nepoužily. Hloubka řezu se neměnila během experimentu. Z hlediska vybavenosti a dostupnosti se experiment uskutečnil na Západočeské univerzitě v Plzni v prostorách Regionálního technického institutu. Z experimentu se při vyhodnocování získaly statistické modely pro hlavní složku řezné síly za proměnných řezných podmínkách. Ze statistického modelu byly vypočítány hodnoty měrného řezného odporu. Na závěr byla provedena validační část experimentu, kde se dokazovala přesnost získaných modelů. Z výsledků řezných sil získaných z modelu lze usoudit, že dostatečně popisuje sledované veličiny.

V Tabulce 14 jsou vidět řezné podmínky, jež se použily pro výpočet měrného řezného odporu. Podmínky byly zvoleny tak, aby odpovídaly intervalu centrálního kompozitního plánu. Průřez třísky S byl vypočítán pomocí programu Catia, a následně byl použit pro výpočet měrného řezného odporu.

Z validačního experimentu vychází pro materiál EN AW 7075 průměrná chyba přes 30 %, která podle mého názoru je způsobená špatnou komunikací mezi operátorem stroje a zvolenými hodnotami. Ostatní druhy materiálu mají velkou vypovídací hodnotu s průměrnou chybou 7 % a 5 %.

Ve vyhodnocení bylo potvrzeno, že vliv měrného řezného odporu nabývá nejvyšších hodnot při nízkých posuvech a řezných rychlostech, ale toto neplatí pro všechny testované materiály, jak lze vidět z grafů (viz Obrázek 32,33,34). Tedy dosahuje nejvyšších hodnot při minimální tloušťce odřezávané vrstvy a s jejím zvětšováním měrný řezný odpor klesá. Toto je v souladu s tím, jak je uváděno v literatuře.

Tato práce se zabývala pouze částí faktorů, které mohou ovlivnit měrný řezný odpor. Jako navazující práce by mohly následovat identifikace vlivů ostatních faktorů. Poté pomocí sjednocení modelů z těchto různých faktorů, by bylo možné vytvořit program, který by navrhoval nejvýhodnější řezné podmínky pro obrábění daných materiálů.

Seznam použité literatury

- [1] *A comprehensive dynamic cutting force model for chatter prediction in turning*. [online]. USA, 1998 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-machine-tools-and-manufacture>. International Journal of Machine Tools and Manufacture. School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 1288-47907, USA.
- [2] DOC. ING. JOSEF CHLADIL, CSc. *Přípravky a nástroje, část - obrábění*. Brno: Nakladatelství VUT Brno, 1997.
- [3] DOC. ING. BOUHUMIL VLACH, DrSc. *Technologie obrábění*. Praha: ČVUT v Praze, 1986.
- [4] S.R.O., PRAMET. *Soustružení*. Šumperk: Pramet Tools s.r.o., 2008.
- [5] M.L. [Http://mlgeardesigns.blog.cz/1503/zaklady-soustruzeni](http://mlgeardesigns.blog.cz/1503/zaklady-soustruzeni). *Základy soustružení*. 2015.
- [6] MÁDL, J.,. *Technologie obrábění, 1. díl*. Praha, 2000.
- [7] AUTORŮ, kolektiv. *Terminologie obrábění a montáže*. Ústí nad Labem: Universita J. E. Purkyně, ÚTŘV, Ústí nad Labem, 2004.
- [8] PROF. ING. FRANTIŠEK SOVA, CSc. *Technologie obrábění a montáže*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001.
- [9] BATYSTOVÁ, I. *Nože: Podklady pro cvičení z PNO*. Plzeň: ZČU v Plzni, 1992.
- [10] NETOLICKÁ, Eliška. *Parametry řezného procesu*. Praha: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, 2016.
- [11] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II. 1*. Brno: Cerm s.r.o, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [12] MACEK, Karel, Jiří JANOVEC, Petr JURČI a Petr ZUNA. *Kovové materiály. 1*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3513-1.
- [13] DIS., Bc. *Experimentální ověření závislosti měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané*. Plzeň, 2018.

- [14] SKLENIČKA, Ing. *Příspěvek k experimentálnímu stanovení modelu silového zatížení*. Plzeň: ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, 2017/2018.
- [15] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [16] Aluminium product range. *Batz + Burgel* [online]. Augsburg: Batz+Burgel GmbH, 2019 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <https://batz-burgel.com/en/metal-trading/aluminium-product-range/>
- [17] KG, Batz+Burgel. *Batz+Burgel*. Friedberg, 2019.
- [18] MICHNA, Š.,. *V. Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005.
- [19] *How It works* [online]. 2012 [cit. 2019]. Dostupné z: <https://www.howitworksdaily.com/which-aluminum-is-the-strongest/>
- [20] KME. 2017. Dostupné také z: https://www.kme.com/fileadmin/DOWNLOADCENTER/COPPER%20DIVISON/4%20Industrial%20Rolled/4_Alloys/STOL_R__95.pdf
- [21] ISCAR. *ISO TURNING*. 2020. Dostupné také z: <https://www.iscar.com/ecatalog/Family.aspx?fnum=1194&mapp=IS&app=121&GFSTYP=M>
- [22] ISCAR. 2018. Dostupné také z: <https://www.iscar.com/ecatalog/%20Item.aspx?cat=5505969&fnum=1191&mapp=IS&GFSTYP=M&srch=1>
- [23] ING. MIROSLAV GOMBÁR, PhD. *Plánovanie experimentov (DoE) ako nástroj efektívneho výskumu*. Podklady k přednáškám. Prešov, 2017.
- [24] TOŠENOVSKÝ, J. *Plánování experimentů*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2012.
- [25] HENDL, J. *Přehled statistických metod: Analýza a metanalýza dat*. Praha, 2015.
- [26] BALKRISHNA C. RAO, Yung. ScienceDirect. *A comprehensive dynamic cutting force model for chatter prediction in turning* [online]. 1998 [cit. 2019]. Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-machine-tools-and-manufacture>

- [27] SELOS. *Kovo-stroje.sk* [online]. b.r. [cit. 2019]. Dostupné z: <https://www.kovo-stroje.sk/sustruhy-emco/horizontalny-cnc-sustruh-maxxturn-25/>
- [28] *Příspěvek k experimentálnímu stanovení modelu silového zatížení šroubovitého vrtáku*. Plzeň, 2015. Disertační práce. ZČU v Plzni.
- [29] *Přípravky a nástroje, část - obrábění*. 1. Brno: VUT Brno, 1997. ISBN 80-214-0408-6.
- [30] BULÁNEK, Jiří. *Teorie třískového obrábění kovů v 3D aplikacích vytvořených v programu*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2012.
- [31] BRYCHTA, Josef,. *Technologie II - 1. díl*. 1. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2007.
- [32] MADĚRKOVÁ, Ing. SSPPOOL. *Střední škola polytechnická, Olomouc*. 2010/2011. Dostupné také z: http://ssprool.upol.cz/wordpress/wp-content/uploads/texty/ucebni_texty/texty_zamecnik/za_technologie_2.pdf
- [33] COROMANT, Sandvik. Sandvik Coromant. *Specific cutting force*. 2020. Dostupné také z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/specific-cutting-force.aspx>
- [34] PROF. ING. VLADIMÍR KROČKO, CSc. *Tvorba třísky, rezný nástroj, síly a výkon*. b.r. Dostupné také z: <https://ingslov.files.wordpress.com/2015/05/03-tvorba-trieskyreznynastrojsily-a-vykon.pdf>

Seznam příloh

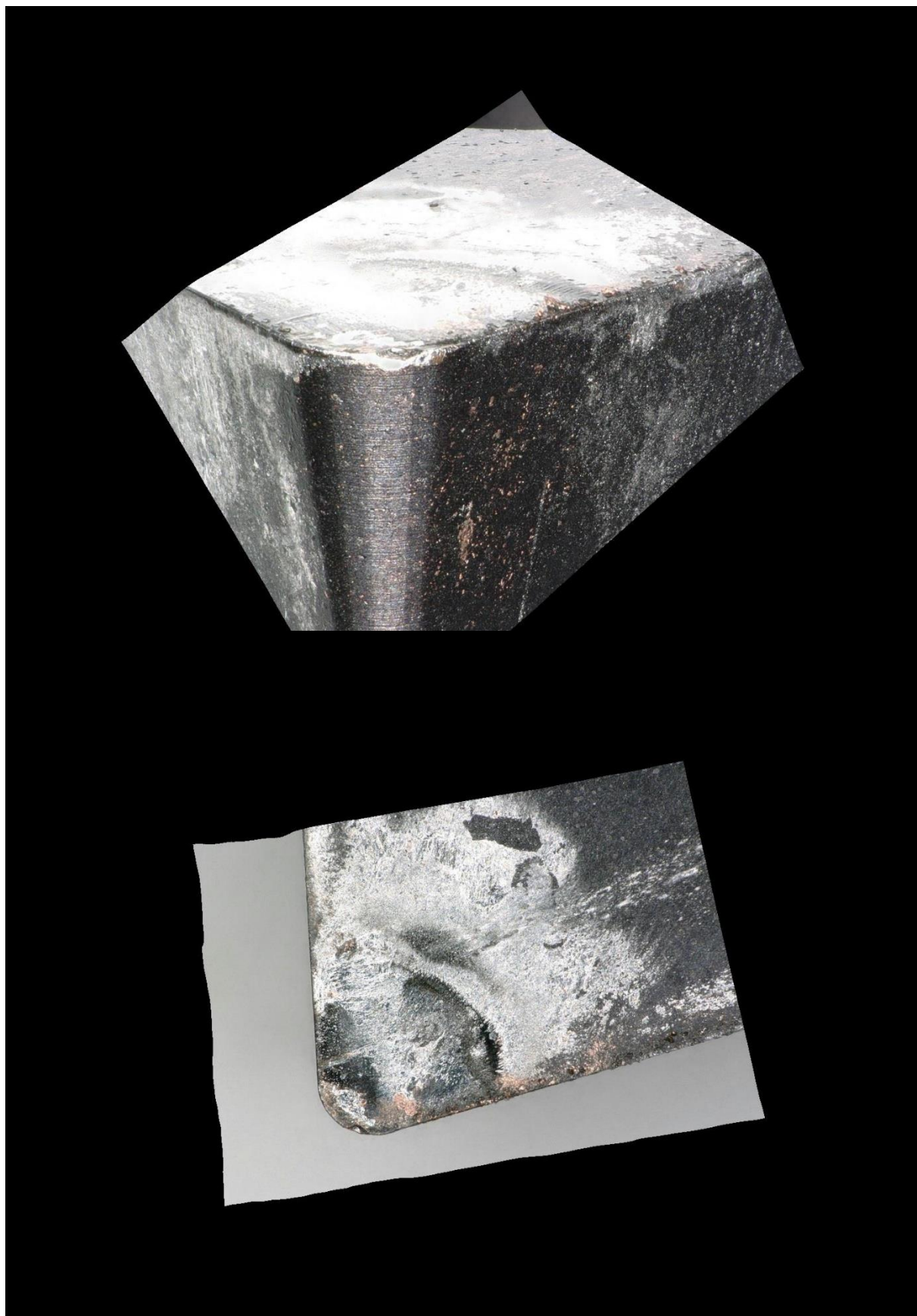
Příloha č. 1 – Stav břitových destiček po experimentu

Příloha č. 2 – Změřené řezné síly při experimentu

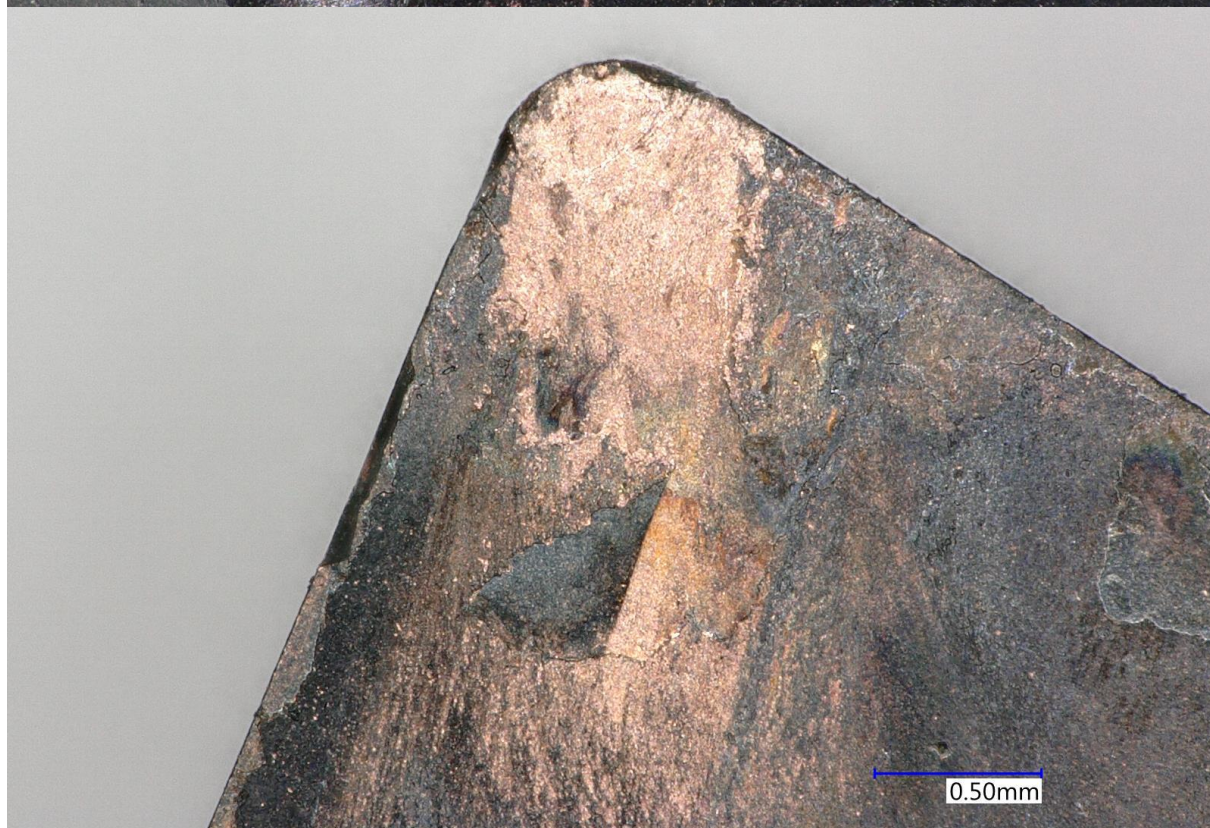
Přílohy

Příloha č.1

Stav břitových destiček po experimentu







Příloha č.2

Změřené řezné síly při experimentu

Druh materiálu	č. měření	V _c [m/min]	f _{ot} [mm/ot]	F ₁ [N]	F ₂ [N]	F ₃ [N]	F ₄ [N]	F ₅ [N]	F ₆ [N]
CuCrZr	1	560	0,204	361	354,4	356,3	351,4	360,1	354
	2	50	0,204	633,5	628,4	621,5	632,3	620	591,6
	3	305	0,204	416,9	403,1	407,5	407,4	386,1	386,8
	4	305	0,204	400,3	391,6	422,9	408,1	400,6	397,4
	5	305	0,4	693,5	703,1	703,4	673,9	665,3	668,6
	6	305	0,008	34,33	37,9	37,92	46,1	45,91	40,61
	7	305	0,204	418,7	433,3	404,7	426,9	416,9	409,3
	8	125	0,343	793,8	745,1	718,8	699,3	705,5	690,3
	9	305	0,204	412,4	403,3	406,4	407	408,2	407,1
	10	485	0,343	564,2	564	560,4	550,7	554,4	544,6
	11	305	0,204	413,4	410,5	411,4	415,9	399,3	427
	12	485	0,065	178	174,2	171,5	179,8	171,9	167,7
	13	125	0,065	246,7	229	251,4	227,9	224,1	239,1
	14	305	0,204	419,2	415,1	417,3	404,6	421,4	410,4
Al7075	1	560	0,204	199,5	191,6	197,7	191,5	200,7	191,1
	2	50	0,204	264	260,3	271,8	255,4	264	261,9
	3	305	0,204	207,6	202,8	210,4	210,4	208,7	207,5
	4	305	0,204	211,1	208,5	208,7	205,4	203,2	202,7
	5	305	0,4	324,5	306,7	306,9	306,8	303,3	304,9
	6	305	0,008	20,67	21,54	19,69	23,58	23,06	20,04
	7	305	0,204	221,4	204,7	204,7	205	205	201,8
	8	125	0,343	367,8	343,4	341,2	340,5	341,3	341,6
	9	305	0,204	226	209,3	209,5	208	207,3	205,8
	10	485	0,343	295,5	275,9	275,6	285,9	274,6	271,8
	11	305	0,204	225,3	210	209,3	206,4	206,7	203,3
	12	485	0,065	83,65	79,66	77,18	86,6	80,16	79,96
	13	125	0,065	98,68	95,25	91,69	90,27	89,23	91,99
	14	305	0,204	221,6	206,6	205,9	206,3	206,4	203,6

Druh materiálu	č. měření	Vc [m/min]	fot. [mm/ot]	F1[N]	F2[N]	F3[N]	F4[N]	F5[N]	F6[N]
Al6012	1	560	0,204	172,3	172,2	164,1	164,3	169,1	169,5
	2	50	0,204	222,3	219,6	219,5	221,1	224,6	219,6
	3	305	0,204	171,6	164,5	167,5	169,3	170,7	169,4
	4	305	0,204	163,7	165	167,6	168,2	168,7	164,4
	5	305	0,4	295,8	297,4	294,9	307,9	305,4	299,9
	6	305	0,008	19,18	18,18	22,59	21,08	26,01	24,37
	7	305	0,204	177,4	170,9	169,9	173,5	171,4	167,2
	8	125	0,343	278,2	285,8	282,2	290,9	287,7	284,9
	9	305	0,204	166,9	164,8	172,2	170,6	168,6	168,2
	10	485	0,343	255,7	254,2	259,5	257,6	255,6	260,9
	11	305	0,204	165,8	163,9	175,9	171,2	168,5	167,6
	12	485	0,065	75,2	74,67	79,1	78,51	68,32	68,3
	13	125	0,065	74,86	72,11	78,67	75,85	74,76	76,71
	14	305	0,204	165	163,9	179,5	173,4	170,1	168,6

Se změnou barvy se měnila (otáčela) VBD, která se vyměňovala podle opotřebení.