

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270011 – Obrábění, aditivní
technologie a zabezpečování kvality

Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Experimentální měření řezných sil pro zjišťování řezného odporu

Autor: Bc. Jiří KNAPP

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

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří KNAPP**
Osobní číslo: **S20N0004P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Experimentální měření řezných sil pro zjišťování řezného odporu**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu – měření řezných sil, určení velikosti řezného odporu, statistické plánování experimentu
3. Návrh a realizace experimentu
4. Vyhodnocení a validace provedených experimentů
5. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

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

Konzultant diplomové práce: **Ing. Tomáš Zatloukal**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

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

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a 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 autora

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Josefu Skleničkovi, Ph.D. a svému konzultantovi Ing. Tomáši Zatloukalovi za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.

Dále bych chtěl velmi poděkovat panu doc. Ing. Miroslavovi Gombárovi, PhD. za pomoc v oblasti návrhu experimentu a statistického modelování. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat panu Luboši Kroftovi za obsluhu stroje během experimentu.

Velký dík také patří mé rodině a přítelkyni, bez jejichž podpory bych nemohl tuto práci zpracovat.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Knapp	Jméno Jiří		
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality			
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 měření řezných sil pro zjišťování řezného odporu			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	71	TEXTOVÁ ČÁST	67	GRAFICKÁ ČÁST	4
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)	<p>Diplomová práce se zabývá experimentálním měřením řezné síly a následného stanovení řezného odporu. V rámci této práce byla vytvořena rešerše věnující se silovému zatížení procesu obrábění se zaměřením na jednotlivé faktory, které mají vliv na velikost řezné síly a velikost řezného odporu. Na základě rešerše byl navržen a následně proveden experiment. Zjištěné výsledky byly podrobeny statistické analýze a pro jednotlivé proměnné byly vytvořeny statistické modely. V závěrečné fázi práce jsou zjištěné výsledky vyhodnoceny a srovnány s vytyčenými tezemi v rešeršní části práce. Práce přináší ucelený přehled o faktorech, jenž ovlivňují velikost řezné síly a řezného odporu.</p>
ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Obrábění, soustružení, experiment, řezný odpor, měrný řezný odpor, řezná síla, řezné podmínky, měření řezné síly, statistická analýza</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Jiří	Name Knapp	
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 Machining, additive technology and quality assurance		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Sklenička, Ph.D.	Name Josef	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Experimental measurement of cutting forces to determine cutting resistance		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	71	TEXT PART	67	GRAPHICAL PART	4
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis deals with experimental measurement of cutting force and subsequent determination of cutting resistance. Within this work, a search was created dedicated to the force loading of the machining process with a focus on individual factors that affect the size of the cutting force and the size of the cutting resistance. Based on the research, an experiment was designed and subsequently performed. The obtained results were subjected to statistical analysis and statistical models were created for individual variables. In the final phase of the work, the obtained results are evaluated and compared with the set theses in the research part of the work. The work provides a comprehensive overview of the factors that affect the size of the cutting force and cutting resistance.
KEY WORDS	Machining, turning, experiment, cutting resistance, specific cutting resistance, cutting force, cutting conditions, cutting force measurement, statistical analysis

Obsah

1. Úvod.....	8
1.1 Cíle diplomové práce	8
2. Rozbor současného stavu.....	9
2.1 Proces soustružení	9
2.2 Tvorba třísky	9
2.2.1 Plastické deformace.....	10
2.3 Řezná síla	12
2.3.1 Dynamické zatížení při soustružení	12
2.3.2 Rozložení řezné síly	13
2.3.3 Faktory ovlivňující velikost řezné síly	16
2.3.4 Významné faktory ovlivňující velikost řezné síly.....	21
2.3.5 Stanovení řezných sil	21
2.4 Řezný odpor	25
2.4.1 Určení velikosti řezného odporu	27
2.4.2 Rozhodující faktory ovlivňující velikost řezného odporu.....	30
2.5 Statistické plánování experimentu	31
2.5.1 Statistické navrhování experimentů	32
2.5.2 Základní druhy experimentů	32
2.5.3 Centrální kompozitní plán	33
2.5.4 Kódování podle DoE normování.....	33
2.5.5 Nástroje sloužící k vyhodnocení experimentů	34
2.5.6 Definice nezbytných pojmů	34
3. Návrh a realizace experimentu	36
3.1 Materiál obrobku	36
3.2 Strojní vybavení pro provedení experimentu	37
3.2.1 Obráběcí stroj	37
3.2.2 Obráběcí nástroj	38
3.2.3 Vybavení pro měření	39
3.3 Plán experimentu.....	40
3.3.1 Předpoklady plánu experimentu	40
3.3.2 Faktory experimentu	40
3.3.3 Řezné podmínky pro experiment	41
3.3.4 Sestavení plánu experimentu.....	42

3.4	Realizace experimentu	43
4.	Vyhodnocení a validace provedených experimentů	45
4.1	Statistické vyhodnocení experimentu	45
4.2	Validace experimentu	49
4.2.1	Zkouška modelu pro neodpovídající řezné podmínky	51
4.3	Výpočet řezného odporu	52
4.3.1	Ověření pomocí měrného řezného odporu	56
4.4	Vyhodnocení vlivů faktorů na hlavní složku řezné síly a řezný odpor	58
4.4.1	Hlavní složka řezné síly F_c	58
4.4.2	Řezný odpor k_c	62
5.	Závěr.....	64
6.	Seznam použité literatury.....	65

Přehled použitých zkratk a symbolů

Značka veličiny, symbol, zkratka	Jednotka	Popis
A_D	[mm ²]	Průřez třísky
ANOVA	–	Analysis of variance – analýza rozptylu
a_p	[mm]	Hloubka řezu
b	[mm]	Šířka odřezávané vrstvy
C_{Fc}	[-]	Konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu
C_{Ff}	[-]	Konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu
C_{Fc}	[-]	Konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu
CNC	–	Computer Numeric Control
C_p	[-]	Konstanta
D	[mm]	Průměr obrobku
DoE	–	Design of Experiment
f	[mm/ot]	Posuv na otáčku
F	[N]	Řezná síla
F_1	[N]	Aktivní složka řezné síly
F_2	[N]	Pasivní složka řezné síly
F_B	[N]	Síla působící na brzdu
F_f	[N]	Síla posuvová/axiální
F_c	[N]	Hlavní složka řezné síly/tangenciální síla
F_n	[N]	Síla třísky
F_t	[N]	Síla tření
F_p	[N]	Síla pasivní/radiální/přísuvová
F_{OK}	[N]	Okamžitá řezná síla
G	[-]	Řezný poměr
$h(a)$	[mm]	Tloušťka odřezávané vrstvy
HB	[-]	Tvrdost dle Brinella
k_c	[MPa]	Řezný odpor
k_{c1}	[MPa]	Měrný řezný odpor
l_B	[mm]	Délka ramene [mm]
m_c	[-]	Koeficient změny řezného odporu na tloušťce třísky
M_k	[Nm]	Kroutící moment
P_{ef}	[W]	Efektivní výkon, potřebný výkon
P_e	[W]	Příkon obráběcího stroje

$P_{už}$	[W]	Efektivní/užitečný příkon stroje
P_0	[W]	Příkonu obráběcího stroje naprázdno
r_ε	[mm]	Poloměr špičky nástroje
S	[mm ²]	Průřez třísky
S-N-O-P	–	Soustava: stroj-nástroj-obrobek-přípravek
R	[N]	Deformační odpor
R_m	[MPa]	Pevnost v tahu
u	[-]	Empirická konstanta z tabulek
VBD	–	Vyměnitelná břitová destička
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
v_f	[mm/min]	Posuvová rychlost
X_{Fc}	[-]	Konstanta vyjadřující vliv hloubky řezu
X_{Ff}	[-]	Konstanta vyjadřující vliv hloubky řezu
X_{Fp}	[-]	Konstanta vyjadřující vliv hloubky řezu
y_{Fc}	[-]	Konstanta vyjadřující vliv posuvu
y_{Ff}	[-]	Konstanta vyjadřující vliv posuvu
y_{Fp}	[-]	Konstanta vyjadřující vliv posuvu
α	[°]	Úhel hřbetu, hladina významnosti
γ_o	[°]	Úhel čela v ortogonální rovině
δ_o	[°]	Úhel řezu
κ_r	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
λ_s	[°]	Úhel sklonu hlavního ostří

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Tvorba třísky [18]	9
Obrázek 2.2 Členění plastické deformace [18]	10
Obrázek 2.3 Oblast primární plastické deformace [41]	11
Obrázek 2.4 Oblast sekundární plastické deformace [41].....	11
Obrázek 2.5 Oblast terciální plastické deformace [41]	12
Obrázek 2.6 Průběh řezné síly [9]	13
Obrázek 2.7 Rovnováha sil [9].....	13
Obrázek 2.8 Aktivní a pasivní složky řezné síly [9]	13
Obrázek 2.9 Rozložení na aktivní a pasivní složku řezné síly [9]	14
Obrázek 2.10 Rozložení řezné síly [8]	15
Obrázek 2.11 Teoretický vliv poloměru špičky nástroje na poměr složek řezné síly [8]	16
Obrázek 2.12 Vliv materiálu obrobku na velikost řezné síly [12]	16
Obrázek 2.13 Vliv úhlu čela na velikost řezné síly [12]	17
Obrázek 2.14 Vliv úhlu nastavení na velikost řezné síly [9], [12].....	17
Obrázek 2.15 Vliv opotřebení břitu nástroje na velikost řezné síly [12]	18
Obrázek 2.16 Vliv posuvu na velikost řezné síly [13]	19
Obrázek 2.17 Vliv hloubky řezu na velikost řezné síly [13].....	19
Obrázek 2.18 Vliv řezné rychlosti na velikost řezné síly [12].....	20
Obrázek 2.19 Vliv štíhlostního poměru na velikost řezné síly [12].....	20
Obrázek 2.20 Schéma nepřímého měření řezné síly z momentu na vřetení stroje [12].....	23
Obrázek 2.21 Teoretická závislost elektrického náboje na působící síle [22]	24
Obrázek 2.22 Reálný průběh závislosti elektrického náboje na působící síle [22]	25
Obrázek 2.23 Piezoelektrický dynamometr pro soustružení [18]	25
Obrázek 2.24 Geometrie průřezu odřezávané vrstvy [42]	26
Obrázek 2.25 Určení koeficientu m_c [33]	27
Obrázek 2.26 Závislost řezného odporu na pevnosti v tahu [6].....	28
Obrázek 2.27 Závislost řezného odporu na posuvu [25].....	28
Obrázek 2.28 Závislost řezného odporu na řezné rychlosti [26].....	29
Obrázek 2.29 Závislost velikosti řezného odporu na úhlu čela [9]	29
Obrázek 2.30 Závislost velikosti řezného odporu na poloměru špičky [9].....	30
Obrázek 2.31 Vliv opotřebení nástroje na velikost řezného odporu [24]	30
Obrázek 2.32 Schéma experimentu podle DoE [27].....	31
Obrázek 2.33 Lineární DoE normování	33
Obrázek 2.34 Body rozvržené v centrálním kompozitním plánu [31]	34

Obrázek 3.1 Výkres polotovaru	37
Obrázek 3.2 CNC soustruh Emco MAXXTURN 25 [37]	38
Obrázek 3.3 Držák destičky SCLCL 1212F-09 [43].....	38
Obrázek 3.4 Vyměnitelná břitová destička CCMT [39]	39
Obrázek 3.5 Sestava pro měření řezných sil [37].....	39
Obrázek 3.6 Upnutí soustružnického nože do dynamometru	40
Obrázek 3.7 Nastavení rozhraní v programu DynoWare	43
Obrázek 3.8 Vyhodnocení složek řezné síly	44
Obrázek 4.1 Grafické znázornění Gaussovo normálního rozdělení pro č. měření 1	46
Obrázek 4.2 Vliv jednotlivých faktorů na změnu velikosti hlavní složky řezné síly F_c	48
Obrázek 4.3 Grafická analýza reziduí pro F_c	49
Obrázek 4.4 Rezidua pro jednotlivé body plánu experimentu pro F_c	49
Obrázek 4.5 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot F_c při validačním experimentu ..	51
Obrázek 4.6 Procentuální chyba modelu F_c pro validační experiment	52
Obrázek 4.7 Schéma úběru třísky o průřezu A_D	52
Obrázek 4.8 Vliv jednotlivých faktorů na změnu velikosti řezného odporu k_c	55
Obrázek 4.9 Grafická analýza reziduí pro k_c	55
Obrázek 4.10 Rezidua pro jednotlivé body plánu experimentu pro k_c	56
Obrázek 4.11 Zobrazení hodnot měrného řezného odporu pro jednotlivá měření.....	58
Obrázek 4.12 Závislost hlavní složky řezné síly na změně hloubky řezu při $f=0,01$ [mm/ot]	59
Obrázek 4.13 Závislost hlavní složky řezné síly na změně hloubky řezu při $f=0,20$ [mm/ot]	59
Obrázek 4.14 Závislost hlavní složky řezné síly na změně řezné rychlosti při $a_p=0,20$ [mm]	60
Obrázek 4.15 Závislost hlavní složky řezné síly na změně řezné rychlosti při $a_p=1$ [mm].....	60
Obrázek 4.16 Závislost hlavní složky řezné síly na změně posuvu při $v_c=50$ [m/min]	61
Obrázek 4.17 Závislost hlavní složky řezné síly na změně posuvu při $v_c=400$ [m/min]	61
Obrázek 4.18 Závislost řezného odporu na změně posuvu a řezné rychlosti	63
Obrázek 4.19 Závislost řezného odporu na změně řezné rychlosti a posuvu	63

Seznam tabulek

Tabulka 1: Chemické složení oceli 17 240 dle ČSN [36]	36
Tabulka 2: Základní parametry stroje Emco MAXXTURN 25 [38]	37
Tabulka 3: Rozměry kót držáku SCLCL 1212F-09 [43]	38
Tabulka 4: Rozměry kót břitové destičky [39].....	39
Tabulka 5: Navržené řezné podmínky	42
Tabulka 6: Plán experimentu.....	42
Tabulka 7: Deskriptivní statistika opakovaných měření hlavní složky řezné síly	45
Tabulka 8: Deskriptivní statistika centrálních bodů experimentu.....	46
Tabulka 9: Shrnutí vhodnosti modelu pro F_c	47
Tabulka 10: Analýza ANOVA modelu pro F_c	47
Tabulka 11: Chyba přizpůsobení modelu pro F_c	47
Tabulka 12: Odhady parametrů modelu pro F_c	48
Tabulka 13: Validáčn� experiment	50
Tabulka 14: Zkouška modelu pro neodpovídající řezné podmínky	51
Tabulka 15: Vypočtené hodnoty řezného odporu	53
Tabulka 16: Shrnutí vhodnosti modelu pro řezný odpor k_c	54
Tabulka 17: Analýza ANOVA modelu pro k_c	54
Tabulka 18: Odhad parametrů modelu pro k_c	54
Tabulka 19: Vypočtené hodnoty měrného řezného odporu	57

1. Úvod

V dnešním světě obrovské konkurence, a to i ve strojírenském průmyslu, se klade velký důraz na výrobu, která musí být rychlá, přesná, hospodárná a zároveň šetrná k životnímu prostředí. Je nezbytné stále jít s trendem vývoje a využívat moderní stroje, nástroje a používat nově nalezené technologie výroby. Přesto obrábění stále patří mezi jedny z nejvyužívanějších technologií výroby, jelikož jeho přednosti převážně tkví v dosahované přesnosti a jakosti povrchu. S nástupem moderních technologií v oblasti obrábění neboli řízení strojů pomocí počítače a s příchodem moderních nástrojových materiálů, které umožňují velké úběry a vysoké řezné rychlosti, dochází ke zvýšení produktivity při současném snížení pracnosti. To vede ke snížení nákladů na obrábění. Zmíněná inovace s sebou také přináší problémy, a to v podobě zvýšení silového namáhání obráběcí soustavy, což klade větší nároky na tuhost upnutí a na životnost vybavení.

Pro zhodnocení řezného procesu a jeho inovací z výkonnostního, kvalitativního a ekonomického hlediska je zásadní znalost velikosti a směru jednotlivých složek řezné síly a jejich závislost na parametrech řezného procesu. Dynamické silové působení na soustavu S-N-O-P má hlavní vliv na stabilitu řezného procesu, která dále vypovídá o přesnosti obrobene plochy, o kvalitě obrobeneho povrchu a také o celkové životnosti vybavení. Znalost složek sil dovoluje vytvoření analýzy výrobních postupů, technologií, volby řezných nástrojů, obráběcích strojů a řezných podmínek. Jako nejvhodnější srovnávací veličina pro zmíněné se nabízí řezný odpor, jenž pro porovnání variant poslouží lépe než složky řezné síly. Tato veličina popisuje proces obrábění z hlediska silového zatížení.

Řezný odpor udává náročnost obrábění překonáváním soudržnosti materiálu účinkem řezného procesu. Snaha je vždy docílit co největšího výkonu při určitých omezujících podmínkách. Těmito omezujícími podmínkami jsou faktory, které sice proces obrábění ovlivňují, ale nemohou být za provozu měněny. Mezi tyto faktory se řadí např. materiál obrobku, břitová destička či použití chladicí kapaliny. Velké zatížení obráběcí soustavy v praxi znamená vyšší chvění soustavy, což vede ke snížení přesnosti obrábění. Dále vysoké zatížení způsobuje nižší životnost soustavy a tím prodražuje výrobu. Z praktického hlediska je důležité, snažit se o minimalizování velikosti řezného odporu, proto je nezbytná dobrá znalost zbylých ovlivňujících faktorů, které lze při procesu měnit a je třeba znát jejich vzájemnou provázanost. Těmito faktory jsou řezné podmínky, které významně promlouvají jak do velikosti řezné síly, tak zároveň do velikosti řezného odporu.

1.1 Cíle diplomové práce

Diplomová práce si klade za cíl vytvořit ucelený teoretický základ pro porozumění problematice dynamického zatížení obráběcí soustavy při soustružení se zaměřením na faktory, které silové působení ovlivňují. Zpracovaná rešerše dále poslouží pro návrh a provedení experimentu. Naměřená data se podrobí statistické analýze, pomocí které dojde k vytvoření statistických modelů pro zjišťované závislé proměnné načež budou stanoveny jejich hodnoty. V neposlední řadě bude provedeno vyhodnocení ovlivňujících faktorů.

Cíle diplomové práce lze shrnout do následujících bodů:

- vytvoření teoretické rešerše dané problematiky;
- navrhnout a provést experiment na základě vypracované rešerše;
- nalezení statistického modelu pro řeznou sílu a následné stanovení řezného odporu pro vybranou ocel;
- ověření tabulkové hodnoty měrného řezného odporu a vztahu pro jeho výpočet;
- ověření vlivů řezných podmínek na řeznou sílu a řezný odpor.

2. Rozbor současného stavu

2.1 Proces soustružení

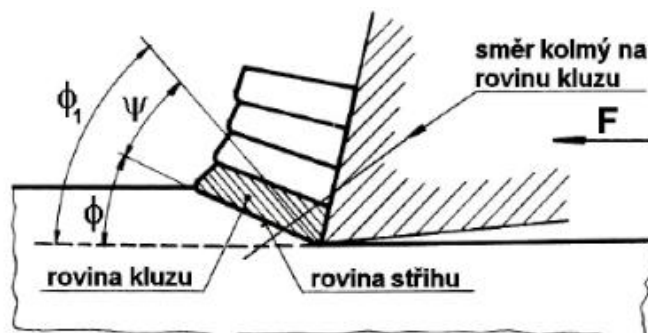
Soustružení je technologický proces, který se řadí do skupiny třískového obrábění. Jedná se o kontinuální odebírání materiálu na vnitřních nebo vnějších válcových plochách, tak aby se dosáhlo požadovaného tvaru obrobku. Během procesu řezání se ostří soustružnického nože velkou silou vtlačuje do materiálu obrobku, až dojde k rozrušivé deformaci a k oddělení třísky, kdy hlavní rotační pohyb koná obrobek a vedlejší pohyb nástroj. Celý proces se odehrává v pracovní soustavě S-N-O-P (stroj, nástroj, obrobek, přípravek). [5], [6]

Celkový průběh soustružení je velmi komplexní záležitostí, jež ovlivňuje mnoho faktorů, které v konečném důsledku mají za následek vlastnosti výsledného obrobku. Proto je velmi důležité dokázat předem předpovědět, jak se pracovní soustava bude během výroby chovat, tak aby bylo možné dosáhnout požadovaného výsledku. Jako jednu z vícero souhrnných veličin, která určitým způsobem charakterizuje náročnost celého průběhu obrábění, lze uvést řezný odpor, jež vyplývá z velikosti řezné síly a průřezu třísky. [5], [6]

2.2 Tvorba třísky

Jedním z hlavních doprovodných procesů obrábění je tvorba třísky, která se nejen na celém procesu obrábění značně projevuje, ale má zásadní vliv na velikost řezné síly a tím pádem i na velikost řezného odporu, čemuž se bude detailněji věnovat následující kapitola. Nejen proto byl teoretický rozbor třísky a deformačních zón zahrnut do této práce. S ohledem na skutečnost experimentálního zkoumání řezného odporu při obrábění oceli je předpoklad, že bude vznikat tvářená tříska. Zkoumání tvorby třísky zpravidla probíhá při tzv. volném ortogonálním řezání, které se charakterizuje tím, že hlavní ostří nástroje je kolmé na vektor řezné rychlosti, kdy vznikající tříska je na bocích volná a délka ostří je větší než šířka odřezávaného materiálu. [5], [6]

Proces obrábění vychází z principu vnikání břitu nástroje do obrobku. V důsledku řezné síly se před a pod břitem koncentruje napětí, což má za následek veliké namáhání a zároveň vznik pružné, ale také i plastické deformace materiálu odřezávané vrstvy obrobku. Stálým působením síly narůstá smykové napětí, až nastane plastická deformace materiálu před břitem nástroje. Pokračujícím pohybem nástroje dochází k růstu plastické deformace, k posunu a pěchování vrstev materiálu ve směru kolmém ke kluzné rovině, což způsobí nemožnost další plastické deformace materiálu v mikroobjemu. Následkem pokračujícího pohybu nástroje vzrůstá napětí v materiálu, až překoná velikost stříhové meze pevnosti obráběného materiálu a nastane odstřížení části třísky v rovině stříhu. Z oddělených částí, jež se na čele řezného nástroje pěchují, vznikne následná tříska, která dále odchází z místa řezu. [5], [6], [14], [18]

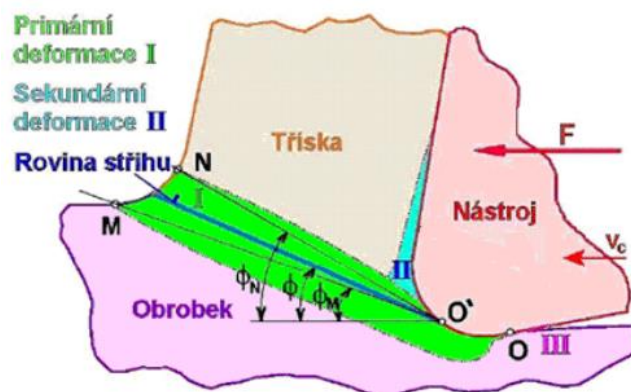


Obrázek 2.1 Tvorba třísky [18]

2.2.1 Plastické deformace

Jak již bylo uvedeno výše, během obrábění dochází nejprve k elastickým deformacím, následně k plastickým, a nakonec, po překročení meze pevnosti obráběného materiálu, nastávají deformace rozrušivé. Plastické deformace probíhají ve třech oblastech, a to před břitem, v povrchových vrstvách styčné plochy třísky s čelem nástroje a v povrchové vrstvě obrobené plochy. Zmíněnou oblast vymezují experimentálně stanovené body OMNO', jenž se povětšinou zjednodušuje jen na oblast OMNO. Tvar a velikost této oblasti je proměnlivý v závislosti na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, a to převážně podle deformační a zpevňovací schopnosti. Zároveň mají vliv i další faktory jako je např. řezná rychlost či geometrie břitu. Plastické deformace podle oblastí vzniku se dělí následovně: [6], [18]

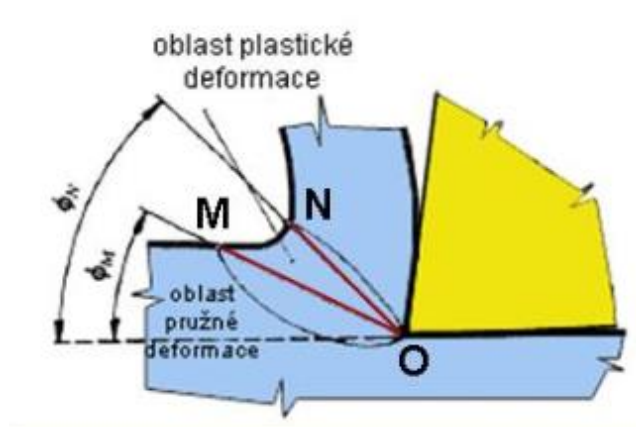
- I. oblast primární plastické deformace
- II. oblast sekundární plastické deformace
- III. oblast terciální plastické deformace



Obrázek 2.2 Členění plastické deformace [18]

I. oblast primární plastické deformace

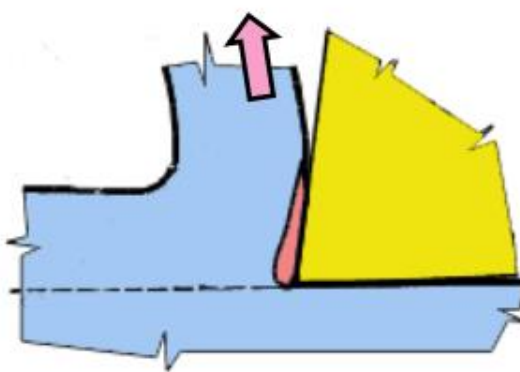
Hranice této oblasti vymezují křivky OM a ON, viz zjednodušený Obrázek 2.3. V této oblasti vlivem působení řezné síly neboli vlivem napjatosti dochází ke zpevňování materiálu obrobku a po vyčerpání plasticity materiálu dojde ke vzniku kluzných rovin a ke kluzu uvnitř materiálu. Největší intenzita plastické deformace se nachází u ostří břitu, a také zde nastane největší zpevnění materiálu, což má za následek, že v této oblasti primární plastické deformace vzniká velká část řezného odporu, jenž se projevuje v závislosti na tloušťce odřezávané vrstvy. Zmíněnou oblast převážně ovlivňují vlastnosti materiálu (pevnost, houževnatost, tvrdost, schopnost zpevňování), geometrie břitu (úhel čela, poloměr zaoblení ostří), řezné podmínky a řezné prostředí, kdy změny těchto faktorů mají za následek změny rozměrů průřezu odebírané vrstvy materiálu, změnu krystalické struktury a změnu zpevnění vzniklé třísky. [6]



Obrázek 2.3 Oblast primární plastické deformace [41]

II. oblast sekundární plastické deformace

V této oblasti již je vzniklá tříska primární deformací, která dále odchází po čele řezného nástroje, kde dochází k intenzivnímu tření vlivem překonávání povrchových nerovností a adhezních sil na úrovni svarů za studena, tak jak nastiňuje Obrázek 2.4. Projev zmíněného působí pouze u čela nástroje, kde vzniká váznoucí vrstva třísky, která se postupně zpevňuje, kdy za velikého intenzivního tření může dojít až ke vzniku nárůstku na břitu. Vytvoření nárůstku lze považovat za nežádoucí stav, jelikož způsobuje změnu geometrie nástroje, zhoršuje kvalitu obrobené plochy. Nestabilita nárůstku téměř vždy způsobuje rozkmitání soustavy S-N-O-P, což má v konečném důsledku značný vliv na velikost řezné síly, respektive na řezný odpor. V dotykové ploše mezi třískou a čelem břitu dochází k extrémním podmínkám, teplota třísky se pohybuje řádově ve stovkách °C a tlak zde dosahuje až hodnoty 10^4 MPa. Zbylá velká část objemu třísky již plastické deformaci nepodléhá. [6]

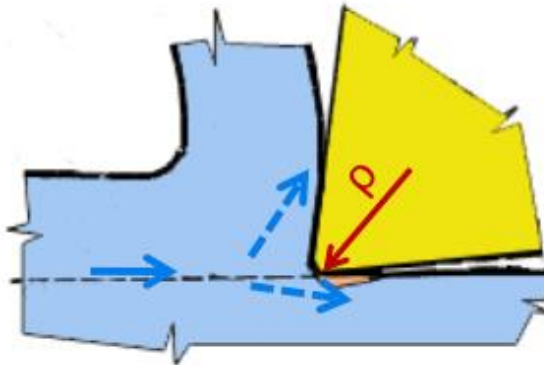


Obrázek 2.4 Oblast sekundární plastické deformace [41]

III. oblast terciální plastické deformace

Oblast terciální plastické deformace se nachází v odřezávané vrstvě a na povrchu obrobené vrstvy. Příčinu zmíněného způsobuje zaoblený tvar ostří nástroje, a také to, že oblast OMNO' zasahuje až pod rovinu řezu, jak si lze povšimnout z Obrázku 2.2 a Obrázku 2.5. Žádné ostří nástroje nemá dokonale ostrou hranu. Ve skutečnosti se vždy jedná o válcovou plochu o poloměru v řádech mikrometrů. Proto dochází k částečnému zatlačování materiálu pod břit nástroje a dochází jak k plastické, tak i k pružné deformaci této vrstvy, jenž se nazývá neodříznutá tloušťka odřezávané vrstvy. Teplota v této oblasti nedosahuje děje rekrytalizace, a proto zde po plastické deformaci povrchové vrstvy zůstávají zbytková pnutí, což má za následek zpevnění povrchové vrstvy. Velikost zpevnění ovlivňují vlastnosti obráběného

materiálu, řezné podmínky a geometrie břitu. Ono zpevnění způsobuje např. vyšší tvrdost či vyšší odolnost proti korozi povrchové vrstvy obrobené plochy. [6], [7]



Obrázek 2.5 Oblast terciální plastické deformace [41]

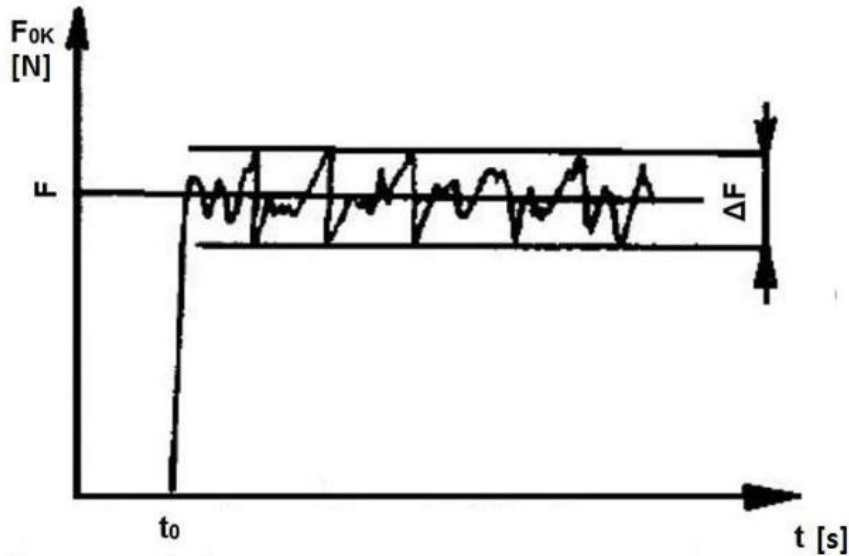
2.3 Řezná síla

Řeznou sílu lze charakterizovat jako sílu, jejímž následkem dochází k oddělování materiálu obrobku v podobě třísky. Její vznik zapříčiňuje vtlačování břitu nástroje do obrobku a je nezbytnou součástí procesu obrábění. [5]

2.3.1 Dynamické zatížení při soustružení

Průběh řezání je velmi složitý dynamický proces, jenž probíhá v důsledku síly, která vtlačuje břit řezného nástroje do materiálu obrobku, čímž dojde k oddělení materiálu ve formě třísky. Působení břitu nástroje neboli řezného klínu, způsobí v obrobeném materiálu stav napjatosti, jenž se pojí s elastickými a plastickými deformacemi a zároveň silovými poměry, které v daném systému působí tak, jak již bylo popsáno v předchozí kapitole. Zmíněné silové poměry jsou zvláště důležité pro zjištění mechanického namáhání soustavy S-N-O-P, kdy se hlavně jedná o stabilitu řezného prostředí, jenž plyne z pevnosti a tuhosti soustavy. Dále silové poměry mohou sloužit k hodnocení obrobitelnosti materiálu, trvanlivosti a životnosti nástrojů nebo vlivu na integritu obrobeného povrchu. [5], [8],[16]

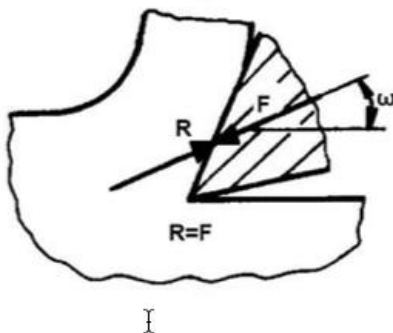
Silové poměry lze charakterizovat dvěma silami, a to silou třísky F_n , která působí kolmo na čelo nástroje a silou tření F_t působící na kontaktní ploše nástroje s třískou. Tyto dvě složky síly lze složit do jediné, a to výsledné síly řezání F . Pro proces obrábění se jedná o důležitou veličinu, jenž je v čase proměnlivá. K proměnlivosti dochází i při konstantních řezných podmínkách, takže její okamžitá hodnota F_{OK} kolísá v závislosti na čase. Zmíněné kolísání okamžité řezné síly se může pohybovat až kolem $\pm 20\%$. Pro názornější představu je uveden Obrázek 2.6, kdy v čase t_0 dojde k záběru břitu nástroje a následně řezná síla kolísá kolem své střední hodnoty. ΔF značí rozptyl okamžité řezné síly v závislosti na čase. Průběh síly je nejčastěji způsoben rozptylem mechanických vlastností obrobeného materiálu, drsností obrobené plochy či mechanikou tvorby třísky. K extrémním výkyvům dochází při odebrání nerovnoměrné hloubky třísky. [8], [10], [16]



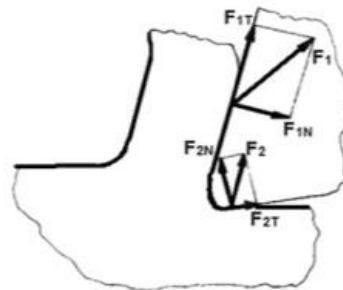
Obrázek 2.6 Průběh řezné síly [9]

Jak již bylo uvedeno výše, výsledná síla řezání F způsobuje v materiálu obrobku stav napjatosti, kdy tento stav napjatosti má za následek vznik deformačního odporu R . Deformační odpor lze snadno definovat jako silové působení materiálu proti oddělení třísky na nástroj, který síla řezání musí při průběhu obrábění neustále překonávat. Jedná se o reakci na akční sílu řezání, což vyplývá z podmínky rovnováhy (Obrázek 2.7): [8], [10]

$$F=R \text{ [N]}$$



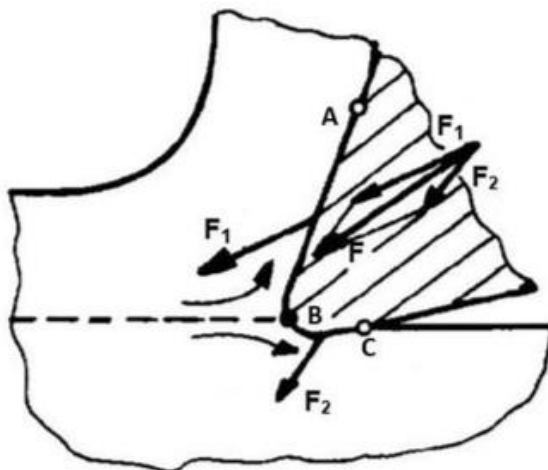
Obrázek 2.7 Rovnováha sil [9]



Obrázek 2.8 Aktivní a pasivní složky řezné síly [9]

2.3.2 Rozložení řezné síly

Při průběhu obrábění působí síly jak tlakové, tak smykové, jenž účinkují v rozdílných směrech. To má za následek, že řezná síla se rozkládá do dalších složek, pomocí kterých lze zjistit směr a velikost celkového silového působení, viz Obrázek 2.8. Výsledná řezná síla F se podle hlavního a vedlejšího řezného pohybu rozkládá na dvě složky. Na aktivní složku síly F_1 , jenž se přímo podílí na tvorbě a odvedení třísky z místa řezu a působí na čele nástroje. Druhou je pasivní složka síly F_2 , která proces zákonitě doprovází a vzniká na hřbetě nástroje. Nastíněný rozklad je názorně ukázán na následujícím Obrázku 2.9. [8], [10]

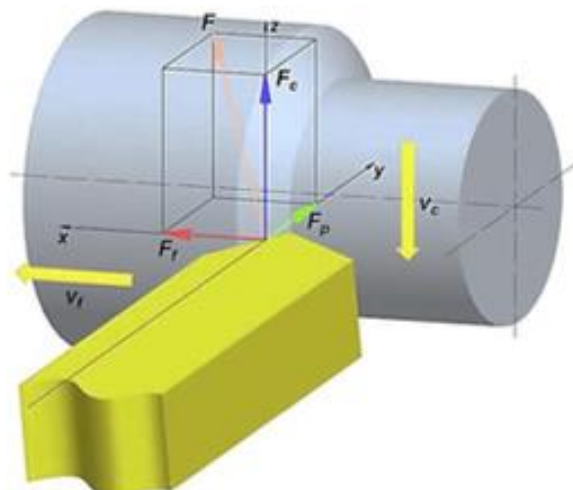


Obrázek 2.9 Rozložení na aktivní a pasivní složku řezné síly [9]

S ohledem na náročnost výpočtu i měření těchto sil a zároveň s ohledem na vykonané pohyby při řezání je výhodnější promítnout tyto síly do tří os, jež jsou na sebe vzájemně kolmé. Proto se dále aktivní složka rozkládá na hlavní řeznou složku síly F_c a posuvovou složku síly F_f . Do svislé osy z , jež je hlavním směrem řezného pohybu, se promítá síla F_c , která se často označuje jako tangenciální složka síly. Síla F_c je ze všech tří složek nejvýznamnější, a také největší a slouží jako základ pro stanovení omezujících podmínek při volbě řezných parametrů. Její velikost vyplývá z velké části z kontaktu a velikosti tření mezi obrobkem a nástrojem, mezi třískou a čelem nástroje, utvářením a druhem lámání třísky. Znalost hodnoty této složky se využívá při výpočtu potřebného výkonu elektromotoru, kroutícího momentu, řezného odporu či pro výpočet celkového množství tepla, jež se vytvoří v oblasti řezu. [8], [10], [11]

Druhou složkou je posuvová neboli axiální složka síly F_f , jež leží ve směru osy x , která odpovídá směru vektoru posuvové rychlosti v_f . Její hodnota se běžně rovná 40-50 % velikosti hlavní řezné složky F_c . Její účinky jsou ve směru největší tuhosti obráběcí soustavy a uplatňuje se při dimenzování posuvových mechanismů. [8], [10], [11]

Třetí složkou je již zmíněná pasivní síla F_p , která se také označuje jako radiální či síla přisuvu podle svého směru působení. Tato složka leží na ose y a způsobuje vtlačování nástroje do materiálu, kdy jejím následkem může dojít až k průhybu obráběných součástí. Běžná hodnota velikosti se přibližně pohybuje kolem 25 % velikosti hlavní složky řezné síly F_c , kdy její účinnost se projevuje ve směru nejmenší tuhosti obráběcí soustavy, čímž způsobuje chvění a nepřesnosti při procesu obrábění. Zvláště se podílí na rozměrových a geometrických odchylkách a zhoršuje drsnost obrobeného povrchu. Následující Obrázek 2.10 názorně nastiňuje výše uvedené. [8], [10], [11]



Obrázek 2.10 Rozložení řezné síly [8]

Zmíněné tři složky celkové řezné síly jsou na sebe vzájemně kolmé, kdy pro ně platí následující vztah: [6]

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [\text{N}] \quad (1)$$

kde: F_c – hlavní řezná složka síly [N]

F_f – posuvová složka síly [N]

F_p – pasivní složka síly [N]

Teoretické a experimentální znalosti umožňují každou složku spočítat zvlášť, a to např. na základě empirických vztahů, kdy pro podélné soustružení válcové plochy se uvádějí následující mocninové vztahy: [6]

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad [\text{N}] \quad (4)$$

Kde: C_{Fc} , C_{Ff} , C_{Fp} – konstanty vyjadřující vliv obráběného materiálu [-]

x_{Fc} , x_{Ff} , x_{Fp} – exponenty vyjadřující vliv hloubky řezu [-]

y_{Fc} , y_{Ff} , y_{Fp} – exponenty vyjadřující vliv posuvu [-]

a_p – hloubka řezu [mm]

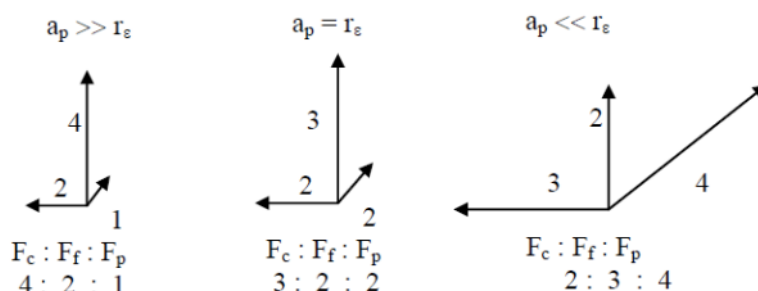
f – posuv na otáčku [mm/ot]

Velikosti složek řezné síly zvláště ovlivňuje geometrie břitu, řezné podmínky, řezné prostředí, mechanické vlastnosti obráběného materiálu a materiál řezného nástroje, kdy při soustružení středně tvrdých ocelí za běžných podmínek je přibližný poměr sil následující: [6]

$$F_c : F_p : F_f = 1 : 0,4 : 0,25; \text{ (platí pro } \kappa_r = 45^\circ, \delta_0 < 90^\circ, \lambda_s = 0^\circ, b:a > 5)$$

Největší vliv na vzájemný poměr složek řezné síly má úhel nastavení hlavního ostří nástroje κ_r , kdy růst hodnoty κ_r má za následek relativní zmenšení složky F_p a zároveň zvětšení

složky F_f . Ke zvětšení složky F_p , tak i složky F_f , dojde při růstu úhlu řezu δ , či růstu otupení břitu. Při větším poloměru zaoblení špičky r_ϵ dochází opět ke změně poměru složek, a to v závislosti na hloubce odebíraného materiálu, čímž dojde opět k růstu složky F_p , viz Obrázek 2.11. [6]



Obrázek 2.11 Teoretický vliv poloměru špičky nástroje na poměr složek řezné síly [8]

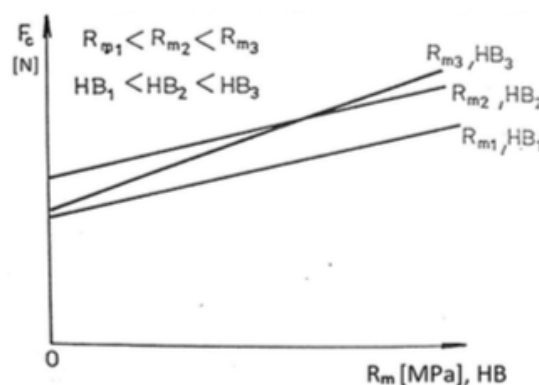
2.3.3 Faktory ovlivňující velikost řezné síly

Celkovou velikost řezné síly ovlivňuje mnoho faktorů, jak již bylo částečně naznačeno výše. Dále budou faktory vztaheny převážně k hlavní složce řezné síly F_c nebo k celkové řezné síle, jelikož tyto údaje jsou pro danou práci zásadní. Vliv na zbylé dvě složky je buďto stejný jako na složku F_c , ale ve srovnání s ní je daný vliv velikostně minoritní či bude zahrnut v celkové řezné síle. Zmíněné ovlivňující faktory lze shrnout do 4 oblastí vlivu, které budou následně detailněji popsány: [11], [12], [15]

- Obrobek
- Nástroj
- Stroj
- Prostředí

2.3.3.1 Vliv obrobku

Zásadní vliv ze strany obrobku má jeho materiálový druh. Při konstantních řezných podmínkách vznikají rozdílné řezné síly, jestliže jsou obráběny odlišné materiály. Jakožto příčina zmíněného jsou rozdílné fyzikální a chemické vlastnosti jednotlivých materiálů. Pro obecný popis oné závislosti lze říci, že stoupající tvrdost, pevnost či houževnatost má za následek zvýšení řezné síly, čehož si je možno povšimnout na následujícím Obrázku 2.12, kde je řezná síla v závislosti na veličinách obráběného materiálu, kterými jsou pevnost v tahu R_m a tvrdost dle Brinella HB. Dále má u materiálu obrobku vliv na řeznou sílu např. struktura, legující přísady atd. [10], [11], [12]



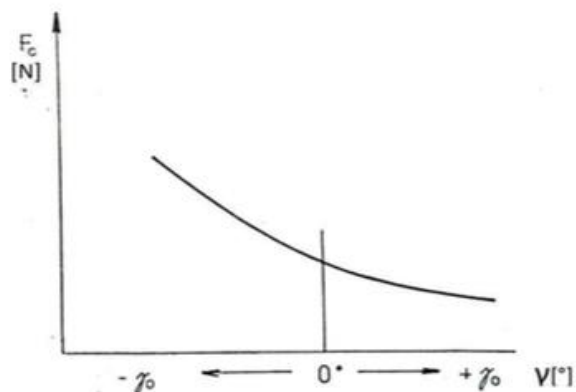
Obrázek 2.12 Vliv materiálu obrobku na velikost řezné síly [12]

2.3.3.2 Vliv nástroje

Do další oblasti patří vliv řezného nástroje, jenž velikost řezné síly ovlivňuje hned několika činiteli. Mezi tyto činitele se řadí geometrie nástroje (úhel čela γ_0 , úhel nastavení hlavního ostří nástroje κ_r), opotřebení břitu a materiál nástroje. [12]

Úhel čela

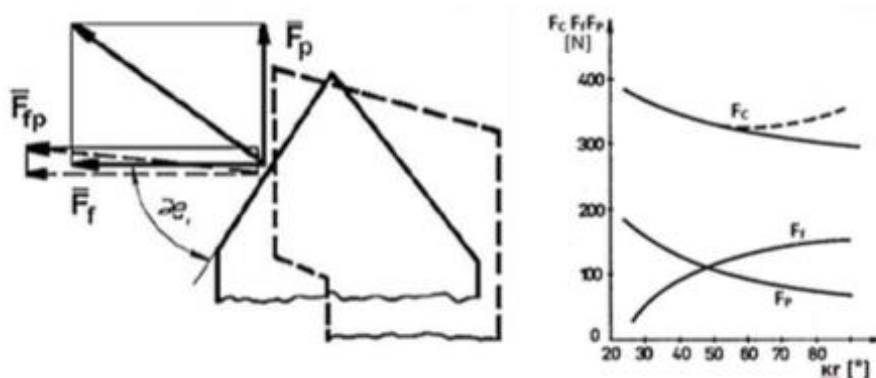
Níže uvedený Obrázek 2.13 popisuje vliv úhlu čela γ_0 . Z tohoto jasně vyplývá, že řezná síla klesá, jestliže úhel čela γ_0 roste, a naopak největší řezné síly se dosahuje při záporném úhlu. Zmíněné platí, jelikož čím je úhel čela γ_0 menší, tak dochází k náročnějšímu zařezávání nože do materiálu. [10]



Obrázek 2.13 Vliv úhlu čela na velikost řezné síly [12]

Úhel nastavení

Dalším faktorem je úhel nastavení hlavního ostří nástroje κ_r . Jak bylo naznačeno v předchozí kapitole úhel nastavení κ_r má vliv na všechny složky řezné síly, což názorně vykresluje Obrázek 2.14. Složky F_f a F_p mají vůči sobě opačné průběhy. Složku síly F_c úhel nastavení ovlivňuje jen minimálně. V případě vázaného obrábění nastává minimální hodnota F_c při $\kappa_r=60^\circ$ a při vyšších úhlech opět mírně roste, viz přerušovaná čára na Obrázku 2.14. Pro volné obrábění řezná síla zůstává téměř konstantní či mírně klesá. [10], [11]



Obrázek 2.14 Vliv úhlu nastavení na velikost řezné síly [9], [12]

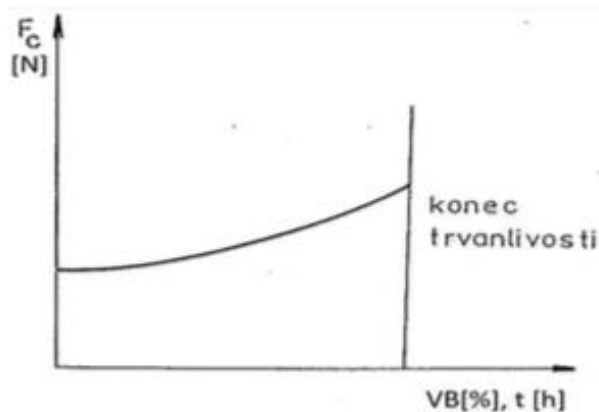
Materiál nástroje

Vliv materiálu nástroje je způsoben změnami koeficientu tření mezi třískou a čelem nástroje a zároveň mezi hřbetem nástroje a obrobenou plochou. Jestliže se obrábí ocel nástrojem z řezné keramiky, tak ve srovnání s nástrojem ze slinutého karbidu dojde k poklesu řezné síly o 5 až 10 %. Zato při obrábění nástrojem z rychlořezné oceli dojde k nárůstu řezné síly až o 5 %, [10]

a to za totožných řezných podmínek. Tento faktor je značně svázán s materiálem obrobku, jelikož u různých druhů obráběných materiálů bývá změna velikosti sil rozdílná. Dále materiál nástroje ovlivňuje velikost řezné síly svojí odolností proti opotřebení. Zde platí, že vyšší podíl tvrdých složek v materiálu nástroje má za následek poklesnutí velikosti řezné síly. [11], [12]

Opotřebení nástroje

Proces obrábění opotřebovává řezný nástroj, a to v místě dotyku s třískou a obráběnou plochou, kdy následkem tohoto dochází ke vzniku výmolu na čele a opotřebení plošky na hřbetě nástroje. Velikost opotřebení se s časem obrábění zvětšuje, což zpravidla způsobuje nárůst řezné síly. Rapidní nárůst řezné síly nastane, jestliže opotřebení dosáhne takové míry, že dojde k lavinovému opotřebení či k ulomení břitu nástroje. Zvětšení řezné síly může být až o 50 %. [11], [12]



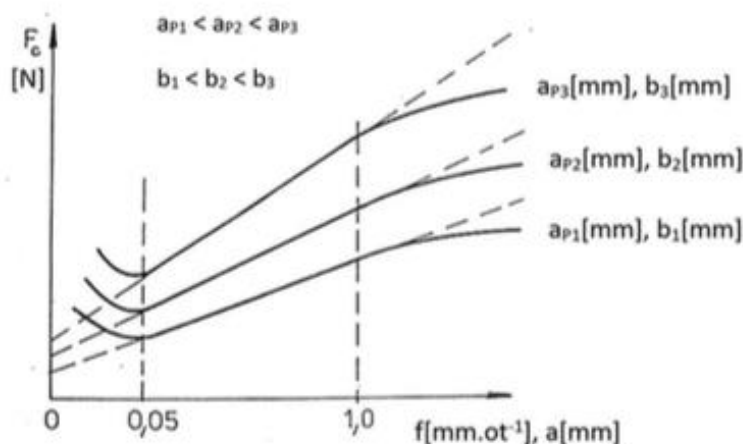
Obrázek 2.15 Vliv opotřebení břitu nástroje na velikost řezné síly [12]

2.3.3.3 Vliv stroje

Pod vliv stroje se hlavně řadí řezné podmínky (posuv na otáčku, hloubka řezu a řezná rychlost), jež jsou voleny před procesem obrábění. Tento jejich vliv byl poprvé zaznamenán německými vědci Kienzleem a Victorem v roce 1957 a byl jimi stanoven tzv. Keinzlův princip, jenž se dané problematice věnuje. [13]

Posuv na otáčku

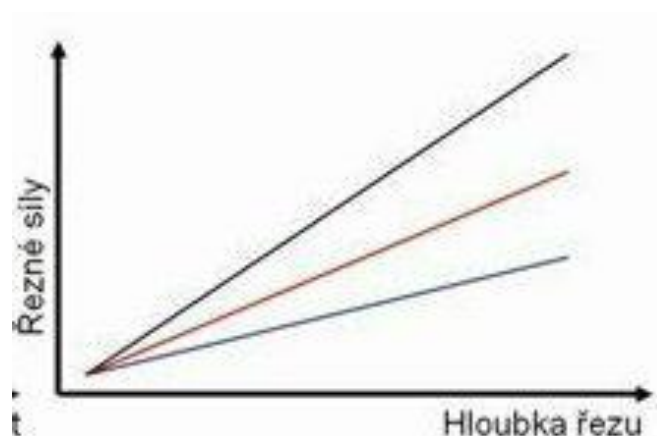
Posuv na otáčku se řadí mezi řezné podmínky, které mají zásadní vliv na velikost řezné síly. Jeho účinky popisuje následující Obrázek 2.16, kdy platí rovnice, že se zvětšením posuvu bude zaznamenána vyšší řezná síla. V počátcích je nárůst relativně lineární, kdy při vyšších posuvech (kolem 1 mm/ot) dojde k odklonu, respektive ke zpomalení nárůstu řezné síly. Při poklesu posuvu pod 0,05 mm/ot dochází k většímu nárůstu řezné síly, což je důsledkem zvětšujícího se vlivu zaoblení ostří nástroje. Pro výpočty se však využívá idealizovaný model bez tohoto nárůstu, proto je potřeba rovnice pro výpočet řezné síly využívat pouze v oblasti linearity. Přímkou stoupají strměji či pozvolněji podle nastavené velikosti hloubky řezu. [10], [11]



Obrázek 2.16 Vliv posuvu na velikost řezné síly [13]

Hloubka řezu

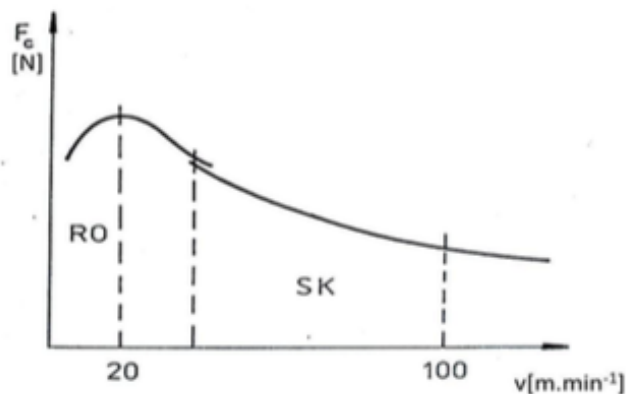
Hloubka řezu je další řeznou podmínkou. Její účinky na řeznou sílu lze připodobnit účinkům posuvu. Opět při nárůstu velikosti hloubky řezu dojde ke zvětšení řezné síly. Zmíněná závislost odpovídá lineárnímu průběhu. Celkově se jedná o faktor, který má největší vliv na velikost řezné síly. Podle nastavené hodnoty posuvu je nárůst strmější či pozvolnější, což znázorňuje následující Obrázek 2.17, kdy černá křivka odpovídá posuvu f_1 a modrá křivka odpovídá f_3 , kdy jejich vzájemný vztah je $f_1 > f_3$. [11]



Obrázek 2.17 Vliv hloubky řezu na velikost řezné síly [13]

Řezná rychlost

Třetí řezná podmínka, řezná rychlost, na velikost řezné síly působí relativně výrazně, ale pouze v určité omezené oblasti, jak si lze povšimnout z následujícího obrázku (Obrázek 2.18). Tato znalost je zvláště důležitá pro praktické využití, kdy se technolog při navrhování řezných podmínek cíleně snaží této oblasti vyhnout. Celkový průběh řezné síly při zvyšování řezné rychlosti lze popsat následovně: jedná se o prudký nárůst až se dosáhne maxima, které nastává kolem hodnoty 20 m/min. Dalším zvyšováním rychlosti dochází k pozvolnému poklesu řezné síly až se dosáhne hodnoty, kdy řezná síla zůstává nadále téměř konstantní. [11]



Obrázek 2.18 Vliv řezné rychlosti na velikost řezné síly [12]

Řezný poměr

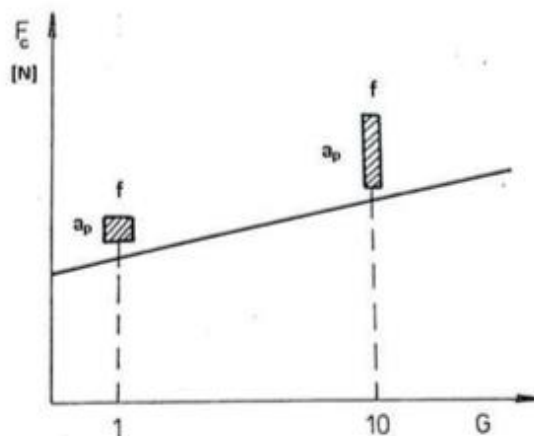
Řezným poměrem se označuje podíl hloubky řezu a posuvu na otáčku, jenž charakterizuje následující vztah: [12]

$$G = \frac{a_p}{f} [-] \quad (5)$$

kde: a_p – hloubka řezu [mm]

f – posuv na otáčku [mm/ot]

Z hlediska řezné síly platí jednoduchá rovnice, čím nižší hodnota G tím nižší velikost řezné síly. Nejnižší hodnoty řezné síly se dosáhne při čtvercovém průřezu neboli v situaci, kdy vychází $G=1$. Přesto v praxi hodnota $G=1$ nebývá optimální, jelikož řezný poměr má zároveň značný vliv na trvanlivost nástroje. Vysoká hodnota řezného poměru způsobí zvýšení trvanlivosti nástroje. [11], [12]



Obrázek 2.19 Vliv štíhlostního poměru na velikost řezné síly [12]

2.3.3.4 Vliv prostředí

Pod vliv prostředí se subsumuje využití chladicích a mazacích kapalin, pomocí kterých lze dosáhnout nižší řezné síly ve srovnání s obráběním tzv. „na sucho“. Podle vlastnosti a složení použité kapaliny lze dosáhnout snížení velikosti řezné síly o 10-15 % ve srovnání s obráběním za sucha. Zmíněné je platné pouze pro nástroje vyrobené z rychlořezné oceli. Při obrábění nástroji ze slinutých karbidů nebo řezné keramiky se chlazení procesními kapalinami nevyužívá, jelikož zmíněné materiály jsou náchylné na změnu teplot, která zvyšuje riziko vzniku křehkého lomu. [10]

2.3.4 Významné faktory ovlivňující velikost řezné síly

Při porovnání výše uvedených znalostí vycházejících z teorie obrábění vyplývá, že nejzásadnějšími faktory, které ovlivňují velikost řezné síly, jsou řezné podmínky (posuv, hloubka řezu). Kdy právě řezné podmínky jsou u procesu obrábění nejlépe variabilní, jelikož jejich omezení převážně záleží jen na možnostech stroje a nástroje a dále na požadované kvalitě výsledného výrobku. Dalším faktorem je materiál obrobku, který do značné míry stanovuje určité rozmezí, ve kterém se řezné síly budou pohybovat, a to v závislosti na ostatních faktorech procesu. Pro výrobu požadovaného obrobku bývá často typ materiálu pevně stanoven, a proto tento faktor nelze řídit jako řezné podmínky.

Relativně vlivnými faktory jsou také úhel nastavení a úhel čela, které lze v praxi variovat pomocí různých typů destiček. Přesto se povětšinou využívá optimální kompromis zvolených úhlů pro dosažení nižších sil a zároveň co největší trvanlivosti nástroje. Na což navazuje otupení břitů, kterému lze také předcházet např. včasnou výměnou řezné destičky, tak aby nedošlo k výše popsanému poškození, a tím k rapidnímu nárůstu řezných sil.

2.3.5 Stanovení řezných sil

Hodnoty řezných sil je možné získat několika způsoby, jež se rozlišují dle vstupních údajů, které poslouží k následnému určení velikosti řezných sil. Stanovení řezných sil se provádí dvěma metodami, respektive výpočtem nebo měřením. Důležitost zisku výsledné řezné síly obzvláště tkví v analýze silového působení při procesu řezání a v následném zlepšení technologických podmínek obrábění. Znalost řezné síly může také posloužit k následným výpočtům dalších veličin, jež jsou pro popis procesu obrábění neméně důležité, např. velikost kroučícího momentu M_k nebo potřebného výkonu pro obrábění P_{ef} . [12]

2.3.5.1 Stanovení řezných sil výpočtem

Charakterizujícím znakem těchto metod je buďto předchozí změření či znalost hodnot ostatních veličin a následného výpočtu ze vzájemných vztahů pro řeznou sílu. Tyto metody lze kategorizovat do tří skupin: [11], [12]

- stanovení řezné síly na základě teoretických výpočtů;
- výpočet řezné síly pomocí řezného odporu;
- výpočet metodou experimentálních rovnic.

Teoretické výpočty

Postup výpočtu je založen na teoretických úvahách a rozborech procesu obrábění, a to na dvou modelech. První model vychází z otázek tření na dotykových plochách mezi čelem a třískou a hřbetem a obrobenou plochou. Druhý model vyplývá z rozboru deformace a lomu v oblasti plastických deformací. [11]

Pomocí řezného odporu

Detailní charakteristice řezného odporu k_c se bude věnovat další kapitola 2.5. Výpočtem přes řezný odpor lze získat pouze hlavní složku řezné síly, jež odpovídá podmínkám experimentu, během kterého byla stanovena hodnota řezného odporu. Výpočetní vztah tvoří součin řezného odporu a průřezu odřezávané vrstvy a je následující: [11], [12]

$$F_c = k_c \cdot A_D \text{ [N]} \quad (6)$$

kde: k_c – řezný odpor [$\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-2}$]

A_D – průřez odřezávané vrstvy [mm^2]

Výpočet a hodnota průřezu závisí na způsobu obrábění, kdy se tento vztah pro soustružení dále upravuje: [12]

$$F_c = k_c \cdot f \cdot a_p \text{ [N]} \quad (7)$$

kde: k_c – řezný odpor [$\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-2}$]

f – posuv [mm/ot]

a_p – hloubka řezu [mm]

Experimentální rovnice

Jedná se o rovnice, které zjednodušeně popisují závislost mezi veličinami, jenž mají hlavní vliv na velikost řezné síly. Hodnoty konstant C_F a exponentů x_F a y_F se zjišťují experimentálně, a to při optimálních podmínkách a pro každý druh materiálu zvlášť. [11], [12]

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \text{ [N]} \quad (8)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \text{ [N]} \quad (9)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \text{ [N]} \quad (10)$$

Kde: C_{Fc} , C_{Ff} , C_{Fp} – konstanty vyjadřující vliv obráběného materiálu [-]

x_{Fc} , x_{Ff} , x_{Fp} – exponenty vyjadřující vliv hloubky řezu [-]

y_{Fc} , y_{Ff} , y_{Fp} – exponenty vyjadřující vliv posuvu [-]

a_p – hloubka řezu [mm]

f – posuv na otáčku [mm/ot]

2.3.5.2 Stanovení řezných sil měřením

Stanovení řezné síly výpočtem je často zatíženo určitými nepřesnostmi či nelze zaručit dostatečnou přesnost jako u metody měření. Zmíněné je následkem zjednodušení výpočetního vztahu či využitím tabulkových hodnot koeficientů a exponentů apod. V praxi pro měření velikosti řezné síly jsou využívány dvě možné metody, kterými jsou: [12]

- nepřímé měření;
- přímé měření.

Nepřímé měření

Nepřímé měření se charakterizuje tím, že opět nedochází přímo k měření řezné síly, ale využívá se změření jiné veličiny a následné přepočítání, tak aby bylo dosaženo zisku hodnoty hlavní složky řezné síly. Existují dva typy měření, a to měření pomocí příkonu stroje a pomocí momentu na vřetení. [12]

Při měření pomocí příkonu stroje se vychází z následujícího vztahu podílu efektivního (užitečného) příkonu stroje $P_{už}$ spotřebovaného na vnikání nástroje do obrobku a řezné rychlosti: [12]

$$F_c = \frac{P_{už}}{v_c} \text{ [N]} \quad (11)$$

kde: $P_{už}$ – příkon stroje spotřebovaného na vnikání nástroje do obrobku [W]

v_c – řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Při tomto způsobu zjištění řezné síly se opět zanedbávají dvě složky řezné síly F_f a F_p , jelikož rychlosti v_f a v_p jsou přibližně 10^3 krát menší ve srovnání s rychlostí v_c .

Tímto zanedbáním se dopustíme chyby v řádu přibližně 10^{-3} až $10^{-2} P_{už}$. Pro předchozí výpočet potřebný užitečný příkon stroje lze stanovit na základě rozdílu příkonu obráběcího stroje při obrábění P_e a příkonu stroje naprázdno P_0 . Zároveň ještě dochází k zanedbání zvýšených pasivních odporů stroje, jež způsobí řezná síla. Změření příkonu stroje se provádí wattmetry nebo pomocí speciální soupravy pro měření příkonu. Jedná se o velmi jednoduchou metodu stanovení tangenciální složky řezné síly, kterou je možné využít pro všechny druhy obrábění. [12]

$$P_{už} = P_e - P_0 \text{ [W]} \quad (12)$$

kde: P_e – příkon obráběcího stroje při obrábění [W]

P_0 – příkon stroje naprázdno [W]

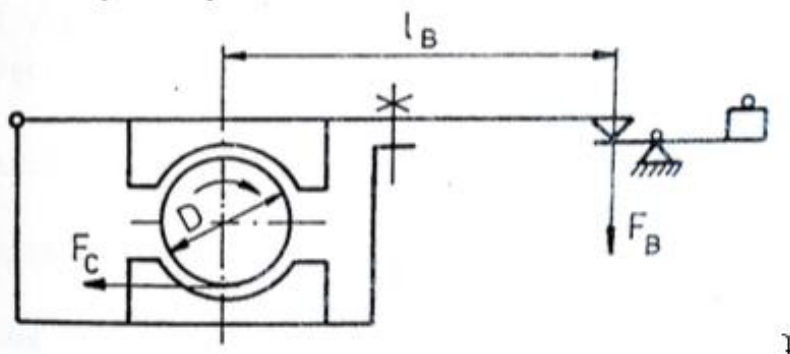
Druhá metoda nepřímého měření využívá měření momentů na vřetení. Jedná se o technicky složitější, ale přesnější způsob zjištění hlavní složky řezné síly než předchozí, což lze přisoudit zanedbání pasivních odporů při řezání, kdy při měření momentu jsou zhruba stejné, a tím zachovány. Podstata tkví v porovnání krouťícího momentu při obrábění a při brždění vřetene brzdou stroje za stejného příkonu stroje. Nejprve se změří příkon stroje při obrábění P_e a následně se zatíží vřeteno stroje brzdou a při totožném příkonu jako při obrábění se stanoví krouťící moment, viz Obrázek 2.20. Při zachování počtu otáček platí rovnost momentů, který charakterizuje následující vztah pro výpočet hlavní složky řezné síly: [12]

$$F_c = \frac{2 \cdot F_B \cdot l_B}{D} \text{ [N]} \quad (13)$$

kde: F_B – síla působící na brzdu [N]

l_B – délka ramene [mm]

D – průměr obrobku [mm]



Obrázek 2.20 Schéma nepřímého měření řezné síly z momentu na vřetení stroje [12]

Přímé měření

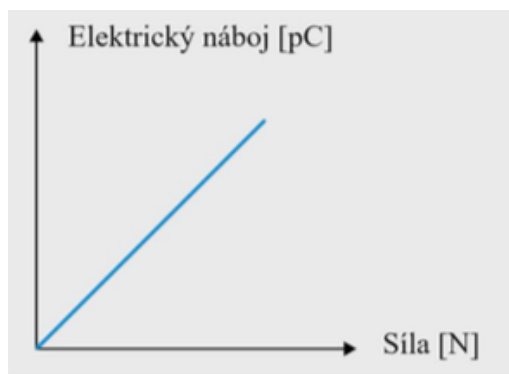
Pro přímé měření se využívají dynamometry, jenž dokáží zaznamenat jednotlivé složky řezné síly. Princip tohoto měření tkví v měření deformací a namáhání v soustavě S-N-O-P během procesu obrábění, které jsou způsobovány silami či momenty. Za nejdůležitější vlastnosti dynamometrů jsou považovány přesnost, citlivost, tuhost, stálost měření a jejich konstrukce. Přesnost a citlivost spolu úzce souvisí a rozumí se tím, aby celková hodnota velikosti zjišťované veličiny odpovídala nejmenší odečítané jednotce při dodržení dostatečné přesnosti odečítání. Pod tuhostí je myšleno, aby deformační element byl schopen zatěžující sílu a danou deformaci dále předat snímači, kdy záleží na vhodnosti čidla, tvaru, celkového konstrukčního provedení a na měřicí metodě. Další nezbytností dynamometru je stálost naměřených hodnot v daném čase a jejich reprodukovatelnost. Konstrukce musí být taková, aby nedošlo k vzájemnému ovlivnění složek řezné síly a musí zaručit nezávislost měřící

veličiny na vlastnostech měřícího stroje. Sestava dynamometru se skládá ze základních tří prvků: přenosový člen, snímač a přijímač. Přenosový člen se stará o přenos vnějšího zatížení do sestavy dynamometru. Úkol snímače spočívá v přeměně mechanické síly z pružného členu na parametr měřícího stroje. Přijímač následně buďto signál zeslabí či zesílí a poté zaznamená přijímanou hodnotu. [9], [18]

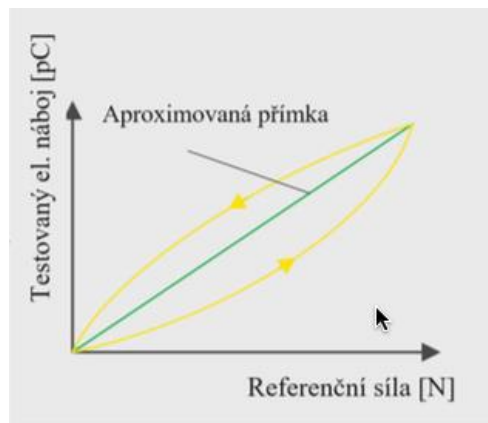
Dle typu přenosového členu se dále dynamometry dělí na mechanické, hydraulické, pneumatické a elektrické. Mechanické dynamometry pracují na principu mechanického snímání deformace deformačního elementu úchylkoměrem, mikrokátorem apod. Mají jednoduchou konstrukci a podávají spolehlivé výsledky. Jejich největší nevýhodu lze spatřovat ve značné závislosti naměřených údajů na teplotě a v malém rozsahu měření. Pneumatické dynamometry jsou založené na čidlu, které využívá systém klapka-tryska a dynamické vlastnosti protékajícího vzduchu šterbinou. Působením síly dochází ke změně vzdálenosti mezi klapkou a tryskou, čímž dochází ke změně tlaku přiváděného vzduchu, jenž je úměrný působící síle. Jedná se o spolehlivý a velmi citlivý typ dynamometru. Naopak hydraulické dynamometry jsou relativně málo citlivé a nevhodné pro dynamické měření kvůli své velké setrvačnosti. Jsou založeny na přenosu měřené síly na píst nebo membránu hydraulického obvodu, čímž dojde ke změně tlaku v kapalině, kterou snímá manometr či jiné měřící zařízení. [19], [20]

V praxi se v dnešní době nejvíce využívají dynamometry pracující na elektrickém principu, jelikož jejich výhoda je ve snadném přenosu signálu, v miniaturních měřících prvcích, čistotě provozu, možnosti snímat jak rotující, tak i pohybující se součásti nebo lze vhodně volit frekvenci zachycených signálů. Podle metody mechanicko-elektrického přenosu se dělí na dvě skupiny: parametrické a generátorové systémy. Skupina parametrických dynamometrů funguje na principu změny jednoho parametru elektrického obvodu, tedy jsou založeny na indukčnosti, kapacitě nebo na odporu. Nejčastěji využívaný je odporový tenzometr, který pracuje se změnou odporu na deformaci vodiče nebo polovodiče, jež nastává v důsledku působení rezné síly při procesu obrábění. Deformací dojde ke změně délky nebo průřezu vodiče, čímž nastane i změna měrného odporu materiálu vodiče. [18], [19]

Druhou skupinou jsou piezoelektrické dynamometry. Jejich princip spočívá ve využití piezoelektrického jevu. Působením rezné síly dojde k deformaci krystalu, čímž na jeho povrchu vznikne elektrický výboj, který je přímo úměrný působící síle. Přesto zatěžující charakteristika neodpovídá lineární přímce, jelikož vlivem piezoelektrického snímače dochází při měření k malému driftu. Velikost driftu odpovídá stále stejné hodnotě, a to i při změně velikosti působící statické síly. Pro získání zmíněné závislosti se využívá aproximace ze skutečných naměřených hodnot, a to tak aby přímka vždy procházela počátkem, viz Obrázek 2.22. Z tohoto důvodu u měření malých sil působící delší dobu dochází k výrazné chybě měření. [18], [21], [23]



Obrázek 2.21 Teoretická závislost elektrického náboje na působící síle [22]



Obrázek 2.22 Reálný průběh závislosti elektrického náboje na působící síle [22]

Hlavní částí je měřící destička, jež musí být vyrobena z piezoelektrického materiálu, aby mohlo dojít k piezoelektrickému efektu, tedy že při mechanickém zatížení destička vyprodukuje kladný nebo záporný elektrický náboj, čímž dojde k vzájemnému přemístění prvků materiálu a vzniku elektrického dipólu. Materiálem destičky nejčastěji bývá křemen nebo materiál na bázi titaničitanu barnatého či Siegenettovy soli. Měřící část dynamometru s měřící destičkou se přímo upíná na nástroj, přes který působí zmíněné mechanické zatížení. Tento typ dynamometru je vhodný pro dynamické měření sil a lze pomocí něj získat velmi přesné výsledky. [18], [21], [23]



Obrázek 2.23 Piezoelektrický dynamometr pro soustružení [18]

2.4 Řezný odpor

Tak jako nauka o materiálu definuje pevnost materiálu v tahu či tlaku, tak i teorie obrábění definuje řezný odpor k_c , který charakterizuje jako specifickou materiálovou poměrovou veličinu, jež názorně popisuje náročnost obráběcího procesu překonáváním soudržnosti materiálu, a to účinkem řezného procesu. Velikost je převážně ovlivněna fyzikálně-mechanickými vlastnostmi obráběného materiálu, ale zároveň i dalšími faktory. Řezný odpor či řezný tlak je definován vztahem podílu hlavní složky řezné síly F_c a plochy odřezávané vrstvy A_D . Za předpokladu, že plocha odřezávané vrstvy odpovídá 1 mm^2 se jedná o tzv. měrný řezný odpor k_{c11} , jež vychází z Kienzlova principu, který měrný řezný odpor definuje jako řeznou sílu potřebnou k úběru materiálu obrobku s šířkou záběru 1 mm a hloubkou záběru 1 mm . Velikost řezného odporu se spočte pomocí následujícího vztahu: [6], [13]

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \text{ [MPa]} \quad (14)$$

kde: F_c – hlavní složka řezné síly [N]

A_D – průřez odřezávané vrstvy [mm^2]

Kdy plocha odřezávané vrstvy A_D se vypočte pomocí geometrických či řezných parametrů zvoleného obrábění a velikosti úhlu nastavení, jak znázorňuje Obrázek 2.24. [42]

$$A_D = b \cdot h \text{ [mm}^2\text{]} \quad (15)$$

$$h = f \cdot \sin \kappa_r \text{ [mm]} \quad (16)$$

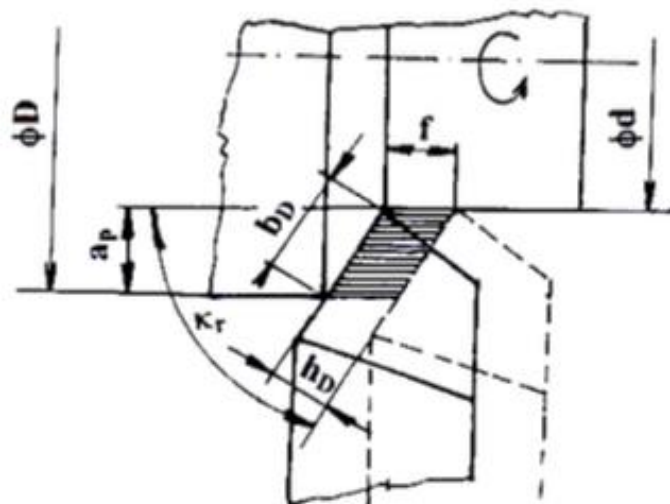
kde: a_p – hloubka řezu [mm]

f – posuv na otáčku [mm/ot]

b – šířka odřezávané vrstvy [mm]

h – tloušťka odřezávané vrstvy [mm]

κ_r – úhel nastavení hlavního ostří [$^\circ$]



Obrázek 2.24 Geometrie průřezu odřezávané vrstvy [42]

Při dodržení specifických podmínek při podélném soustružení, kdy úhel nastavení hlavního ostří se rovná 90° a úhel čela odpovídá nule. Za těchto specifických podmínek lze řezný odpor spočítat pomocí následujícího zjednodušeného vztahu (18): [6]

$$A_D = f \cdot a_p \cong h \cdot b \text{ [mm}^2\text{]} \quad (17)$$

$$k_c = \frac{F_c}{f \cdot a_p} \text{ [MPa]} \quad (18)$$

kde: a_p – hloubka řezu [mm]

f – posuv na otáčku [mm/ot]

b – šířka odřezávané vrstvy [mm]

h – tloušťka odřezávané vrstvy [mm]

Za obecných podmínek se u výpočtu řezného odporu provede korekce a pro výpočet se použije následující vzorec:

$$k_c = k_{c1} \cdot h^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right) [\text{MPa}] \quad (19)$$

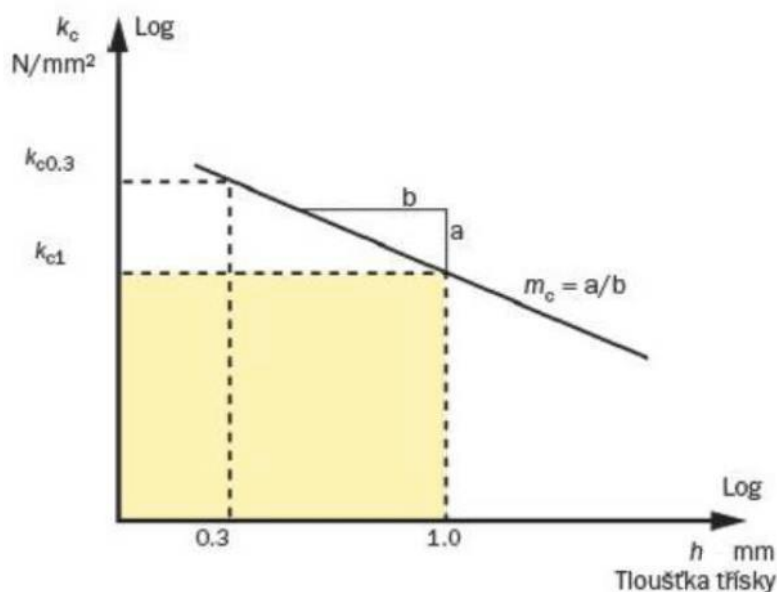
kde: k_{c1} – měrný řezný odpor [MPa]

h – tloušťka odřezávané vrstvy [mm]

γ_0 – úhel čela v ortogonální rovině [°]

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

Hodnoty měrného řezného odporu k_{c1} se stanovují experimentálně či jsou uvedeny v tabulkách nebo grafech. Velikost koeficientu m_c se určí podle následujícího Obrázku 2.25 nebo hodnoty lze nalézt v tabulkách.



Obrázek 2.25 Určení koeficientu m_c [33]

2.4.1 Určení velikosti řezného odporu

Velikost řezného odporu se získává pomocí přepočtu z předem experimentálně naměřených hodnot či z hodnot vycházejících z tabulek, jež odpovídají danému procesu, kdy ale velikost řezného odporu ovlivňuje mnoho faktorů (vlastnosti obrobku, velikost průřezu, řezné podmínky atd.). Počet ovlivňujících faktorů odpovídá faktorům, jež ovlivňují velikost tangenciální složky řezné síly, ale některé se projevují odlišně. [6]

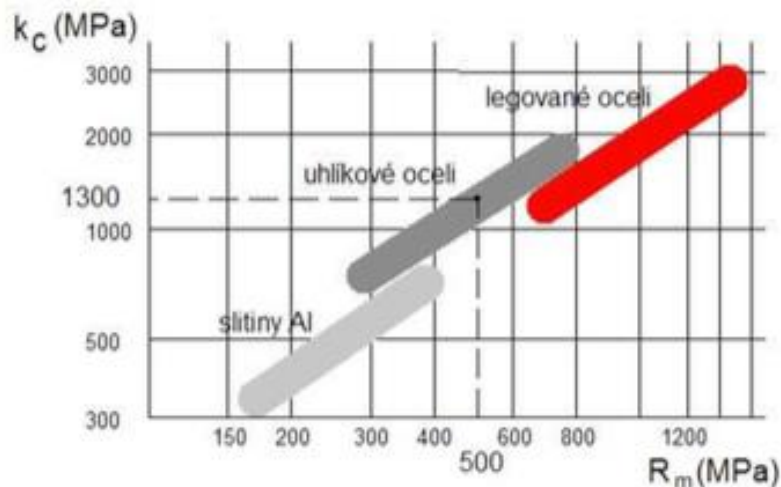
Jelikož se jedná o materiálovou veličinu, tak na ni má zásadní vliv materiál obrobku. Tento vliv na řezný odpor odpovídá vlivu materiálu obrobku jako na řeznou sílu, jak bylo popsáno v kapitole 2.3.3.1. Nejvíce se na velikosti řezného odporu projevuje pevnost, tvrdost, zpevnování materiálu a houževnatost materiálu obrobku. Čím větší hodnoty odolnosti proti deformacím materiál dosahuje, tím vyšší hodnoty řezný odpor dosáhne. Pro každý materiál je řezný odpor odlišný, a to i při konstantních řezných podmínkách. Hodnoty měrného řezného odporu pro různé materiály byly experimentálně zjištěny a zaneseny do tabulek, kdy onu závislost vyobrazuje následující Obrázek 2.26. Poté lze relativní vliv pevnosti či tvrdosti vyjádřit uvedeným vztahem: [9]

$$\frac{k_{c1}}{k_{c2}} = \left(\frac{R_{m1}}{R_{m2}}\right)^n, \quad \frac{k_{c1}}{k_{c2}} = \left(\frac{HB_1}{HB_2}\right)^r \quad (20)$$

kde: R_m – pevnost v tahu [MPa]

HB – tvrdost materiálu dle Brinella [-]

exponent $n \approx 0,4 \div 0,7$, $r \approx 0,3 \div 0,7$



Obrázek 2.26 Závislost řezného odporu na pevnosti v tahu [6]

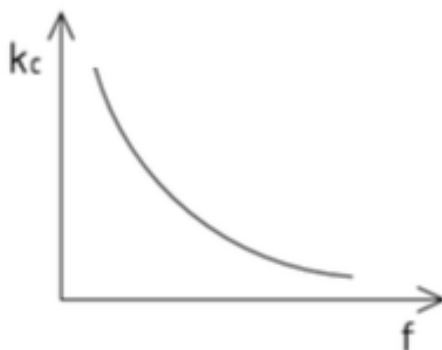
Ze vztahu pro výpočet řezného odporu (14) vycházejí jako důležité faktory řezné podmínky, kterými jsou posuv, hloubka řezu a řezná rychlost. Jako faktor s největším vlivem na velikost řezného odporu lze jednoznačně označit posuv f , resp. tloušťku odřezávané vrstvy h , jenž se projevuje naprosto opačně než na řeznou sílu. Závislost zobrazuje následující Obrázek 2.27 a popisuje ji vztah, že při minimální tloušťce, jenž je dána poloměrem zaoblení ostří, roste řezný odpor do nekonečna. S růstem velikosti posuvu dochází ke snižování řezného odporu, jelikož zvětšováním tloušťky třísky nastává snižování poměrné hodnoty deformační práce, protože se zmenšuje stupeň zpevnění materiálu a podíl pasivních prací na tvorbu třísky. Strmost poklesu průběhu závislosti především závisí na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu. [6]

$$k_c = \frac{C_p}{h^u} \text{ [MPa]} \quad (21)$$

kde: C_p – empirická konstanta [-]

h – tloušťka třísky [mm]

u – empirická konstanta, $u=0,12 \div 0,78$

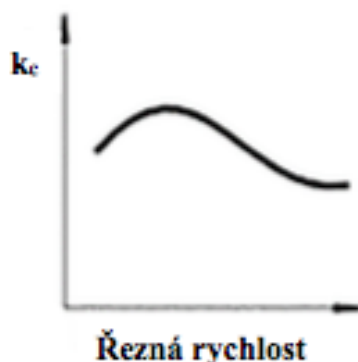


Obrázek 2.27 Závislost řezného odporu na posuvu [25]

Hloubka řezu a_p či šířka třísky b má na řezný odpor také opačný vliv než na řeznou sílu. Při poklesu hloubky řezu na velmi malé hodnoty výrazně roste řezný odpor. Přesto v praxi vliv hloubky řezu je poměrně minoritní, jelikož hodnoty, které se při obrábění v praxi využívají,

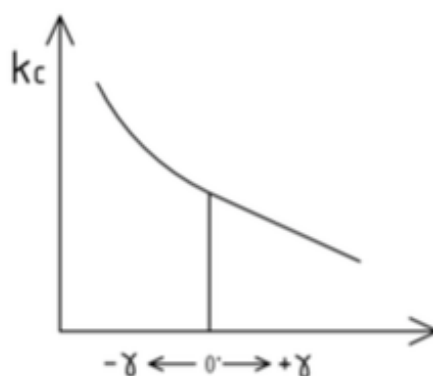
ovlivňují řezný odpor relativně málo, jelikož vliv hloubky řezu na zpevnění obrobku ve srovnání s posuvem je výrazně menší. [6], [9]

Řezná rychlost se projevuje v určitých intervalech jinak, zvyšuje či snižuje velikost řezného odporu. Stejně jako pro řeznou sílu po překonání určité hodnoty řezné rychlosti dochází s růstem rychlosti k následnému poklesu řezného odporu, což popisuje Obrázek 2.28. Závislost je ale nemonotónní, a to vlivem tvorby nárůstku tedy změnou geometrie břitu, dále vlivem teploty řezání a vlivem změny součinitele tření. Průběh celkové závislosti ovlivňuje řezná rychlost tím, že působí na velikost oblasti OMNO' a na intenzitu primární deformace. Dále má značný vliv na teplotu deformovaného materiálu, a také určuje rychlost zatěžování materiálu obrobku a ovlivňuje velikost součinitele tření na čele i na hřbetě, s čímž se pojí vliv na vznik a velikost nárůstku, kdy zmíněné působení se poté odráží ve velikosti řezného odporu. [6], [9]



Obrázek 2.28 Závislost řezného odporu na řezné rychlosti [26]

Jelikož na velikosti řezného odporu se značně podílí řezná síla, tak dalším faktorem ovlivňujícím jeho velikost je geometrie nástroje. Nejnižších hodnot řezného odporu se dosahuje při co největší ostrosti řezné hrany nástroje. Ostrost definuje zejména úhel čela, kdy čím pozitivnější úhel je, tím se dosahuje nižšího řezného odporu, viz Obrázek 2.29. [6], [9]



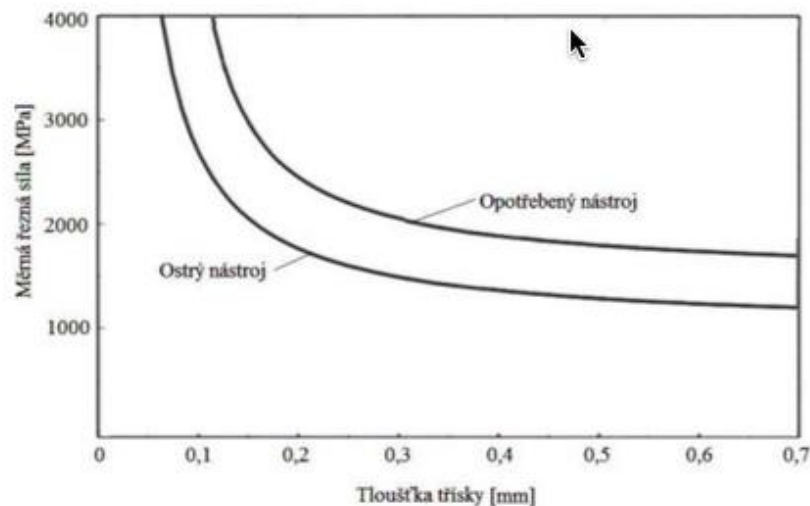
Obrázek 2.29 Závislost velikosti řezného odporu na úhlu čela [9]

Dalším faktorem je úhel nastavení κ_r , kdy jeho velikost souvisí s velikostí tloušťky třísky. Z toho vyplývá, že při zvětšování úhlu nastavení zároveň dochází ke zvětšování tloušťky třísky a tím ke snižování řezného odporu. Opačným způsobem, než úhel nastavení se projevuje poloměr špičky r_s , viz Obrázek 2.30. Jelikož zvětšením poloměru špičky nastane zvětšení délky styku ostří s materiálem, a tím dojde ke zmenšení tloušťky třísky, a tím dojde ke zvýšení hodnoty řezného odporu. [6], [9]



Obrázek 2.30 Závislost velikosti řezného odporu na poloměru špičky [9]

Jako poslední významný faktor, který je spojen s geometrií nástroje, lze uvést vliv opotřebení. Projev tohoto faktoru na řezný odpor se shoduje s projevem na řeznou sílu, kdy opotřebením nástroje dochází k postupnému nárůstu velikosti řezného odporu. [6], [9]



Obrázek 2.31 Vliv opotřebení nástroje na velikost řezného odporu [24]

V neposlední řadě na řezný odpor působí řezné prostředí. Jeho projev na řezný odpor není zcela jednoznačný, dochází k ovlivnění tření a teploty řezání. Za rozhodující prvek lze označit materiál nástroje, což odpovídá vlivu na řeznou sílu, čemu se věnovala kapitola 2.3.3.4. [6], [9]

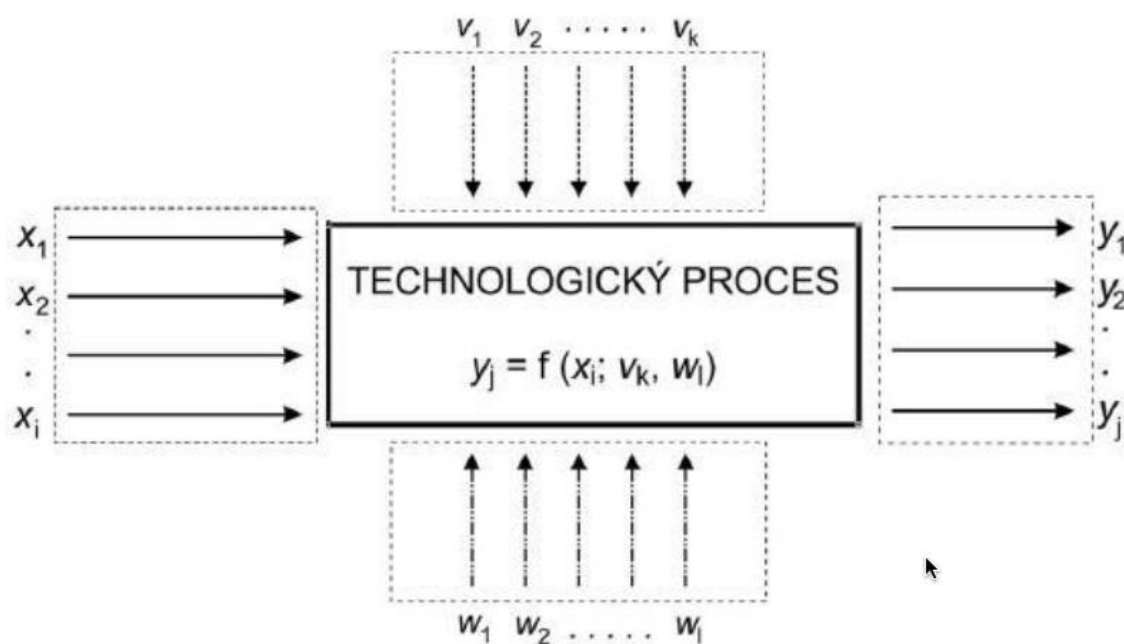
2.4.2 Rozhodující faktory ovlivňující velikost řezného odporu

Aktuální trend dnešní doby je důraz na snížení řezného odporu, aby se dosáhlo snížení zatížení stroje, a tím odlehčení náročnosti procesu obrábění. Znalost zmíněné teorie je zcela nezbytná pro určení podmínek pro experiment obrábění a zároveň pro stanovení optimalizace obráběcího procesu. Vliv faktorů lze shrnout tak, že nejvýraznější vliv má materiál obrobku, kterému odpovídají určité meze řezného odporu, jenž dále závisí na ostatních výrazných faktorech, které lze lépe variovat než materiál obrobku. Těmito faktory jsou řezné podmínky. Změna posuvu je pro velikost řezného odporu nejvíce vypovídající společně s řeznou rychlostí. Z teorie vyplývá, že vliv hloubky řezu bude výrazný, ale z praktického hlediska je vliv hloubky řezu poměrně malý. Rozmezí hodnot, které se při obrábění v praxi využívá, ovlivňuje řezný odpor relativně málo.

2.5 Statistické plánování experimentu

S ohledem na cíle diplomové práce bude potřeba naplánovat a provést experiment a následně ho také vyhodnotit. To celé lze udělat pomocí matematické statistiky. Proto je tato podkapitola ve srovnání s předchozími neméně důležitá, jelikož jen díky ní je možno dojít k relevantním výsledkům. Pro použití matematické statistiky jsou nezbytná data, která lze nazvat jako základní element. Data obsahují informace, jež se pomocí metod matematické statistiky zpracují a dále využijí pro získání vypovídajících výsledků. V této práci bude využita disciplína matematické statistiky, která se označuje zkratkou DoE neboli Design of Experiment. Zmíněnou metodu lze charakterizovat jako určitý návod, jak navrhnout a vyhodnotit experiment, kdy sběr dat ovlivňují nahodilosti. [29], [33]

Na soustružnický proces působí mnoho vlivů, které se od sebe odlišují určitými vlastnostmi, jež naznačuje následující Obrázek 2.32. Vstupující vlivy se nazývají faktory a rozdělují se na kontrolované, konstantní a náhodné faktory. Kontrolované faktory mají své specifikum v to, že je lze aktivně řídit a často se pod ně podřazují např. řezné podmínky. Takto vzniklý proces následně generuje určitý výsledek, jež se označuje jako odezva neboli závislá proměnná. Cíl metody DoE se spatřuje v určení takové kombinace faktorů, aby bylo dosaženo co nejpřesnější odezvy. Pro dosažení nezbytné přesnosti se vyžaduje sledování odezvy v několika bodech experimentálního prostoru. Ale zároveň platí, že sledování každého bodu si vezme určitou časovou náročnost, s čímž se pevně pojí i finanční stránka věci. Takže nejen pro přesnost je důležité určit, kolik bodů se bude sledovat a jak budou umístěné. [29], [33]



Obrázek 2.32 Schéma experimentu podle DoE [27]

- kde: x_1, x_2, \dots, x_i – jsou kontrolované faktory
 v_1, v_2, \dots, v_k – jsou konstantní faktory (nekontrolované)
 w_1, w_2, \dots, w_l – jsou náhodné faktory (způsobují šum)
 y_1, y_2, \dots, y_j – jsou závislé proměnné (odezvy systému)

2.5.1 Statistické navrhování experimentů

Jak již bylo uvedeno, základním prvkem pro matematickou statistiku jsou data, která nesou určitou vypovídající informaci o procesu. Způsobu, jak data sbírat a zpracovat, se věnuje právě statistické navrhování experimentů, jenž se skládá ze dvou hlavních částí, a to z vlastního plánu experimentu a ze statistického vyhodnocení plánu. Vlastní plán experimentu vychází ze dvou principů, a to replikace (opakovatelnost) a randomizace (nahodilost). Díky využití principu replikace lze získat velice důležitou informaci o chybě experimentu a zároveň se dosáhne zmenšení rozptylů u aritmetických průměrů, což v konečném důsledku znamená, že se získá přesnější odhad efektu jednotlivých faktorů, které daný experiment pozoruje. Druhým principem je randomizace. Považuje se za základní kámen, jelikož právě na ní je založeno použití statistických metod pro vyhodnocování naměřených dat, a proto pomocí randomizace se zaručuje, že pořadí provedených měření bude náhodné, jelikož se vychází z předpokladu vzájemné nezávislosti jednotlivých měření. [29], [33]

Statistické vyhodnocení odpovídá návrhu samotného navrženého experimentu. Analýzou výsledků se dojde k závěrům, ze kterých vychází vyhodnocení vlivů jednotlivých faktorů a jejich interakcí. Záměr tkví v nalezení statisticky významných faktorů, jenž mají vliv na sledovanou veličinu. Pro ověření zmíněného se provádí testování hypotéz (t-test a F-test), analýzy rozptylu nebo kovariance, regresivní analýzy apod. Vyhodnocení navrženého experimentu lze označit za ukončené až tehdy, jestliže se dokáže existence či neexistence vlivu zkoumaných faktorů na sledované veličiny. [29], [33]

Celkově se experiment vždy provádí postupně, a to v předem stanovených cyklech. To znamená, že experiment lze rozdělit na několik fází: [29]

- 1) analýza procesu
- 2) návrh experimentu
- 3) provedení zkoušek ve stanoveném pořadí
- 4) analýza výsledků
- 5) závěry

V první fázi experimentu se provádí analýza procesu, což znamená, že se zvolí odezva a stanoví se, které faktory budou pro experiment výchozí. V následující fázi přichází vlastní návrh experimentu. Jako zásadní kritérium při návrhu je potřeba zvážit časovou, ale i finanční náročnost, tak aby byl nastaven odpovídající kompromis mezi relevantními výsledky a náročností. Norma ČSN ISO 35343 udává nejdůležitější typy navrhování experimentů. Jako třetí fáze se označuje měření, které se provádí v předem stanoveném pořadí. Zjištěné hodnoty se zapisují do připravených formulářů nebo se zpracovávají pomocí softwaru. Ve čtvrté fázi dochází k analýze výsledků, kdy způsob analýzy vychází ze zvolené formy navrženého experimentu. Následuje vyhodnocení vlivů jednotlivých faktorů a vzájemného působení neboli interakcí. Závěr experimentu slouží ke stanovení, které faktory či interakce mají rozhodující vliv na odezvy procesu a které faktory naopak jsou irelevantní. Což poslouží např. u provedení dalšího experimentu, tak že u těchto faktorů lze nastavit mírnější tolerance, a tím dosáhnout nižších nákladů na experiment. [29]

2.5.2 Základní druhy experimentů

Obecně existuje a využívá se mnoho rozdělení a celá řada experimentů, kdy každý má své přednosti a je určen pro různé typy statistického zpracování a řešení určitého problému. Podle použité literatury [28] se základní rozdělení experimentů dělí takto:

- 2^{k-p} – standartní návrhy (Box, Hunter a Hunter)
- 3^{k-p} – standartní návrhy (Box, Hunter a Hunter)

- návrhy s 2 a 3 úrovněmi
- centrální kompozitní plán
- D a A (T) optimální plány

Pro danou práci lze usuzovat jako nejpravděpodobnější využití centrálního kompozitního plánu. Předpokladem je, že závislost bude nelineární a dojde k interakci proměnných. [28]

2.5.3 Centrální kompozitní plán

Centrální kompozitní plán je tvořen třemi typy bodů: krychlové, centrální a hvězdicové body. Krychlové body jsou v plánu pokaždé, kdy se jejich počet udává vztahem: $n=2^{k-p}$, kdy k značí počet faktorů a p je stupeň snížení a nejnižší možná hodnota p je rovna jedné. Tyto body se využívají ke spočítání efektů faktorů. Druhým typem bodů jsou centrální body, kdy jejich počet musí být minimálně dva. Účelem těchto bodů je např. stanovení čisté chyby měření. Přidání centrálních bodů podmiňuje předpoklad, že všechny faktory jsou kvantitativní, protože kvantitativní faktor nenabývá úrovně nula. Centrální body neslouží pro výpočet efektů faktorů. Počet hvězdicových bodů udává vztah: $n=2k$, tedy lze jejich počet takto určit. Jejich smysl se spatřuje ve výpočtu koeficientů v úplném kvadratickém modelu a pomocí těchto bodů se dosahuje přesnějších výpočtů regresivních koeficientů. [28], [33]

2.5.4 Kódování podle DoE normování

DoE normování základních faktorů vyplývá z následujícího vztahu (22), jenž ztělesňuje lineární transformaci hodnot původní proměnné, která je provedena podle rovnice přímky ze vztahu (22), a to z intervalu $\langle x_{\min}, x_{\max} \rangle$ do intervalu $\langle -1, +1 \rangle$, což názorně vyobrazuje Obrázek 2.33. [40]

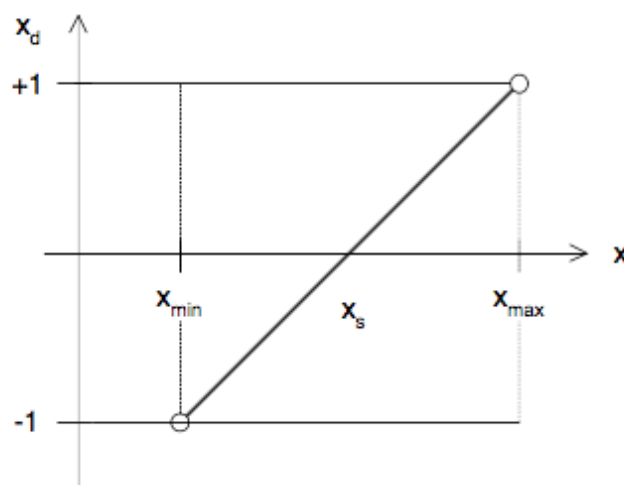
$$x_d(i) = \frac{x(i) - \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}}{\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}} \quad (22)$$

kde: $x_d(i)$ – normovaná proměnná podle DoE

$x(i)$ – proměnná x v původních jednotkách, kdy nabývá hodnot $i=1, 2, 3, \dots, n$

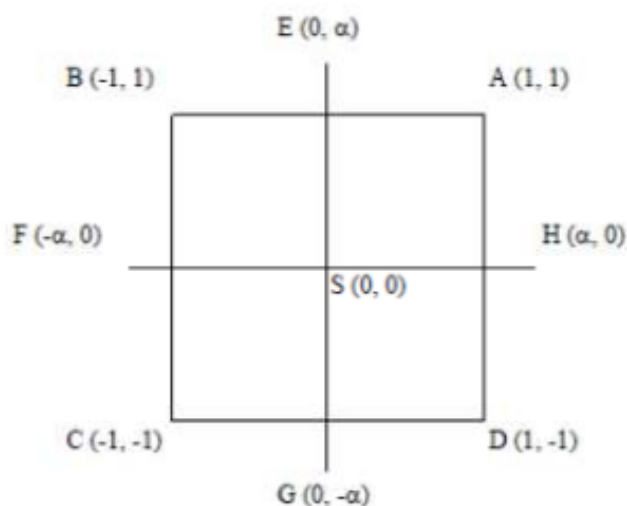
x_{\max} – horní úroveň $x(i)$ pro kódovanou hodnotu (+1)

x_{\min} – dolní úroveň $x(i)$ pro kódovanou hodnotu (-1)



Obrázek 2.33 Lineární DoE normování

Dojde k přepsání plánu experimentu do kódovaného měřítka, kdy každý faktor je stanoven ve dvou úrovních. Hodnotou -1 se označuje dolní úroveň naopak hodnotou +1 se zase označuje horní úroveň. Obrázek 2.34 názorně popisuje rozvržení bodů v kódovaném měřítka centrálního kompozitního plánu. Body A, B, C a D jsou krychlovými body. Body E, F, G a H označují body hvězdicové. Písmenem S je označen centrální bod. Součtem těchto bodů se docílí zisku celkového počtu bodů centrálního kompozitního plánu. [28], [33]



Obrázek 2.34 Body rozvržené v centrálním kompozitním plánu [31]

2.5.5 Nástroje sloužící k vyhodnocení experimentů

K vyhodnocení experimentů a stanovení výsledků slouží různé typy metod statistického usuzování. Jeden z nejdůležitějších nástrojů je testování hypotéz, jenž má podmínku, kdy jej lze použít pouze při splnění normality dat sledovaných veličin. Dále se pro statistické vyhodnocení využívá např. Fisherův test – F-test. Jeho použití je vhodné při srovnání dvou přesností, kdy data byla naměřena na dvou různých zařízeních. Široce známou metodou je ANOVA, která slouží k hodnocení vztahů mezi rozptyly srovnávaných souborů. Pod tímto si lze představit možnost, jak přijít na to, jestli dané faktory mají statisticky významný vliv na sledovanou veličinu. Princip tkví v rozkladu celkového rozptylu na dva, kdy dojde ke vzniku rozptylu, jenž byl vytvořen vlivem jednotlivých faktorů a šumu, který je náhodným prvkem. Poté se testuje statistická významnost poměru mezi těmito prvky. [28], [33]

Nejstarším statistickým testem je Studentův t-test. Slouží k posouzení shody výběrové veličiny se známou zadanou hodnotou a udává míru pravděpodobnosti, jak se ony hodnoty shodují. V matematické statistice se používá mnoho dalších nástrojů mezi které např. patří Durbin-Watsonův test pro stanovení autokorelace nebo Shapiro-Wilkův test normality či normální rozdělení pro sledování dat pohybujících se kolem střední hodnoty, jenž ovlivňují náhodné chyby. [28], [33]

2.5.6 Definice nezbytných pojmů

Při sestavování a vyhodnocování plánu experimentu se používají určité pojmy z oboru matematické statistiky, jež jsou pro pochopení důležité a je vhodné je dopředu uvést a seznámit se s nimi. Jako určité minimum odborná literatura [30] uvádí tyto pojmy:

- **Nezávisle proměnná** – jedná se o vstupní veličinu, která působí na výstupní veličinu neboli na závisle proměnou (např. řezná rychlost, posuv atd.).

- **Závisle proměnná** – jedná se o výstupní veličinu, která je ovlivněna či závislá na vstupní veličině, též se označuje jako cílová proměnná (např. řezná síla).
- **Spojité proměnná** – veličina, která ve stanoveném intervalu dosahuje libovolných hodnot.
- **Diskrétní proměnná** – veličina, pro kterou jsou stanoveny přesné hodnoty a těch nabývá, též se označuje jako kategoriální.
- **Blokové uspořádání plánu** – plán je rozvržen na vícero samostatných částí či bloků, jenž jsou definovány např. různou odebíranou hloubkou řezu nebo druhem materiálu.
- **Statistická hypotéza** – jedná se o tezi, jenž se zabývá neznámou vlastností rozdělení pravděpodobnosti náhodné proměnné nebo jejich parametrů. [28]
- **Nulová hypotéza H_0** – jedná se o domněnku, jejíž validita je testována.
- **Alternativní hypotéza H_1** – jedná se o domněnku, jež je opositelem vůči nulové hypotéze.
- **Statistické testy** – jedná se o metodu, pomocí které se zjišťuje platnost nulové hypotézy, která se poté podle výsledku buď přijme, nebo odmítne.
- **Testovací kritérium** – jedná se o náhodnou veličinu, která je závislá na náhodném výběru a je ve vztahu s nulovou hypotézou. [28]
- **Hladina významnosti α** – slouží jako určitá hranice podle které se buď nulová hypotéza přijme nebo odmítne, ve strojírenství se hladina významnosti obvykle stanovuje na 5 %.
- **Signifikantní** – vyjadřuje, že se jedná o statisticky významný prvek.
- **Reziduum** – jedná se o rozdíl mezi vypočtenou hodnotou podle modelu a naměřenou hodnotou získanou experimentem.
- **Pravděpodobnost p (p -value)** – jedná se o hodnotu, která slouží k rozhodnutí, zda se nulová hypotéza zamítne, nebo nezmítne pro stanovenou hladinu významnosti α .
- **Faktor** – jedná se o nezávisle proměnnou, jenž vstupuje do experimentu. Faktory se dělí na kontrolované, konstantní a náhodné. Použitá literatura [28] udává, že kontrolovaný faktor musí splňovat následující podmínky:
 - nemůže být funkcí jiných faktorů;
 - musí být říditelný neboli být během experimentu konstantní, anebo se mění dle předem navrženého způsobu;
 - musí být technicky řešitelný i v kombinaci s ostatními faktory;
 - musí být nezávislý, což spočívá v tom, že každý faktor může nabývat všech hodnot bez ohledu na velikosti ostatních faktorů;
 - musí odpovídat typu zvoleného plánu, při použití centrálního kompozitního plánu se musí jednat o spojitou proměnnou.

3. Návrh a realizace experimentu

Na základě výše zpracované rešerše z teorie obrábění byly vytyčeny vlivy na velikost řezných sil a řezného odporu při procesu soustružení. Dále byl předložen určitý teoretický předpoklad, jak který faktor je významný pro řezný proces z hlediska silového zatížení.

Z teorie vyplývá, že je potřeba se zaměřit na závislost velikosti řezného odporu na řezných podmínkách. Tato teze vychází z toho, že právě řezné podmínky dle odborné literatury nejvíce ovlivňují řezný odpor a řezné síly a zároveň pro ně platí, že řezné podmínky lze velmi dobře variovat pro potřeby změny silového působení při řezném procesu za stálých ostatních podmínek, jako je materiál obrobku či řezný nástroj.

Odborná literatura se shoduje na faktu, že nejzásadnějším faktorem ovlivňující řezný odpor je posuv. Řezná rychlost se značněji projevuje pouze při dosažení určitých hodnot. Vliv hloubky řezu je výrazný na velikost řezné síly, kdy ho po přepočtu na řezný odpor ovlivňuje výrazně méně.

Pro ověření teorie a stanovení zmíněných závislostí je nezbytné navrhnout a realizovat experiment podle výše popsaného. Naměřená data se poté statisticky vyhodnotí a stanoví se model řezné síly a její závislosti na řezných podmínkách. Poté dojde k výpočtu řezného odporu a určení závislosti na jednotlivých faktorech. Následně se vyhodnocené závěry porovnají s tezemi plynoucí z teorie obrábění a dojde k celkovému ověření získaných výsledků.

Experiment bude proveden na pracovišti Západočeské univerzity v Plzni na katedře obrábění, která disponuje nezbytným vybavením pro realizaci. Bude se jednat o podélné soustružení zvoleného materiálu za předem stanovených podmínek, kdy budou měřeny řezné síly pomocí dynamometru.

3.1 Materiál obrobku

Pro realizaci experimentu byla zvolena ocel 1.4301, též značená jako ocel 17 240 dle ČSN, která se často v praxi nazývá jako ocel „potravinářská“. Zvolená ocel byla vybrána s ohledem na její velmi vysoké využití v praxi a znalost oceli. Jedná se o standartní a cenově dostupný materiál, jenž vyniká svojí odolností vůči korozi v přirozeném prostředí (voda, ovzduší). Hlavními legující prvky jsou chrom s 18 % a nikl s 10 %. Detailnější chemické složení je uvedeno v následující Tabulce 1. Tato austenitická ocel není magnetická, jelikož austenitická gama fáze je paramagnetická. Pevnost oceli v tahu se pohybuje kolem 500 až 700 N/mm². Lze ji bez potíží svařit a hodí se pro použití v provozních teplotách od -269 °C do +350 °C. Ocel se také vyznačuje vysokou houževnatostí, proto odborná literatura uvádí ztíženou obrobiteľnosť. Zato její tváriteľnosť ťažením a ohýbaním je díky zmíněné houževnatosti výborná. [34], [35]

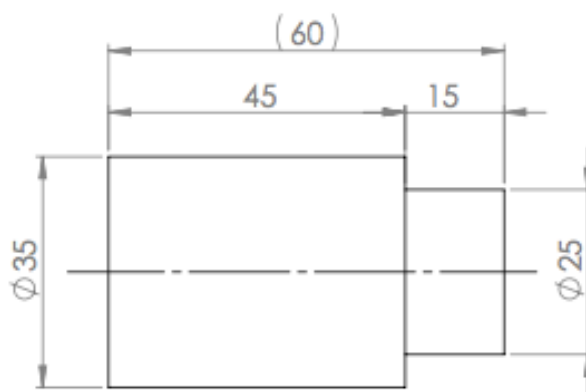
Jedná se o nejvíce používanou nerezovou ocel, kdy její využití je převážně v potravinářském, zemědělském a farmaceutickém průmyslu, dále v architektuře či při výrobě aut. Pro použití v chemickém průmyslu není zcela vhodná, jelikož odolává jen některým málo koncentrovaným kyselinám. Její korozivzdornost lze zvýšit leštěním. [34], [35]

Tabulka 1: Chemické složení oceli 17 240 dle ČSN [36]

Chemické složení oceli 17 240 dle ČSN [hm. %]							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
max. 0,07	max. 1	max. 2	max. 0,045	max. 0,015	17,5–19,5	8–10,5	max. 0,11

Pro dosažení objektivních výsledků experimentem je důležité, aby polotovary byly vyrobeny z jednoho kusu kruhové tyče. Tím se docílí zmenšení rizika v podobě rozdílného

chemického složení materiálu polotovaru a zároveň to zaručuje stejné tepelné zpracování polotovarů. Za polotovar byla zvolena kruhová tyč o průměru 35 mm. Pro dosažení srovnaného povrchu polotovaru byl vždy před měřeními řezy proveden jeden přejezd, aby průměr obrobku odpovídal 34 mm. Pro upnutí obrobku byl zvolen kleštinový upínač, jelikož při experimentu budou použity relativně vysoké řezné rychlosti, proto se kleštinový upínač jeví jako vhodnější než univerzální sklíčidlo. V důsledku toho jsou konce polotovarů osazeny na průměr 25 mm. S ohledem na možné vysoké rozkmitání soustavy byl zvolen minimální průměr obrobku na 15 mm, kdy pod tímto rozměrem již měření probíhat nebude a dojde k výměně za nový kus polotovaru. Jako výkres polotovaru poslouží následující Obrázek 3.1.



Obrázek 3.1 Výkres polotovaru

3.2 Strojní vybavení pro provedení experimentu

Pro realizaci experimentu, kterým se dosáhne cílů diplomové práce, je nezbytné určité pracoviště, jenž musí odpovídat zvoleným požadavkům a disponovat požadovaným strojním vybavením. Realizace experimentu bude prováděna při podélném soustružení, a to v prostorách Západočeské univerzity v Plzni na katedře obrábění.

3.2.1 Obráběcí stroj

Pro experiment byl zvolen stroj Emco MAXXTURN 25. Jedná se o horizontální CNC soustruh. Tento stroj je vhodný na komplexní obrábění menších strojních součástí pro svoji velikost a vybavenost. Lze pomocí něho dosáhnout relativně vysoké přesnosti výroby. Vedle hlavního vřetena je také vybaven opěrným vřetenem a dvanácti-polohovou revolverovou hlavou, ve které lze používat i poháněné nástroje. Pro daný stroj se využívá řídicí systém Siemens nebo Fanuc, kdy v pracovním prostoru se programují tři osy X, Y, Z a posuv v těchto osách je omezen na rozměry v ose X na 100 mm, v ose Y na 35 mm a v ose Z na 300 mm. Další parametry stroje jsou uvedeny v následující Tabulka 2. [37], [38]

Tabulka 2: Základní parametry stroje Emco MAXXTURN 25 [38]

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	8 000 ot/min
Max. výkon vřetene	6,5 kW
Max. kroutící moment	30 Nm

Rozměry (délka x šířka x výška)	2 180 x 1 425 x 1 870 mm
Hmotnost stroje	2 100 kg

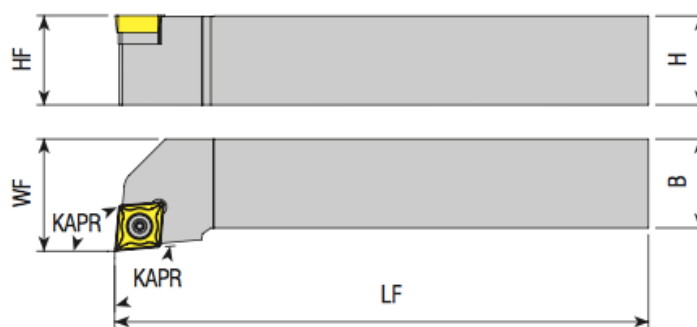
Zmíněný soustruh tak plně splňuje všechny požadavky, které jsou vyžadovány pro realizování experimentu. Jako jednu z nezbytností lze uvést možnost upnutí dynamometru pro měření řezných sil. CNC soustruh je vyobrazen na následujícím obrázku (Obrázek 3.2).



Obrázek 3.2 CNC soustruh Emco MAXXTURN 25 [37]

3.2.2 Obráběcí nástroj

Experiment se bude provádět při podélném soustružení, proto nástrojem bude soustružnický nůž. Byl vybrán držák s označením SCLCL 1212F-09 pro upevnění vyměnitelné břitové destičky. Na následujícím Obrázku 3.3 je nastíněn a Tabulka 3 slouží pro detailní popis rozměrů držáku.

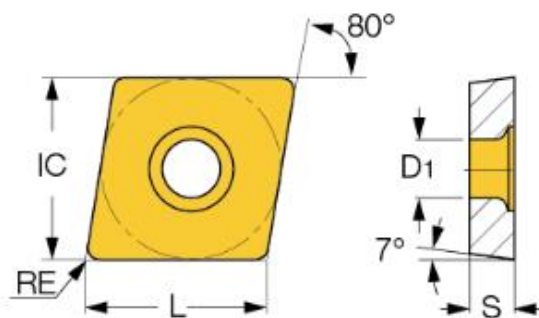


Obrázek 3.3 Držák destičky SCLCL 1212F-09 [43]

Tabulka 3: Rozměry kót držáku SCLCL 1212F-09 [43]

Rozměry kót držáku [mm]				
HF=H	B	LF	WF	KAPR [°]
12	12	70	12	95

Zvolena byla VBD od společnosti Iscar s označením CCMT 09T304-SM IC8250. Její geometrie je naznačena na následujícím Obrázku 3.4, kdy pro detailnější porozumění poslouží následující Tabulka 4 s rozměry jednotlivých kót. [39]



Obrázek 3.4 Vyměnitelná břitová destička CCMT [39]

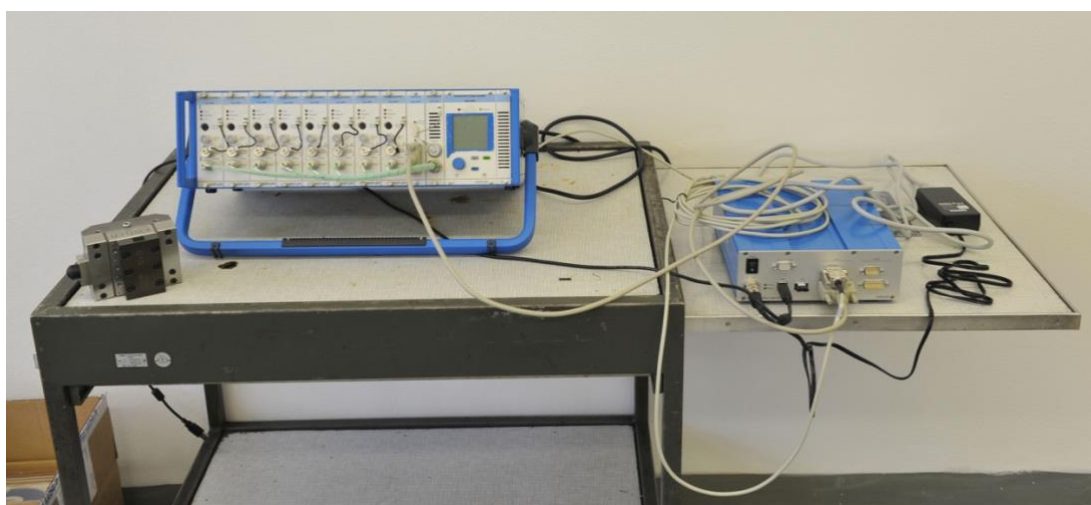
Tabulka 4: Rozměry kót břitové destičky [39]

Rozměry kót břitové destičky [mm]					
L	S	RE	IC	D ₁	AN [°]
9,7	3,97	0,4	9,52	4,4	7

Dále výrobce stanovil optimální interval řezných podmínek, ve kterých bude destička vhodně pracovat. Výrobce pro posuv uvádí interval 0,06 až 0,25 mm/ot a interval pro hloubku řezu výrobce udává 0,5 až 2,5 mm. [39]

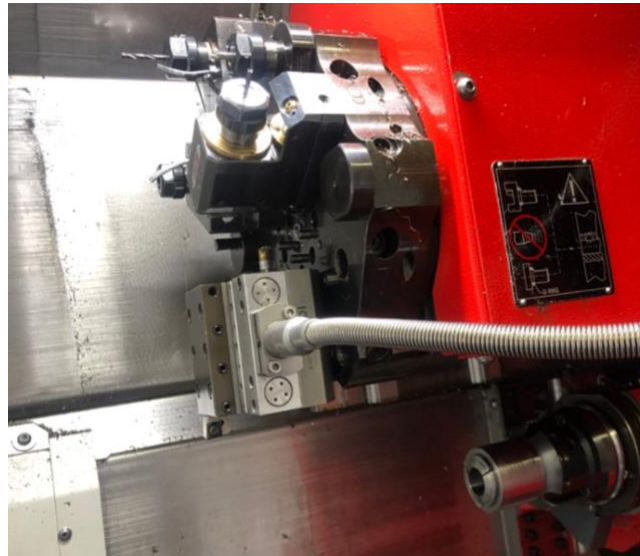
3.2.3 Vybavení pro měření

Řezné síly se změří pomocí piezoelektrického dynamometru od výrobce Kistler, jenž je zapojený do sestavy, která se dále skládá z osmi-kanálového zesilovače a digitalizační karty. Sestava je názorně ukázána na následujícím Obrázku 3.5. Funkce dynamometru je založena na principu piezoelektrického jevu, kdy působící síly způsobí deformaci, a tím vytvoří slabý elektrický náboj, který je následně zaznamenán snímačem. Následně dojde k jeho digitalizaci a vyhodnocení ve speciálním softwaru DynoWare, tak jak již bylo detailněji popsáno výše v kapitole 2.3.5.2. [37]



Obrázek 3.5 Sestava pro měření řezných sil [37]

Jak lze vidět na následujícím Obrázku 3.6, soustružnický nůž se přímo upíná do dynamometru a jedná se o přímé měření.



Obrázek 3.6 Upnutí soustružnického nože do dynamometru

3.3 Plán experimentu

Před realizací experimentu je zcela nezbytné stanovit, co je daným experimentem potřeba zjistit či ověřit a na základě toho stanovit podmínky a kritéria, podle kterých dojde k navržení detailního plánu experimentu, tak jak bude popsáno a zároveň provedeno v následujících podkapitolách.

3.3.1 Předpoklady plánu experimentu

Jako jednu z prvních věcí při plánování experimentu je důležité určit, zda průběh sledované odezvy bude lineární nebo naopak, a zda dojde k interakcím mezi kontrolovanými faktory.

Pomocí provedené rešerše se došlo k závěru, že se bude jednat o nelineární model s interakcemi mezi některými kontrolovanými faktory. S ohledem na tyto poznatky byl jako příhodný druh experimentu zvolen centrální kompozitní plán.

Zásadním předpokladem správného navržení experimentu a jeho následného vyhodnocení je dodržení nezávislosti vstupních proměnných. Řezný odpor je funkcí více proměnných, kterými jsou a_p , f , F_c , a v_c , ale kdy zároveň řezná síla F_c je funkcí a_p , f a v_c , čímž zmíněná podmínka nezávislosti vstupních proměnných dodržena není. Proto nelze kvůli těmto závislým proměnným měřit přímo řezný odpor, ale musí se postupovat tak, že se nejdříve zjistí velikosti řezných sil za určitých řezných podmínek a následně dojde k dopočítání řezného odporu pomocí vztahů pro výpočet řezného odporu.

3.3.2 Faktory experimentu

Rešerše teorie obrábění vytyčila několik faktorů, jenž ovlivňují řezné síly a řezný odpor. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.5.1, pro získání relevantních a zároveň dostupných výsledků jak po finanční, tak po časové stránce je potřeba faktory procesu roztrdit na významné a nevýznamné. Kdy významné faktory vstupující do experimentu je nezbytné rozdělit na konstantní a kontrolované.

Z teorie vyplynula již výše zmíněná teze, že velikost řezného odporu nejvíce ovlivňují řezné podmínky. Kdy právě řezné podmínky lze nejlépe variovat, tak aby bylo dosaženo

optimalizace řezného procesu s ohledem na silové zatížení. Proto za kontrolované faktory byly zvoleny:

- posuv na otáčku f [mm/ot]
- řezná rychlost v_c [m/min]
- hloubka řezu a_p [mm]

Ostatní vstupující faktory do procesu, tak jak bylo popsáno v kapitolách výše 2.3.3 a 2.4.2, budou zvoleny jako konstantní tedy neměnné. Pro udržení faktorů jako konstantní je potřeba činit nezbytné kroky pro jejich stabilizaci.

Do konstantních faktorů patří např. vliv geometrie nástroje a jeho materiálu. Změně geometrie nástroje se bude bránit kontrolou a následnou výměnou řezné destičky za novou, a to tehdy jestliže by došlo např. k tvorbě nárůstku či ke značnému otupení břitu, a tím ke změně geometrie.

Dalším konstantním faktorem je řezné prostředí. Aby nemohlo dojít k proměňování podmínek změnou koncentrace či směru průtoku, bylo zvoleno, že k obrábění nebude využita žádná procesní kapalina.

V neposlední řadě je konstantním faktorem materiál obrobku. Pro dodržení neměnnosti materiálu se pro experiment musí využít materiál z jedné tavby, tak aby bylo zaručeno stejné chemické složení. Dalším krokem pro sjednocení všech používaných polotovarů je přerovnání povrchu polotovaru před měřeními úběry. Přerovnání se musí vždy provádět stejnými řeznými podmínkami, aby nerovnosti povrchu neovlivňovaly naměřené hodnoty a byly stejné v průběhu celého experimentu. S tímto souvisí i nezbytnost použití stejného vybavení během celého experimentu. Do této skupiny se řadí např. stroj, upínací kleština, upnutí nástroje do dynamometru apod.

3.3.3 Řezné podmínky pro experiment

Intervaly řezných podmínek byly navrženy dle získaných poznatků z rešerše ve spojitosti s konzultacemi s odbornou veřejností tak, aby se realizací experimentu dosáhlo zisku proveditelných výsledků. Pod tímto si je potřeba představit navržené takových řezných podmínek, které jsou pro praktické využití relevantní. Zároveň jsou navržené řezné podmínky vzájemně kombinovatelné, tak aby byl experiment technicky realizovatelný.

Vzhledem ke geometrii řezné destičky, jež byla popsána v kapitole 3.2.2, s ohledem na údaje, které udává výrobce Iscar a po konzultaci s odbornou veřejností byl navržen interval hodnot posuvu na otáčku $f = \langle 0,01 - 0,2 \rangle$ [mm/ot].

Velikost intervalu řezné rychlosti byla stanovena podle omezujících podmínek stroje a průměru polotovaru a spodní hranice byla zvolena s ohledem na praktické použití, jelikož praktické využití nižší řezné rychlosti není proveditelné. Interval řezné rychlosti je dán následovně $v_c = \langle 50 - 400 \rangle$ [m/min].

Interval pro hloubku řezu byl opět volen podle hodnot, které udává výrobce destičky pro optimální fungování destičky v řezu a po konzultaci s odbornou veřejností. Interval je stanoven následovně $a_p = \langle 0,01 - 1 \rangle$ [mm].

Ostatní výše zmíněné faktory se udržují po celý experiment konstantní tedy neměnné. Pro názornější popis je uvedena následující Tabulka 5 s navrženými řeznými podmínkami pro experiment. Při volbě hodnot řezných podmínek byla brána v úvahu jejich vzájemná kombinovatelnost a možnost provedení experimentu z technologického hlediska.

Tabulka 5: Navržené řezné podmínky

Řezné podmínky	
Posuv na otáčku f [mm/ot]	0,01-0,2
Řezná rychlost v_c [m/min]	50-400
Hloubka řezu a_p [mm]	0,2-1

3.3.4 Sestavení plánu experimentu

Sestavení plánu experimentu pro nalezení statistického modelu průběhu řezné síly v závislosti na výše uvedených faktorech vychází z předchozích kapitol z rešerše. Pro tento typ experimentu se hodí centrální kompozitní plán. Body plánu jsou názorně představeny v následující tabulce (Tabulka 6) a zároveň tabulka definuje zvolené body jak v kódovaném, tak i v přirozeném měřítku. Experiment bude probíhat pouze v jednom bloku, jelikož nebyla zvolena žádná diskretní proměnná, jenž by vyžadovala blokové uspořádání kompozitního plánu.

Tabulka 6: Plán experimentu

Std	Run	x_1	x_2	x_3		$x_1 (v_c)$	$x_2 (f)$	$x_3 (a_p)$
1	8	-1	-1	-1		120,94	0,05	0,36
2	5	1	-1	-1		329,06	0,05	0,36
3	17	-1	1	-1		120,94	0,16	0,36
4	12	1	1	-1		329,06	0,16	0,36
5	15	-1	-1	1		120,94	0,05	0,84
6	6	1	-1	1		329,06	0,05	0,84
7	14	-1	1	1		120,94	0,16	0,84
8	3	1	1	1		329,06	0,16	0,84
9	18	-1,68179	0	0		50,00	0,11	0,60
10	4	1,681793	0	0		400,00	0,11	0,60
11	13	0	-1,68179	0		225,00	0,01	0,60
12	1	0	1,681793	0		225,00	0,20	0,60
13	10	0	0	-1,68179		225,00	0,11	0,20
14	7	0	0	1,681793		225,00	0,11	1,00
15	16	0	0	0		225,00	0,11	0,60
16	11	0	0	0		225,00	0,11	0,60
17	9	0	0	0		225,00	0,11	0,60
18	2	0	0	0		225,00	0,11	0,60

Plán experimentu se skládá z osmnácti bodů, pro které se variují řezné podmínky. Těchto osmnáct bodů lze dělit na krychlové body 1 až 8, hvězdicové body 9 až 14 a centrální body 15 až 18. Centrální body slouží jako kontrola experimentu, zda probíhá korektně. Měřením těchto bodů lze odhalit např. vznik nárůstku, otupení nástroje či chybu v sestavě měření, což se projeví na naměřených hodnotách, jež by si v optimálním případě měly odpovídat. Pro dosažení relevantnosti výsledků se každá hodnota hlavní složky řezné síly, která je závisle proměnná, změří šestkrát.

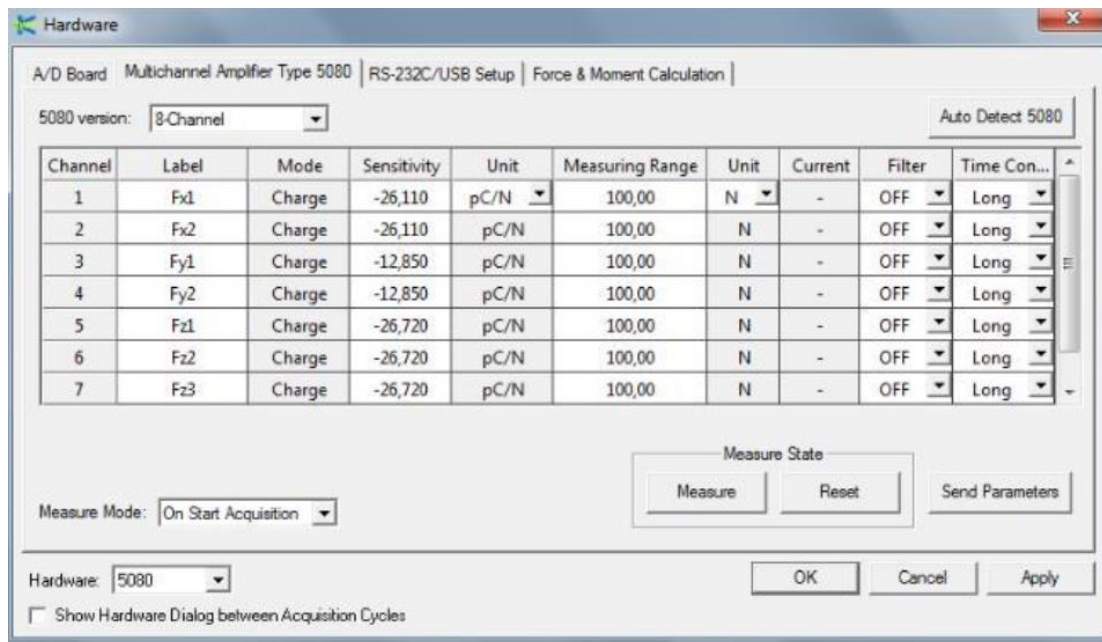
Celkově bude provedeno 108 měření. Podle počtu měření, hloubky řezu, přerovnění povrchu obrobku se stanoví potřebný počet polotovarů, který se o odpovídající počet navýší vzhledem k pravděpodobnému vzniku určité chyby obsluhy během měření či dojde-li

k ulomení špičky nástroje, což si vyžádá zopakování měření. V důsledku toho byl stanoven minimální počet polotovarů na 10.

3.4 Realizace experimentu

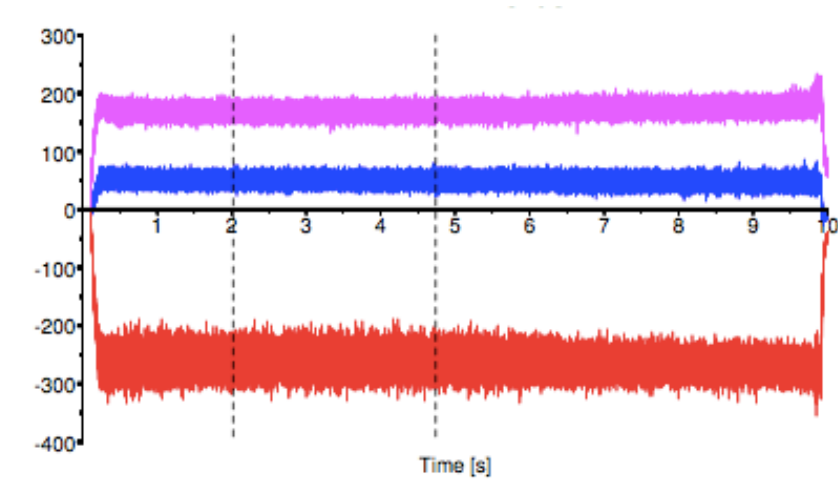
Realizace experimentu se provedla na pracovišti Západočeské univerzity v Plzni na katedře obrábění. Zmíněné pracoviště disponuje nezbytným vybavením pro realizaci. Pro podélné soustružení se využil stroj MAXXTURN 25 tak, jak bylo popsáno v podkapitole 3.2.1. Dále byla potřeba připravit odpovídající počet polotovarů a vysoustružit potřebné osazení. Následně se dle požadavků nachystalo pracoviště. Jako první krok se upnul soustružnický nůž do dynamometru a do stroje. Poté se zapojila a zprovoznila celá měřicí soustava, která pod sebe zahrnuje zesilovač, digitalizační kartu a počítač se speciálním programem pro vyhodnocování řezných sil, kterým je DynoWare. Proces měření se spustí těsně předtím, než se nůž dostane do záběru. Záběrem nože vznikne silové působení, které bylo detailně popsáno výše a vytvoří se elektrický náboj v dynamometru, jenž je veden přes zesilovač a digitalizační kartu do počítače, který pomocí programu signál vyhodnotí.

Samotnému měření předcházela zkouška funkčnosti měřicí soustavy a celkové nastavení a zkorigování softwaru, což obnášelo založení nového dokumentu, do kterého se naměřená data uloží. Zkorigování softwaru v sobě zahrnovalo nastavení hodnot na zesilovači tak, aby měření bylo co nejpřesnější, ale zároveň nenastalo přetížení kanálů. Ono počáteční nastavení pro každý bod plánu se provádělo odhadem na základě řezných podmínek. Jestliže došlo k přetížení kanálů či odhad byl moc vysoký oproti naměřeným hodnotám, tak se přistoupilo ke korekci měřeného rozsahu a k opakování měření. Tím se zaručilo co nejpřesnější měření. Na dalším Obrázku 3.7 lze vidět zmíněné nastavování měřeného rozhraní v programu DynoWare.



Obrázek 3.7 Nastavení rozhraní v programu DynoWare

Program během doby řezu v počítači vykresluje graf (viz Obrázek 3.8), a to velikost jednotlivých složek řezné síly v závislosti na čase. Pro danou práci a navržený experiment je stěžejní hlavní složka řezné síly F_c , jelikož hlavní složka řezné síly slouží pro výpočet řezného odporu, a proto byla sledována a zaznamenávána jen tato složka, která je na následujícím obrázku znázorněna červenou barvou.



Obrázek 3.8 Vyhodnocení složek řezné síly

Jak již bylo popsáno výše, silové zatížení po celou dobu řezu není konstantní. Při najetí nástroje vznikne silové napětí, jenž způsobí rozkmitání soustavy S-N-O-P, což ovlivní celkový průběh řezné síly. Proto se pro vyhodnocení velikosti hlavní složky řezné síly vybere interval ve střední části měření, kdy by mělo dojít k relativnímu ustálení kmitání soustavy a velikosti řezné síly. Oblast měření si zvolí obsluha počítače, kdy ona oblast je na předchozím obrázku znázorněna dvěma svislými čarami. Po výběru měřené oblasti software udá velikosti jednotlivých složek řezné síly.

4. Vyhodnocení a validace provedených experimentů

4.1 Statistické vyhodnocení experimentu

Jak již bylo řečeno výše pro analýzu řezných sil při soustružení byl zvolen centrální kompozitní plán se třemi nezávislými faktory, kterými jsou řezná rychlost v_c , posuv f a hloubka řezu a_p , kdy hledaná výsledná funkce bude ve tvaru:

$$F_c = f(v_c, f, a_p) \text{ [N]} \quad (23)$$

Hlavní složka řezné síly vždy byla v každém bodě měření změřena šestkrát, viz příloha č. 1. Vzhledem ke skutečnosti, že výsledek ve formě regresivního modelu předpokládá využití pouze jedné střední hodnoty hlavní složky řezné síly pro každý bod měření (1 až 18), kdy pro použití metoda nejmenších čtverců předpokládá splnění určitých předpokladů. Bude tedy nezbytné provést analýzu regresivní trojice: data, model a rezidua, tak aby bylo možné nalezenou regresivní funkci prohlásit za platnou a korektní, jak po stránce numerické, tak i po stránce statistické.

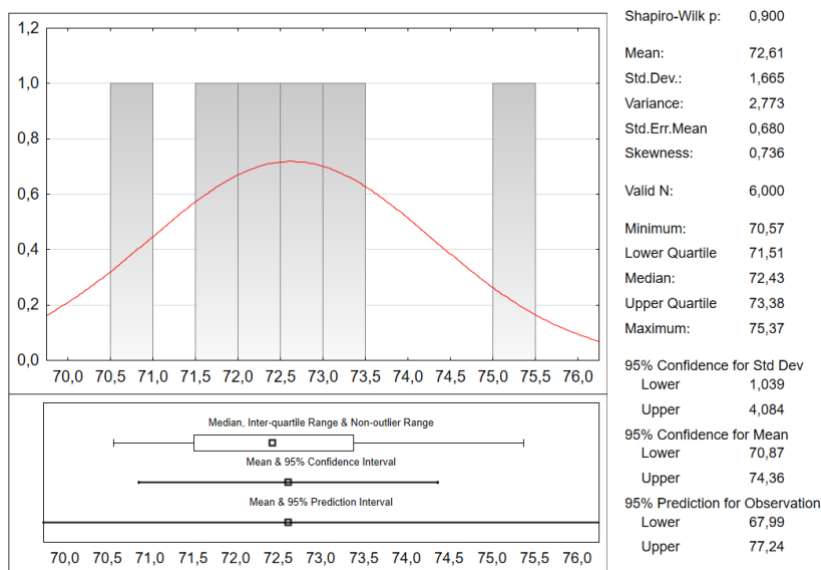
Následující Tabulka 7 slouží pro volbu střední hodnoty opakovaných měření hlavní složky řezné síly. Pro výběr střední hodnoty je zásadní, že jednotlivá měření vykazují Gaussovo normální rozdělení, což vychází z porovnání hodnoty získané ze Shapiro-Wikova testu se zvolenou hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. To zároveň znamená, že při opakování měření se nevyskytly žádné odlehlé hodnoty. Díky zmíněnému lze za reprezentanta opakovaných měření zvolit aritmetický průměr.

Tabulka 7: Deskriptivní statistika opakovaných měření hlavní složky řezné síly

Std	Mean	Confidence -95 %	Confidence +95 %	Median	Minimum	Maximum	Std.Dev.	Standard Std.Dev	Skewness	Kurtosis	Shapiro-Wilk p
Std 1	72,615	70,867	74,363	72,430	70,570	75,370	1,665	0,680	0,736	0,760	0,900
Std 2	67,202	64,165	70,238	66,095	64,650	72,510	2,893	1,181	1,566	2,258	0,121
Std 3	151,450	149,361	153,539	151,650	148,600	154,100	1,991	0,813	-0,175	-0,823	0,904
Std 4	137,967	135,534	140,400	138,400	134,700	140,200	2,318	0,946	-0,441	-1,885	0,301
Std 5	146,167	137,676	154,657	145,550	137,000	155,600	8,091	3,303	0,115	-2,401	0,318
Std 6	127,650	121,440	133,860	124,800	122,200	136,800	5,918	2,416	0,996	-0,982	0,106
Std 7	349,933	344,100	355,766	351,450	340,900	356,600	5,558	2,269	-0,769	0,289	0,738
Std 8	311,350	298,773	323,927	308,200	298,800	327,200	11,984	4,892	0,497	-1,947	0,320
Std 9	239,683	237,464	241,903	240,050	237,300	242,700	2,115	0,863	0,069	-1,034	0,469
Std 10	168,150	161,928	174,372	169,650	158,500	173,800	5,929	2,421	-0,899	-0,220	0,434
Std 11	42,970	41,868	44,072	43,005	41,710	44,570	1,050	0,429	0,361	-0,481	0,873
Std 12	288,717	277,815	299,618	287,150	277,000	301,200	10,388	4,241	0,304	-1,897	0,319
Std 13	68,438	65,037	71,840	68,175	64,770	72,200	3,241	1,323	0,107	-2,512	0,283
Std 14	273,433	260,977	285,890	274,650	259,400	287,200	11,869	4,846	-0,207	-1,843	0,329
Std 15	175,067	168,720	181,413	176,600	165,000	181,400	6,048	2,469	-0,958	0,289	0,596
Std 16	176,000	173,536	178,464	176,100	172,500	178,900	2,348	0,958	-0,336	-0,642	0,950
Std 17	181,117	175,849	186,385	180,600	174,100	187,700	5,020	2,049	-0,047	-1,059	0,868
Std 18	176,617	172,885	180,349	176,600	170,800	180,300	3,556	1,452	-0,692	0,308	0,520

Std – číslo pokusu, Mean – aritmetický průměr, Confidence – 95% - dolní 95 % interval spolehlivosti aritmetického průměru, Confidence + 95 % - horní 95 % interval spolehlivosti aritmetického průměru, Median – medián, Minimum – minimum, Maximum – maximum, Std. Dev – směrodatná odchylka, Standard Std. Dev – standardní chyba směrodatné odchylky, Skewness – šikmost, Kurtosis – špičatost, Shapiro-Wilk p – vypočítaná hodnota významnosti Shairo-Wilksovo testu.

Obrázek 4.1 slouží jako názorná ukázka zmíněného Gaussova normálního rozdělení pro měření č. 1, kdy se potvrdilo, že žádné měření není odlehlé od střední hodnoty.



Obrázek 4.1 Grafické znázornění Gaussovo normálního rozdělení pro č. měření 1

Pro odhalení systematické chyby slouží analýza opakovaného měření centrálních bodů plánu experimentu (15 až 18). Vychází se z předpokladu, že při stejných podmínkách experimentu, by měly vycházet statisticky si rovné hodnoty měřené hlavní složky řezné síly. Tabulka 8 představuje deskriptivní statistiku centrálních bodů plánu experimentu.

Tabulka 8: Deskriptivní statistika centrálních bodů experimentu

	Level of Factor	N	F _c [N] Mean	F _c [N] Std.Dev	F _c [N] Std.Err	F _c [N] - 95,00 %	F _c [N] + 95,00 %
Total		24	177,2000	4,798913	0,979574	175,1736	179,2264
Std	15	6	175,0667	6,047699	2,468963	168,7200	181,4133
Std	16	6	176,0000	2,347765	0,958471	173,5362	178,4638
Std	17	6	181,1167	5,019728	2,049295	175,8488	186,3845
Std	18	6	176,6167	3,556075	1,451761	172,8848	180,3485

V centrálních bodech průměrná hodnota hlavní složky řezné síly F_c odpovídá hodnotě 177,20±2,026 N se směrodatnou odchylkou 4,799 N. Zároveň ale měření 17 vykazuje vyšší hodnotu než ostatní centrální body. Pro ověření signifikantnosti diferencí aritmetických průměrů se využil Scheffeho test se zvolenou hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. Získaný výsledek udává, že mezi jednotlivými měřeními v centrálních bodech není signifikantní rozdíl ve střední hodnotě na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ a naměřené rozdíly mezi centrálními body lze připsat náhodě.

Tímto byly ověřeny předpoklady o datech a byl nalezen vhodný reprezentant opakovaných měření hlavní složky řezné síly pro jednotlivé body pokusu, kterým je aritmetický průměr. Dalším krokem je tvorba vhodného regresivního modelu. Hledaná závislost hlavní složky řezné síly na vstupních faktorech řezné rychlosti v_c, posuvu f a hloubky řezu a_p se bude simulovat rovnicí ve všeobecném tvaru:

$$F_c = f(v_c, f, a_p) \text{ [N]} \quad (24)$$

Pro zmíněné nalezení vhodného modelu je potřeba analyzovat druhou část regresivní trojice, a to model. Tabulka 9 udává shrnutí analýzy vhodnosti modelu při působení faktorů na změnu hodnoty hlavní složky řezné síly F_c. Jak si lze povšimnout v tabulce, podíl variability

hodnoty F_c (RSquare) odpovídá hodnotě 98,8905 %, kdy upravený index determinace (RSquare Adj), jenž podmiňuje míru vysvětlení variability dat daným modelem, dosahuje hodnoty 98,2852 %. Odborná literatura přichází s tvrzením, že technický model, který dosahuje hodnoty 75 % upraveného indexu determinace se považuje za přijatelný. Proto lze konstatovat, že vytvořený model je zcela funkčním modelem. Průměrná chyba tohoto modelu odpovídá hodnotě 11,53761 N a průměrná hodnota hlavní složky řezné síly je 175,2522 N.

Tabulka 9: Shrnutí vhodnosti modelu pro F_c

RSquare	0,988905
RSquare Adj	0,982852
Root Mean Square Error	11,53761
Mean of Response	175,2522
Observations (or Sum Wgts)	18

Tabulka 10 slouží k potvrzení úsudku, že variabilita způsobená náhodnými chybami je výrazně menší než variabilita naměřených hodnot vysvětlená modelem, kdy hodnota dosažené hladiny významnosti ($\text{Prob} > F$) udává vhodnost využitého modelu, a to podle Fisher-Snedecorova testovacího kritéria, což vychází ze samotné povahy testu. Dále se provádí test nulové statistické hypotézy, která udává, že žádný z efektů (členů) modelu nemá vliv na hodnotu sledované proměnné. Pro statistické vyhodnocení se využívá hladina významnosti 5 %, proto vychází, že získaná hodnota $\text{Prob} > F_c$ je menší než zmíněná hladina významnosti, což v konečném důsledku znamená, že v modelu se nachází alespoň jeden nenulový člen, jenž má vliv na hodnotu sledované proměnné.

Tabulka 10: Analýza ANOVA modelu pro F_c

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F_c Ratio	Prob > F_c
Model	6	130507,1	21751,2	163,3995	<,0001
Error	11	1464,28	133,1		
C. Total	17	131971,4			

Další na řadě je analýza vytvořeného modelu, což se provádí pomocí tzv. testu chyby nedostatečného přizpůsobení modelu. Jedná se o testování rozptylu reziduí a rozptylu naměřených dat uvnitř skupin. Zmíněné slouží k získání informací, jestli regresivní model dostatečně popisuje sledovanou závislost. Následující Tabulka 11 udává hodnoty získané daným testem.

Test chyby nedostatečného přizpůsobení modelu zjišťuje, zda variabilita reziduí je větší než variabilita hodnot uvnitř skupin. Nulová statistická hypotéza (H_0) vyplývá z předpokladu, že rozptyl reziduí je menší nebo roven rozptylu uvnitř skupin. Naopak alternativní statistická hypotéza (H_1) udává, že rozptyl reziduí je větší, než rozptyl uvnitř skupin. Výběr záleží na výsledné hodnotě Fisherova testovacího kritéria převedeného do pravděpodobnostního měřítka ($\text{Prob} > F_c$) a odpovídá hodnotě 0,0515. Při použití hladiny významnosti 5 % vychází, že není dostatek důkazů pro to, aby došlo k zamítnutí nulové statistické hypotézy. Výsledkem daného úsudku je, že rozptyl reziduí je menší nebo roven rozptylu uvnitř skupin a to znamená, že model je dostatečný. Zároveň je potřeba brát v úvahu, že do modelu byl přidán vliv, pomocí kterého bylo dosaženo dané podmínky, kdy tento vliv ale není signifikantní.

Tabulka 11: Chyba přizpůsobení modelu pro F_c

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F_c Ratio	Prob > F_c	Max RSq
Lack Of Fit	8	1442,602	180,325	24,9531	0,0515	0,9652
Pure Error	3	21,6797	7,227			
Total Error	11	1464,282				

Výše uvedenými kroky byly splněny základní předpoklady, které se na model kladou, že se jedná o adekvátní a dostatečný model. Dále se vytvořila tabulka odhadů parametrů modelu (viz Tabulka 12). Tabulka udává přehled o signifikantních faktorech, které jsou označeny hvězdičkou a dále se s nimi pracuje při tvorbě obecné rovnice.

Tabulka 12: Odhady parametrů modelu pro F_c

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%	VIF
Intercept	172,9936	4,581036	37,76	<0,0001*	162,9108	183,0764	.
x_2	69,58854	3,122056	22,29	<0,0001*	62,71694	76,46014	1
x_3	62,28453	3,122056	19,95	<0,0001*	55,41293	69,15613	1
x_1	-14,3736	3,122056	-4,6	0,0008*	-21,2452	-7,50204	1
$x_2 \cdot x_2$	-5,24141	3,172093	-1,65	0,1267	-12,2231	1,740321	1
$x_2 \cdot x_3$	29,7325	4,079163	7,29	<0,0001*	20,75432	38,71068	1
$x_1 \cdot x_1$	8,21837	3,172093	2,59	0,0251*	1,236641	15,2001	1

* - signifikantní na hladině významnosti $\alpha = 0,05$

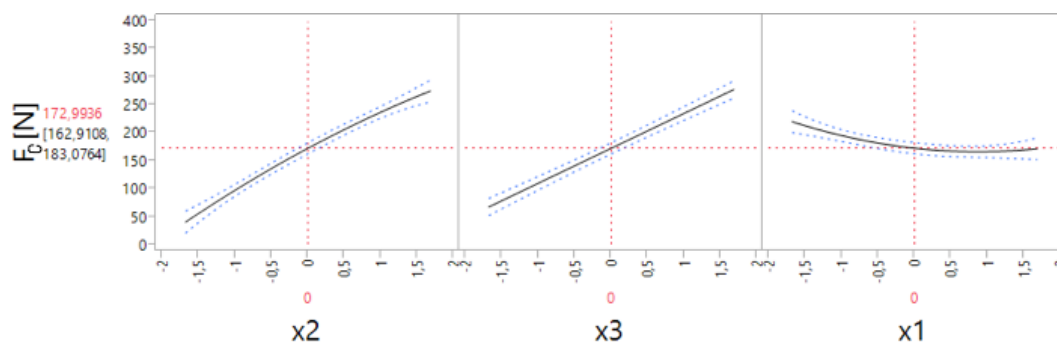
Z odhadu parametrů modelu lze sestavit statistickou predikci závislosti v kódovaném tvaru:

$$\hat{y} = 172,99 + 69,59 \cdot x_2 + 62,28 \cdot x_3 - 14,37 \cdot x_1 - 5,24 \cdot x_2^2 + 29,73 \cdot x_2 \cdot x_3 + 8,22 \cdot x_1^2 \quad (25)$$

Pro sestavení výsledného predikčního vztahu v přirozeném měřítku je potřeba převést parametry zpět z kódovaného měřítku podle DoE normování, a to pomocí vztahu (22), tak jak již bylo popsáno v rešerši v podkapitole 2.5.4. Za využití převodového vztahu (22) a statistické rovnice (25) se dojde k zisku predikční rovnice, jenž popisuje zkoumanou závislost pro hlavní složku řezné síly F_c :

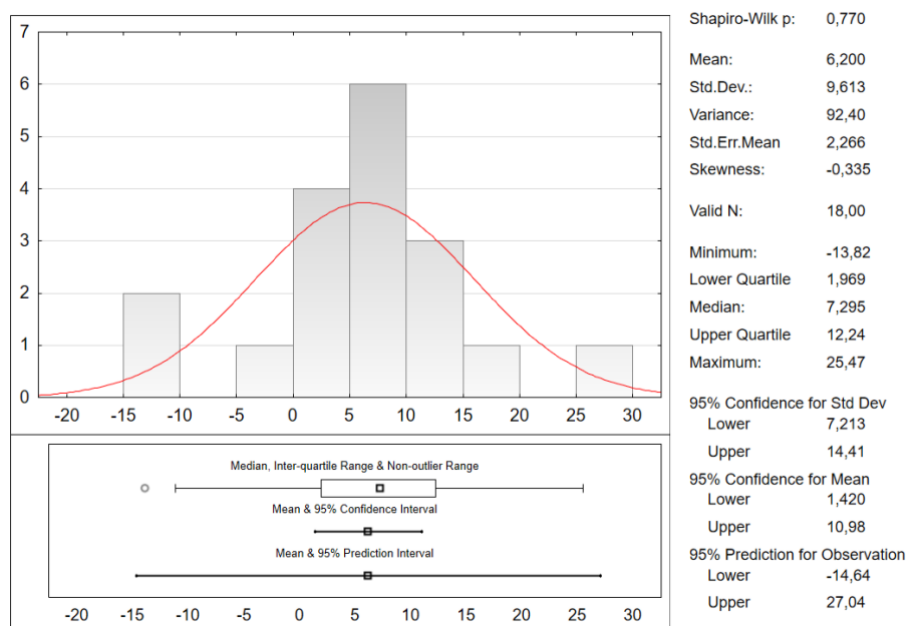
$$F_c = 18,44 \cdot a_p + 265,48 \cdot f - 0,48 \cdot v_c + 2213,08 \cdot a_p \cdot f - 1642,67 \cdot f^2 + 7,59 \cdot 10^{-4} \cdot v_c^2 + 76,05 \text{ [N]} \quad (26)$$

Následující Obrázek 4.2 názorně představuje samostatný vliv jednotlivých uvažovaných faktorů modelu na hlavní složku řezné síly F_c .



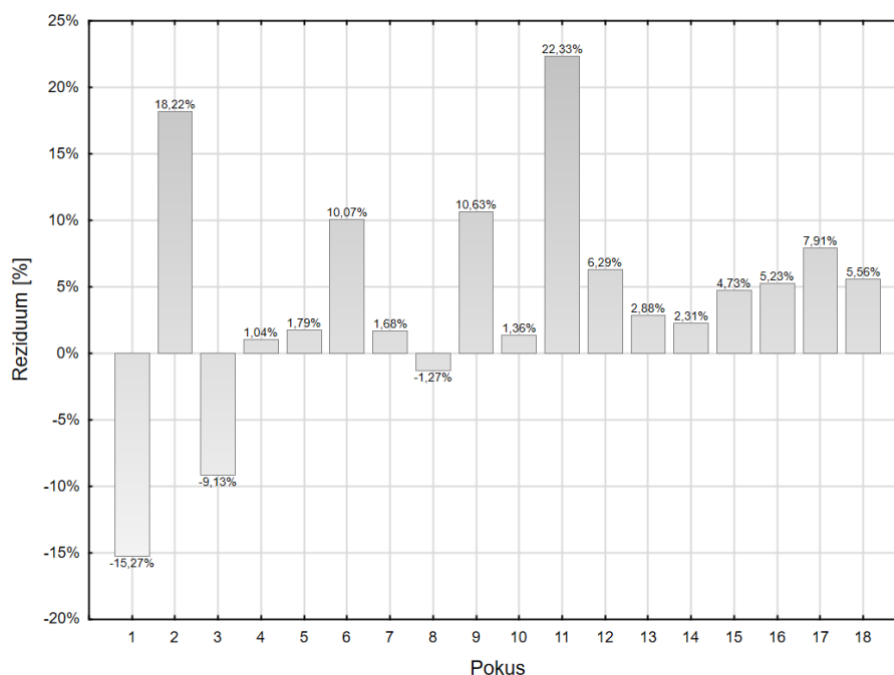
Obrázek 4.2 Vliv jednotlivých faktorů na změnu velikosti hlavní složky řezné síly F_c

Posledním nezbytným krokem pro dosažení komplexní analýzy, stvrzení správnosti a adekvátnosti zvoleného modelu je ověření reziduí. Jedná se o rozdíl mezi skutečně naměřenými hodnotami a predikovanými hodnotami, jež jsou vypočítané dle predikčního modelu, a to s ohledem na jejich rozdělení a autokorelaci. Výsledná hodnota Durbin-Watsonova testu odpovídá hodnotě 2,44997, kdy spočtená hodnota významnosti se rovná 0,7542, což udává, že lze přijmout nulovou statistickou hypotézu o neexistenci autokorelace. Opět bylo dosaženo Gaussova rozdělení reziduí (viz Obrázek 4.3), což vychází z dosažené hladiny významnosti Shapiro-Wilksova testu. Celkovým výsledkem je opětovné potvrzení predikčního modelu, že je statisticky a zároveň numericky korektní.



Obrázek 4.3 Grafická analýza reziduí pro F_c

Pro názornější představu slouží následující Obrázek 4.4, který představuje vyjádření hodnot reziduí jako procentuální odchylku vypočtených a naměřených hodnot pro jednotlivé body plánu experimentu.



Obrázek 4.4 Rezidua pro jednotlivé body plánu experimentu pro F_c

4.2 Validace experimentu

Pro závěrečné ověření stanoveného modelu je nezbytné provést validační experiment, jenž se skládá ze dvou částí. První část validace probíhá měřením hlavní složky řezné síly F_c , kdy jsou zvoleny zcela náhodné řezné podmínky ze stanovených intervalů. Průběh validačního experimentu ve většině částí odpovídá hlavnímu experimentu. Rozdíl lze spatřovat např. v počtu opakování měření. Každý bod nebyl měřen šestkrát, ale byl změřen pouze jednou.

Druhá část validace tkví ve výpočtu hlavní složky řezné síly s využitím navrženého modelu, který zastupuje rovnice (26). Pomocí následujícího vztahu (27) se spočetla procentuální chyba navrženého modelu ve srovnání s naměřenou hodnotou:

$$Chyba_i = \frac{m_i - v_i}{m_i} \cdot 100 [\%] \quad (27)$$

kde: m_i – změřená hodnota v i -tém bodě

v_i – vypočítaná hodnota v i -tém bodě

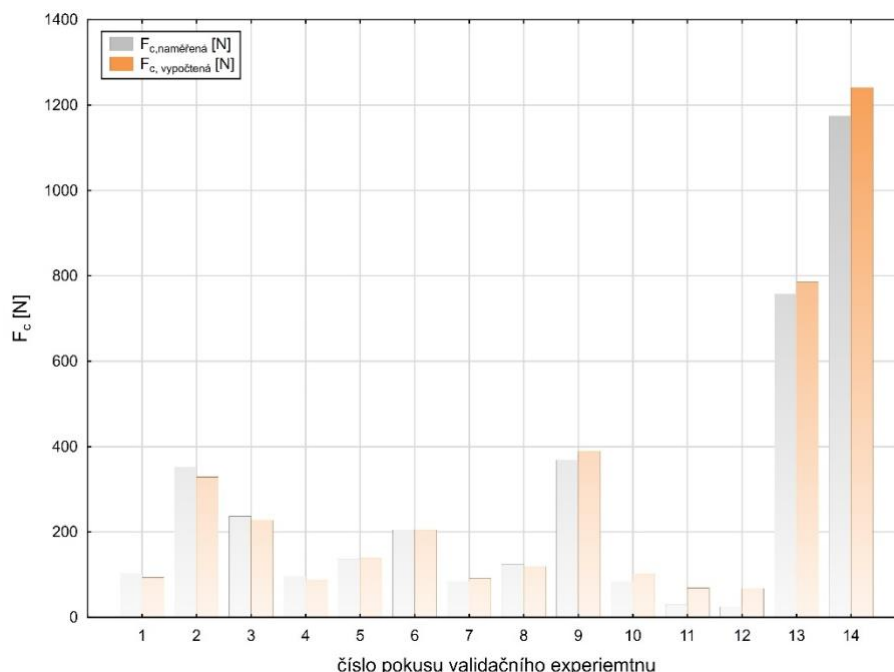
i – počet bodů porovnání od 1 do n

Tabulka 13 udává jak navržené náhodné řezné podmínky ze stanovených intervalů, tak zároveň jsou v ní uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty hlavní složky řezné síly F_c . Zároveň popisuje i chybu modelu u jednotlivých bodů měření, kdy průměrná chyba odpovídá 7 %. Pouze u měření č. 10 došlo k překročení 10 %, což mohlo být způsobeno např. nezachycenou chybou měření či otupením břitu nástroje. V ostatních případech model dosahuje velmi malé procentuální chyby a lze říci, že model pro navržené intervaly řezných podmínek je funkční.

Tabulka 13: Validační experiment

Číslo měření	v_c [m/min]	f [mm/ot]	a_p [mm]	F_c změřená [N]	F_c vypočtená [N]	Chyba [%]	Průměrná chyba [%]
1	341	0,08	0,42	103	93,46	9,26	7
2	68	0,18	0,69	352,8	329,07	6,73	
3	246	0,13	0,71	236,9	228,01	3,75	
4	377	0,03	0,91	96,06	86,65	9,8	
5	142	0,17	0,30	136,7	139,25	1,87	
6	81	0,14	0,48	204,7	204,69	0,01	
7	181	0,10	0,28	84,33	91,29	8,25	
8	310	0,09	0,50	123,9	119,59	3,48	
9	194	0,19	0,88	368,5	388,89	5,53	
10	112	0,12	0,22	84,08	102,50	21,91	

Pro přehledné přesvědčení o správnosti modelu je předložen následující Obrázek 4.5, jenž graficky znázorňuje experimentálně naměřenou hodnotu F_c (šedá barva) v porovnání s vypočtenou hodnotou F_c (oranžová barva), kdy hodnoty byly získány pomocí vytvořeného modelu podle výše zmíněného postupu. Měření číslo 11-14 jsou vysvětlena v následující podkapitole 4.2.1.



Obrázek 4.5 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot F_c při validačním experimentu

4.2.1 Zkouška modelu pro neodpovídající řezné podmínky

Zároveň byl při validačním experimentu proveden test modelu, kdy byly použity řezné podmínky, jež jsou mimo stanovené intervaly, pro které byl model navržen. Cílem tohoto testu bylo vyzkoušení platnosti modelu pro řezné podmínky, ze kterých model nevychází.

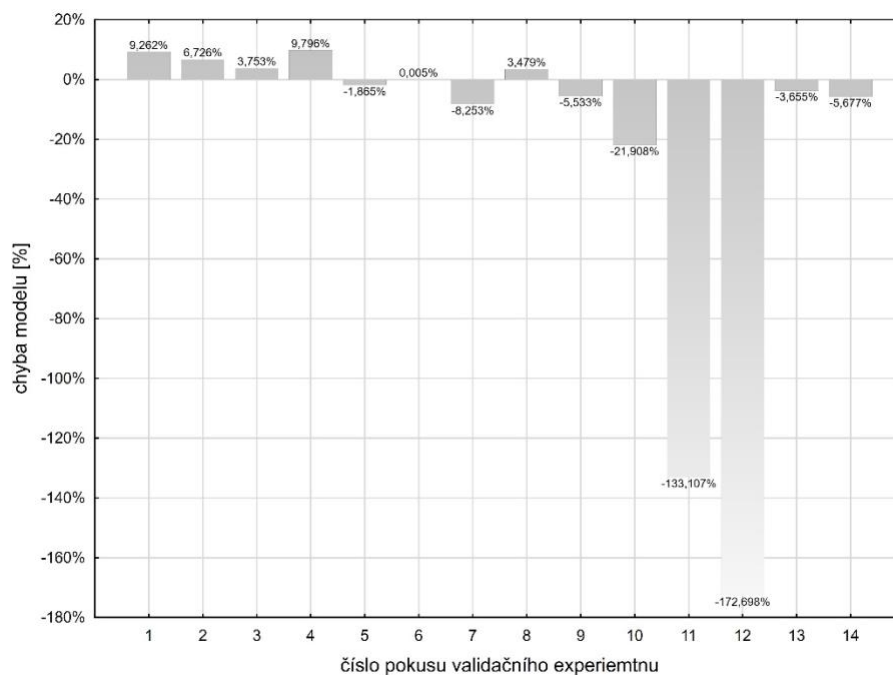
Na základě výše zmíněného byly navrženy náhodné podmínky mimo stanovené intervaly, které jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tabulka 14).

Tabulka 14: Zkouška modelu pro neodpovídající řezné podmínky

Číslo měření	v_c [m/min]	f [mm/ot]	a_p [mm]	F_c změřená [N]	F_c vypočtená [N]	Chyba [%]
11	26	0,006	0,100	29,51	68,79	133,11
12	32	0,008	0,120	24,87	67,82	172,7
13	433	0,280	1,300	757,9	785,60	3,66
14	462	0,320	1,800	1174,3	1240,96	5,68

Ze získaných výsledku lze usuzovat, že navržený model je zcela nevyhovující pro řezné podmínky pod dolní hranicí stanovených intervalů. Zmíněné je způsobeno mnohem menším úběrem, než je zaoblení špičky destičky, které se u tohoto typu destičky pohybuje v rozmezí 0,015-0,02 mm, a tím došlo ke značné změně průřezu třísky.

Naopak při překročení horní hranice stanovených intervalů model poskytuje stále velmi přesné výsledky, jelikož zde již vliv zaoblení špičky destičky je zanedbatelný. Zároveň ale bude platit teze, že čím vzdálenější řezné podmínky budou od horní hranice intervalů, tak tím se přesnost modelu bude snižovat. Uvedený Obrázek 4.6 udává procentuální chybovost modelu při porovnání vypočtené hodnoty F_c s naměřenými hodnotami během validačního experimentu.

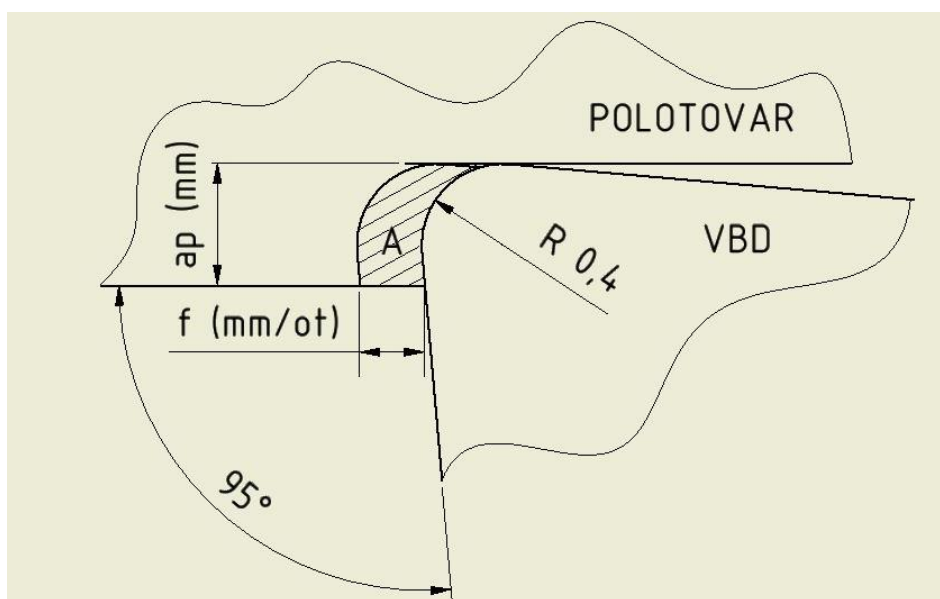


Obrázek 4.6 Procentuální chyba modelu F_c pro validační experiment

4.3 Výpočet řezného odporu

Pro správné vyhodnocení provedeného experimentu je zásadní dodržení již výše zmíněné nezávislosti vstupních proměnných, proto nejprve bylo nutností změřit hlavní složku řezné síly F_c , jelikož řezný odpor k_c je funkcí více proměnných, kterými jsou a_p , f , F_c , a v_c , kdy zároveň hlavní složka řezné síly F_c je funkcí a_p , f a v_c , čímž by zmíněná podmínka nezávislosti vstupních proměnných dodržena nebyla, kdyby se zjišťoval řezný odpor přímo.

Pro výpočet řezného odporu byl využit následující vztah (28). Průřez odřezávané vrstvy A_D byl zjištěn pomocí vymodelování třísky v softwaru Inventor, jenž znázorňuje Obrázek 4.7. Důvodem zmíněného bylo hlavně zpřesnění výpočtu pro měření, kdy hloubka řezu a_p byla menší než poloměr zaoblení špičky destičky. Kdyby v tomto případě byly k výpočtu využity řezné podmínky (f , a_p), tak by došlo ke snížení výpočetní hodnoty výpočtu.



Obrázek 4.7 Schéma úběru třísky o průřezu A_D

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \text{ [MPa]} \quad (28)$$

kde: F_c – hlavní složka řezné síly [N]

A_D – průřez odřezávané vrstvy [mm²]

V Tabulce 15 jsou uvedeny vypočtené hodnoty řezného odporu k_c pro stanovené řezné podmínky a pro změřenou hlavní složku řezné síly F_c .

Tabulka 15: Vypočtené hodnoty řezného odporu

Č. m.	v_c [m/min]	f [mm/ot]	a_p [mm]	A [mm ²]	F_c [N]	k_c [MPa]
1	120,94	0,05	0,36	0,01798697	72,62	4037,09
2	329,06	0,05	0,36	0,01798697	67,20	3736,15
3	120,94	0,16	0,36	0,05722189	151,45	2646,71
4	329,06	0,16	0,36	0,05722189	137,97	2411,09
5	120,94	0,05	0,84	0,04198697	146,17	3481,25
6	329,06	0,05	0,84	0,04198697	127,65	3040,23
7	120,94	0,16	0,84	0,13402189	349,93	2611,01
8	329,06	0,16	0,84	0,13402189	311,35	2323,13
9	50,00	0,11	0,60	0,06586500	239,68	3639,00
10	400,00	0,11	0,60	0,06586500	168,15	2552,95
11	225,00	0,01	0,60	0,00599990	42,97	7161,79
12	225,00	0,20	0,60	0,11932237	288,72	2419,64
13	225,00	0,11	0,20	0,02186500	68,44	3130,03
14	225,00	0,11	1,00	0,10986500	273,43	2488,81
15	225,00	0,11	0,60	0,06586500	175,07	2657,97
16	225,00	0,11	0,60	0,06586500	176,00	2672,13
17	225,00	0,11	0,60	0,06586500	181,12	2749,82
18	225,00	0,11	0,60	0,06586500	176,62	2681,50

Pro ověření vypočtených hodnot řezného odporu k_c se získané hodnoty opět podrobí obdobné statistické analýze jako byla vytvořena pro hlavní složku řezné síly F_c . Dále se pomocí této analýzy nalezne model a hledaná závislost na řezných podmínkách, která se bude simulovat pomocí rovnice ve všeobecném tvaru:

$$k_c = f(v_c, f, a_p) \text{ [MPa]} \quad (29)$$

Zmíněnou analýzu si lze dovolit provést, jelikož oné nezávislosti vstupních proměnných se dosáhne pomocí náhrady hloubky řezu a_p a posuvu f za průřez odřezávané vrstvy A_D , který byl získán pomocí CAD modelu. Tím se docílí možnosti vytvoření relativně vhodného modelu i pro řezný odpor k_c , a to za účelem vytvoření grafů závislosti a k ověření vypočtených hodnot přes naměřenou hlavní složku řezné síly F_c .

Po nalezení vhodného modelu se rozebírá druhá část regresivní trojice, a to model. Tabulka 16 udává shrnutí analýzy vhodnosti modelu při působení faktorů na změnu hodnoty řezného

odporu k_c , kdy podíl variability hodnoty k_c (RSquare) se rovná hodnotě 91,1458 % a upravený index determinace (RSquare Adj), který podmiňuje míru vysvětlení variability dat daným modelem, nabývá hodnoty 89,2485 %. Z hodnoty upraveného indexu determinace vyplývá, že vytvořený model je funkčním modelem a lze s ním dále pracovat. Průměrná chyba modelu se rovná hodnotě 369,0321 MPa a průměrná hodnota řezného odporu odpovídá hodnotě 3135,572 MPa.

Tabulka 16: Shrnutí vhodnosti modelu pro řezný odpor k_c

RSquare	0,911458
RSquare Adj	0,892485
Root Mean Square Error	369,0321
Mean of Response	3135,572
Observations (or Sum Wgts)	18

Tabulka 17 udává, že variabilita způsobená náhodnými chybami je menší než variabilita naměřených hodnot stanovená modelem a hodnota dosažené hladiny významnosti (Prob>F) vyjadřuje adekvátní stanovení modelu, jenž vychází z Fisher-Snedecorova testovacího kritéria. Testovaná nulová statistická hypotéza říká, že žádný z členů v modelu nemá vliv na hodnotu zjišťované proměnné. Pro celou práci byla stanovena hladina významnosti na 5 %. Při porovnání dosažené hodnoty Prob>F se zmíněnou hladinou významnosti vychází, že hodnota Prob>F je menší než hladina významnosti, což znamená, že v modelu existuje alespoň jeden nenulový člen, jenž má vliv na hodnotu zjišťované proměnné.

Tabulka 17: Analýza ANOVA modelu pro k_c

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob > F
Model	3	19626592	6542197	48,0392	<,0001*
Error	14	1906586	136185		
C. Total	17	21533178			

Dalším krokem je test chyby nedostatečného přizpůsobení modelu, jenž testuje, zda je variabilita reziduí větší než variabilita uvnitř skupin. Hodnota Fisherova testovacího kritéria převedená do pravděpodobnostního měřítka (Prob>F) odpovídá hodnotě 0,0544 a při porovnání s hladinou významnosti 5 % se dochází k závěru, že není dostatek důkazů na to, aby bylo možné nulovou statistickou hypotézu zamítnout, kdy nulová statistická hypotéza udává, že rozptyl reziduí je menší nebo roven rozptylu uvnitř skupin. Výsledkem je, že model je dostatečný.

Při splnění výše uvedených dvou základních předpokladů kladených na model vychází, že model je adekvátní a dostatečný a lze vytvořit tabulku odhadů parametrů modelu (viz Tabulka 18).

Tabulka 18: Odhad parametrů modelu pro k_c

Term	Estimate	Std Error	t Ratio	Prob> t	Lower 95%	Upper 95%	VIF
<i>Intercept</i>	2659,094	115,3859	23,05	<,0001*	2411,616	2906,572	.
x_1	-226,404	99,85936	-2,27	0,0397*	-440,581	-12,2273	1,000
x_2*x_2	628,0072	99,92708	6,28	<,0001*	413,685	842,3295	1,000
$x_2*x_2*x_2$	-504,374	50,56903	-9,97	<,0001*	-612,834	-395,915	1,000

* - signifikantní na hladině významnosti $\alpha = 0,05$

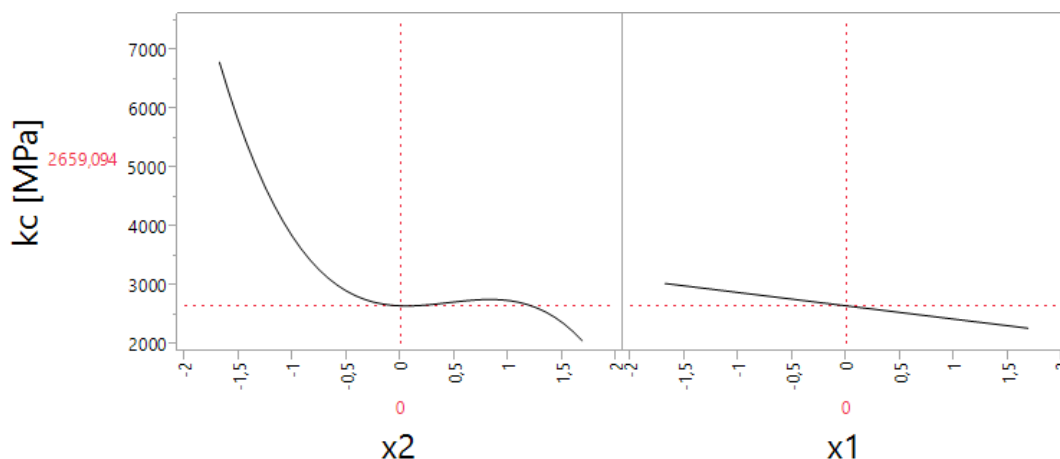
Pomocí odhadů parametrů modelu se dále sestaví statistická predikční závislost v kódovaném tvaru:

$$\hat{y} = 2659,094 - 226,404 \cdot x_1 + 628,007 \cdot x_2^2 - 504,374 \cdot x_2^3 \quad (30)$$

Pomocí převodového vztahu (22) a statistické rovnice (30) se rovnice převede na vztah popisující zkoumanou závislost pro řezný odpor:

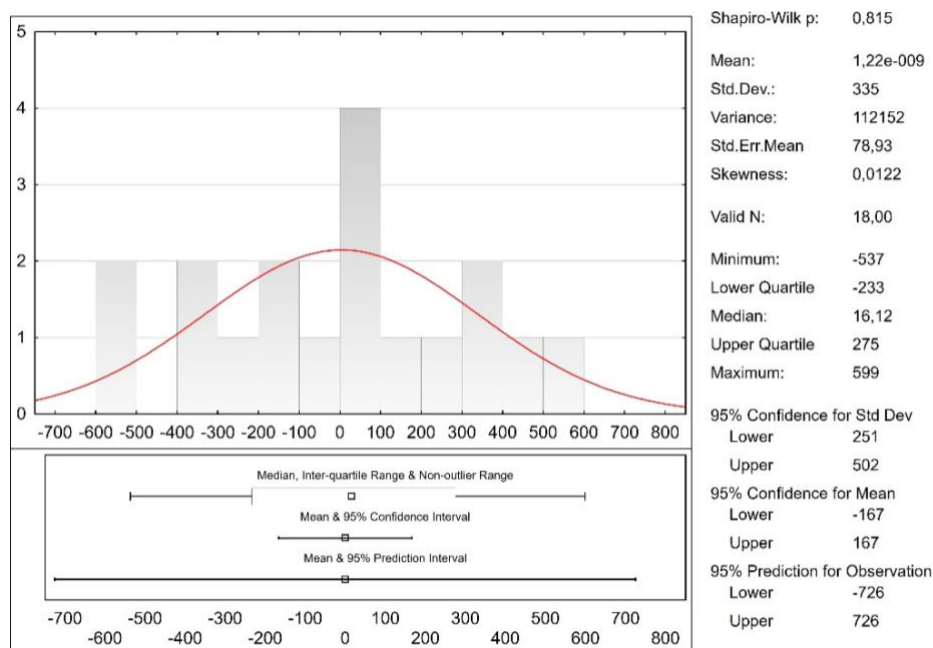
$$k_c = -588277.008 * f^3 + 263716.698 * f^2 - 36663.218 * f - 1.294 * v_c + 4575.164 \quad (31)$$

Již zde se dojde k potvrzení toho, že hloubka řezu a_p jako vliv na řezný odpor není významná, jelikož při tvorbě statistického predikčního vztahu faktor x_3 svoji významnost ztratí a již v navrženém modelu nefiguruje. Z Tabulky 18 vychází jako nejvíce signifikantní vliv posuv. Vliv jednotlivých faktorů je znázorněn na následujícím obrázku (Obrázek 4.8).



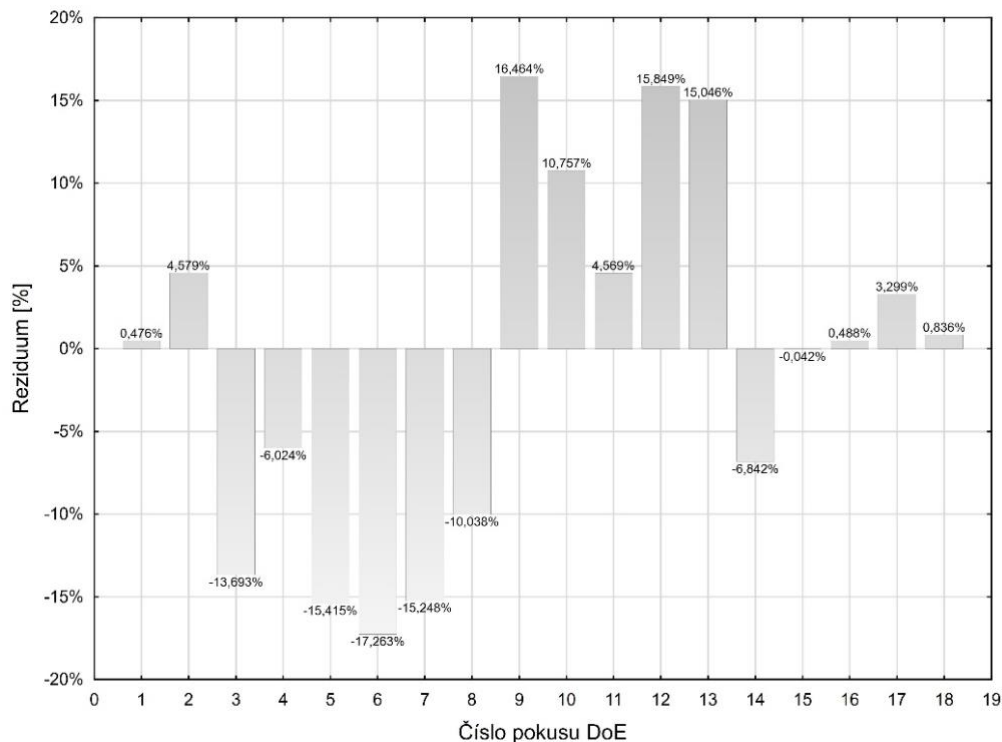
Obrázek 4.8 Vliv jednotlivých faktorů na změnu velikosti řezného odporu k_c

Pro provedení komplexní analýzy, potvrzení správnosti a vhodnosti zvoleného modelu je nezbytné ověřit rezidua, rozdíl mezi vypočtenými pomocí naměřených dat a predikovanými hodnotami pomocí modelu, a to z hlediska jejich rozdělení a autokorelace. Výsledkem Durbin-Watsonova testu je hodnota 2,0052, kdy spočtená hodnota významnosti odpovídá hodnotě 0,2391, což stanovuje, že lze přijmout nulovou statistickou hypotézu o neexistenci autokorelace. Dosáhnutá hladina významnosti Shapiro-Wilksovoho testu znamená Gaussovo rozdělení reziduí (viz Obrázek 4.9). Závěrem lze konstatovat, že predikční model je jak statisticky, tak i numericky korektní.



Obrázek 4.9 Grafická analýza reziduí pro k_c

Pro lepší představu slouží následující Obrázek 4.10, jenž představuje vyjádření hodnot reziduí jako procentuální odchylku hodnot vypočtených pomocí modelu a hodnot vypočtených pomocí naměřených dat pro jednotlivé body plánu experimentu.



Obrázek 4.10 Rezidua pro jednotlivé body plánu experimentu pro k_c

4.3.1 Ověření pomocí měrného řezného odporu

Součástí cílů práce bylo zároveň ověření platnosti vztahu (19), který běžně slouží pro výpočet řezného odporu. Vztah (19) byl upraven do podoby (31) pro stanovení měrného řezného odporu k_{c1} . Pomocí vypočtených řezných odporů k_c , které byly stanoveny podle předchozí kapitoly 4.3, dojde k výpočtu měrného řezného odporu k_{c1} , a to pro každé měření zvlášť.

$$k_{c1} = \frac{k_c}{f^{m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right)} \text{ [MPa]} \quad (31)$$

kde: k_c – řezný odpor [MPa]

f – posuv na otáčku [mm]

γ_o – úhel čela v ortogonální rovině [°], $\gamma_o=7^\circ$

m_c – koeficient vyjadřující intenzitu změny měrného řezného odporu v závislosti na tloušťce třísky [-], $m_c=0,25$

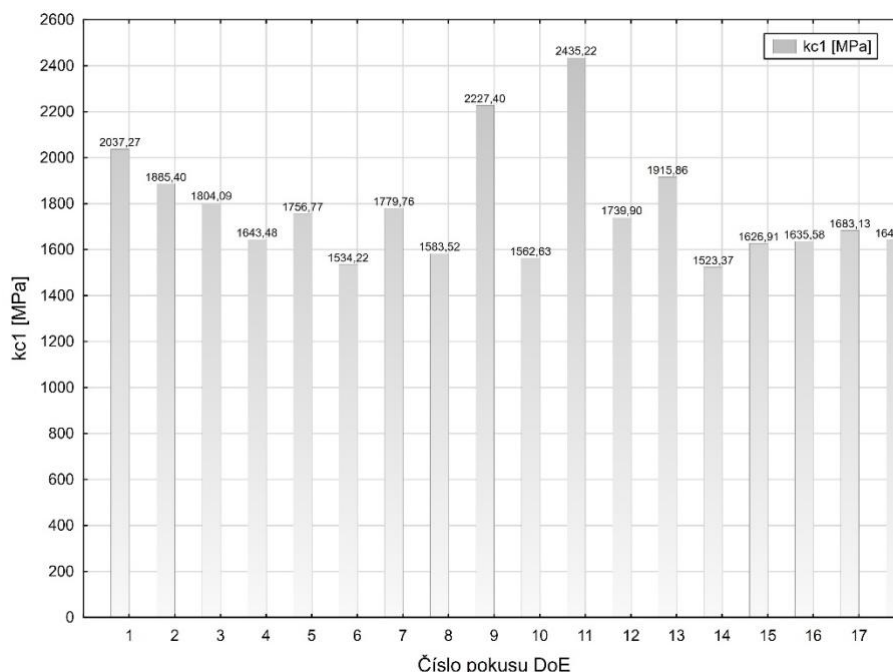
Tabulka 19 udává vypočtené hodnoty měrných řezných odporů k_{c1} pro jednotlivá měření dle vztahu (31). Následně získané hodnoty se porovnají s tabulkovou hodnotou měrného řezného odporu pro zvolenou ocel 1.4301.

Tabulka 19: Vypočtené hodnoty měrného řezného odporu

Č. m.	f [mm/ot]	k_c [MPa]	k_{c1} [MPa]
1	0,05	4037,09	2037,27
2	0,05	3736,15	1885,40
3	0,16	2646,71	1804,09
4	0,16	2411,09	1643,48
5	0,05	3481,25	1756,77
6	0,05	3040,23	1534,22
7	0,16	2611,01	1779,76
8	0,16	2323,13	1583,52
9	0,11	3639,00	2227,40
10	0,11	2552,95	1562,63
11	0,01	7161,79	2435,22
12	0,20	2419,64	1739,90
13	0,11	3130,03	1915,86
14	0,11	2488,81	1523,37
15	0,11	2657,97	1626,91
16	0,11	2672,13	1635,58
17	0,11	2749,82	1683,13
18	0,11	2681,50	1641,31

V teoretickém případě by výsledkem vypočteného měrného řezného odporu pro jednotlivá měření měla být jedna hodnota, jenž je rovna tabulkové, která odpovídá velikosti $k_{c1}=1800$ MPa. Jak si lze z následujícího obrázku povšimnout (viz Obrázek 4.11), vypočtené hodnoty k_{c1} se pohybují v intervalu od 1583 do 2435 MPa. Jestliže se ze zmíněných hodnot stanoví aritmetický průměr, který lze využít, jelikož hodnoty dosahují normálního rozdělení (Gaussovo křivky), tak vychází shrnující hodnota 1778,66 MPa, kterou lze považovat za vypovídající a za relativně odpovídající tabulkové hodnotě, která je do značné míry idealizovaná a orientačně stanovena. V závislosti na zmíněném, lze říci, že platnost vztahu (19) byla prokázána. Kdy uváděný vztah lze využít pro orientační určení řezného odporu pro známé materiály při navržených posuvech či naopak lze takto přes experiment a následný výpočet stanovit tabulkové hodnoty pro materiály, které v tabulkách zatím zaneseny nejsou.

Dále je možno konstatovat, že výpočet měrného řezného odporu k_{c1} posloužil k ověření správnosti provedení experimentu, jelikož získaná hodnota téměř odpovídá tabulkové, jelikož chyba vypočtené hodnoty vůči tabulkové hodnotě byla stanovena na 1,19 %.



Obrázek 4.11 Zobrazení hodnot měrného řezného odporu pro jednotlivá měření

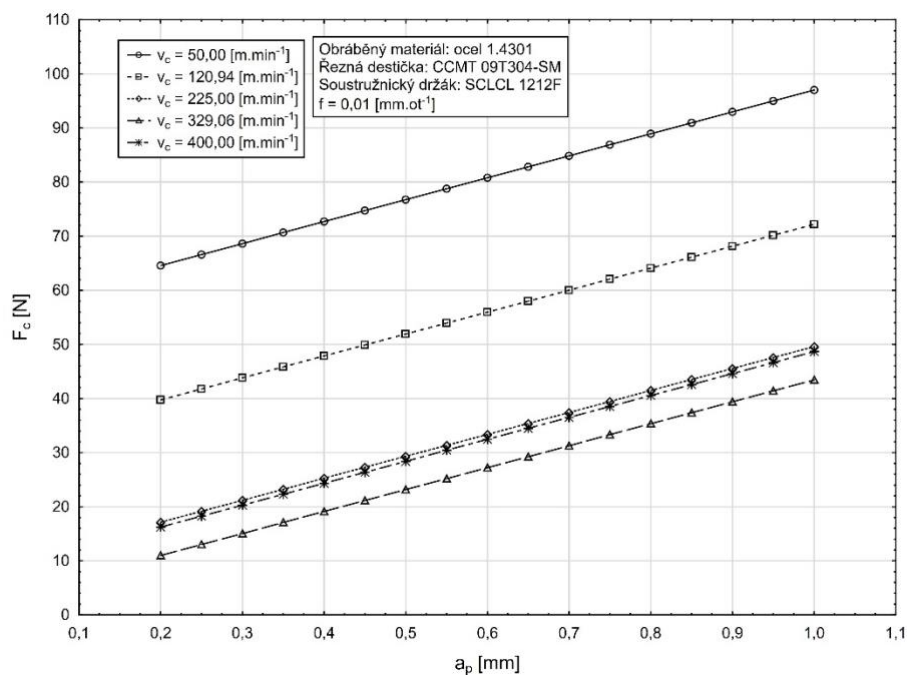
4.4 Vyhodnocení vlivů faktorů na hlavní složku řezné síly a řezný odpor

Pomocí navržených modelů pro hlavní složku řezné síly F_c a řezný odpor k_c , byly vytvořeny grafy závislosti, které popisují vlivy řezných podmínek.

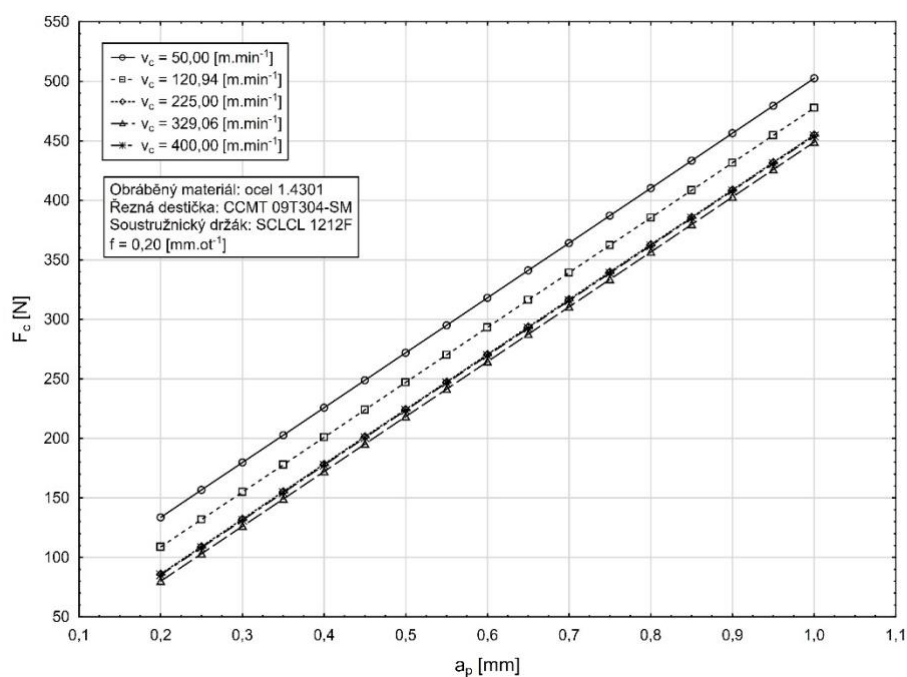
4.4.1 Hlavní složka řezné síly F_c

Z rešerše vyplývají tvrzení, že posuv na otáčku společně s hloubkou řezu mají zásadní vliv na velikost hlavní složky řezné síly F_c , kdy zvyšující se hodnota v obou případech znamená nárůst hlavní složky řezné síly. Průběh závislosti hloubky řezu by měl odpovídat lineárnímu průběhu a mělo by se dle rešerše jednat o faktor, který má největší vliv na F_c . Pro posuv by mělo platit, že pod hodnotou 0,05 mm/ot dojde k většímu nárůstu řezné síly vlivem zaoblení ostří nástroje. Dle rešerše zvyšování velikosti řezné rychlosti má po překonání bodu zlomu působit tak, že dojde k pozvolnému poklesu hlavní složky řezné síly až se dosáhne hodnoty, kdy řezná síla zůstává nadále téměř konstantní. Tento faktor má mít nejmenší vliv.

Z porovnání následujících dvou grafů (Obrázek 4.12 a Obrázek 4.13) vyplývá tvrzení lineární průběh závislosti, kdy při zvyšování hodnoty hloubky řezu a_p dochází k nárůstu velikosti hlavní složky řezné síly F_c . Zároveň je zde dobře znázorněn vliv posuvu f , který se projevuje, že při vyšší hodnotě posuvu f je průběh strmější a vliv řezné rychlosti se tím v konečném důsledku snižuje.



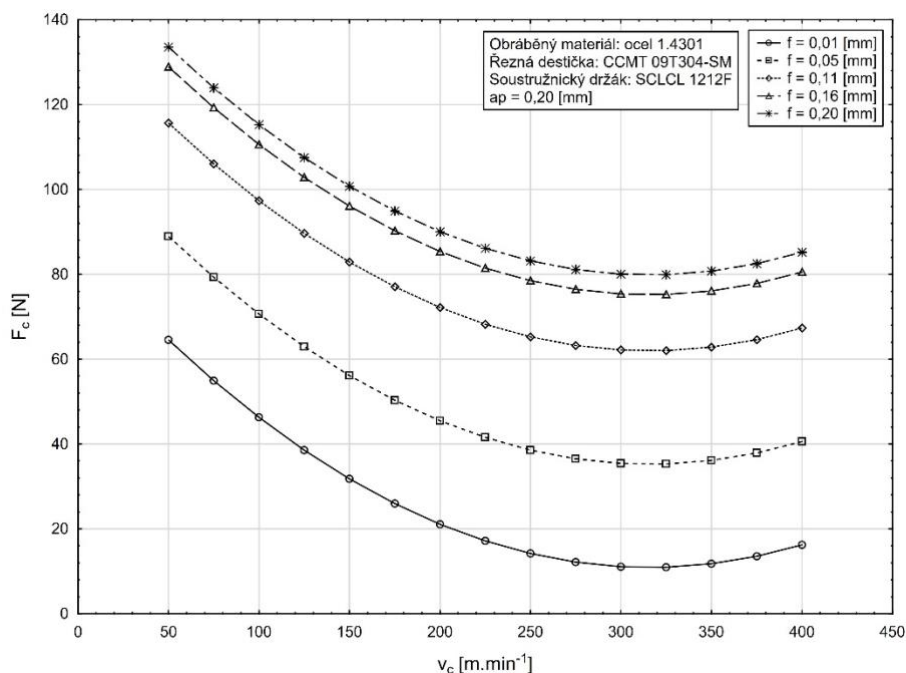
Obrázek 4.12 Závislost hlavní složky řezné síly na změně hloubky řezu při $f=0,01$ [mm/ot]



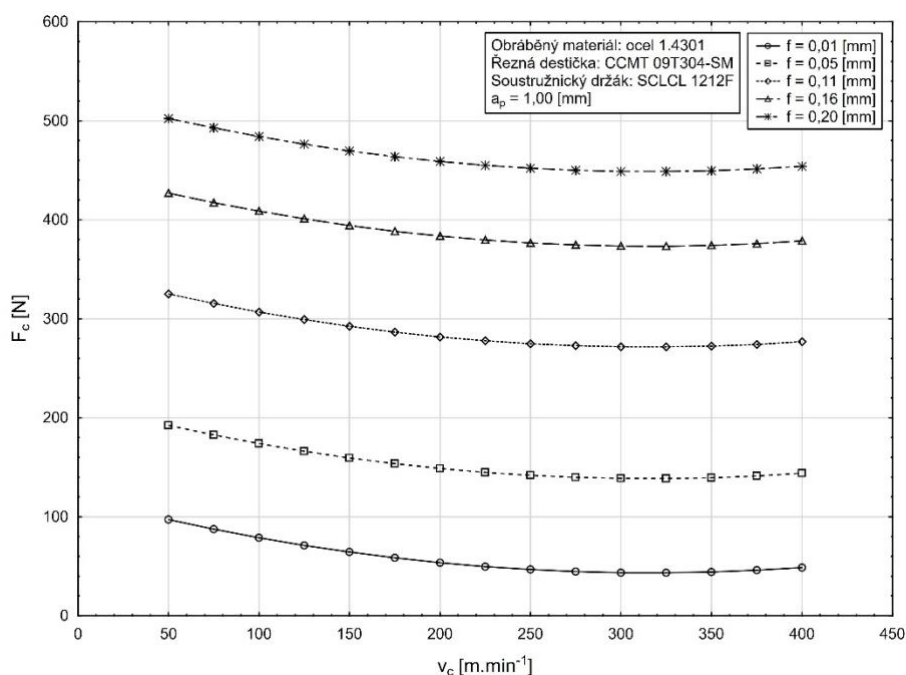
Obrázek 4.13 Závislost hlavní složky řezné síly na změně hloubky řezu při $f=0,20$ [mm/ot]

Následující dva grafy přehledně vypovídají o průběhu vlivu řezné rychlosti v_c a hloubky řezu a_p na hlavní složku řezné síly F_c . Experimentální měření potvrdilo teze z rešerše, že při překročení bodu zlomu zvyšováním řezné rychlosti dochází ke snižování velikosti hlavní složky řezné síly. U následujícího grafu (Obrázek 4.14) si lze povšimnout, že na horní hranici intervalu řezné rychlosti dochází ke změně, kdy hlavní složka řezné síly stoupá. Zmíněný nárůst vůči vlivu ostatních řezných podmínek je relativně zanedbatelný, jak lze zpozorovat při porovnání s grafem pro hloubku řezu, jež je vytvořen pro $a_p=1$ mm (viz Obrázek 4.15). Uvedené grafy (Obrázek 4.14 a Obrázek 4.15) také poukazují na značný vliv hloubky řezu na velikosti hlavní složky řezné síly, jelikož při hloubce řezu $a_p=0,2$ mm, se F_c pohybuje

přibližně v rozmezí od 18 do 130 N, kdy při změně hloubky řezu na $a_p=1$ mm se hlavní složka řezné síly F_c již pohybuje v intervalu od 60 do 500 N a vliv řezné rychlosti se tím relativizuje.

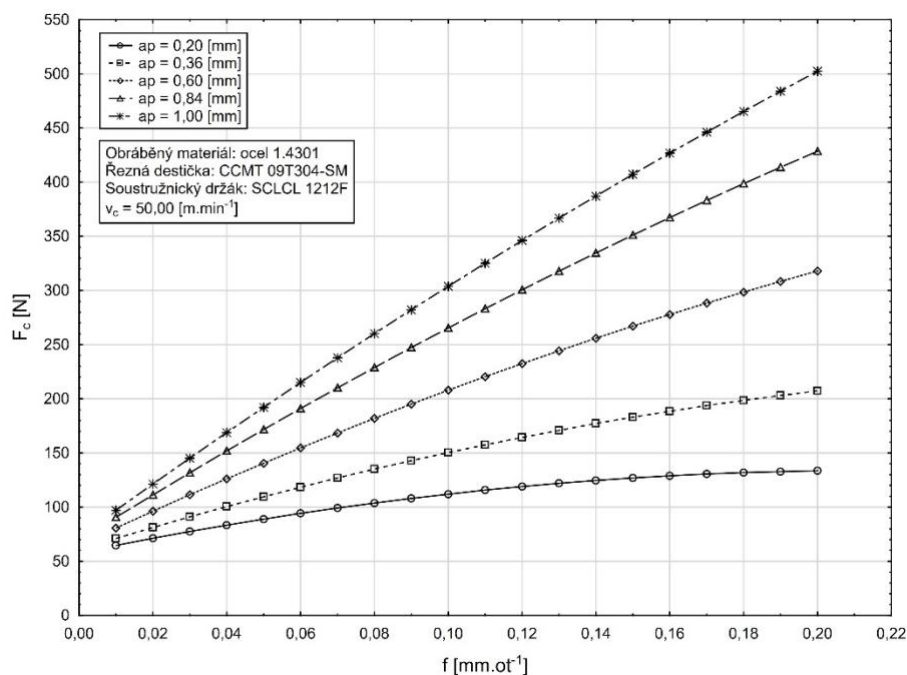


Obrázek 4.14 Závislost hlavní složky řezné síly na změně řezné rychlosti při $a_p=0,20$ [mm]

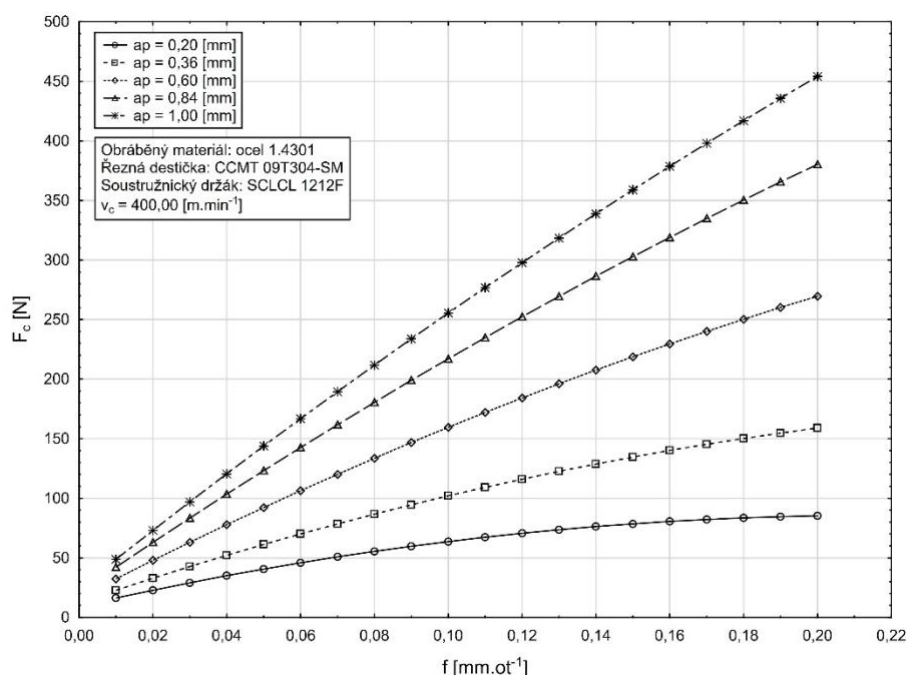


Obrázek 4.15 Závislost hlavní složky řezné síly na změně řezné rychlosti při $a_p=1$ [mm]

Přesto vliv řezné rychlosti není zanedbatelný, a to zvláště při malých hodnotách posuvu či hloubky řezu, což znázorňují následující grafy (Obrázek 4.16 a Obrázek 4.17). Při důsledném porovnání se dojde k výsledku, že změna řezné rychlosti z 50 na 400 m/min způsobila snížení hlavní složky řezné síly F_c přibližně o 50 N.



Obrázek 4.16 Závislost hlavní složky řezné síly na změně posuvu při $v_c=50 \text{ [m/min]}$



Obrázek 4.17 Závislost hlavní složky řezné síly na změně posuvu při $v_c=400 \text{ [m/min]}$

Zjištěné lze shrnout, že experimentální měření se shoduje s teoretickými základy, jež jsou popsány v rešerši. Velmi významnými faktory jsou posuv a hloubka řezu, kdy nárůstem jejich hodnot dojde ke značnému nárůstu velikosti hlavní složky řezné síly. Přesto vliv řezné rychlosti není zanedbatelný, a to hlavně při nízkých hodnotách posuvu nebo hloubky řezu, kdy se řezná rychlost poměrně značně projeví na velikosti hlavní složky řezné síly.

Dále byl zaznamenán rozdíl mezi teorií a naměřenými výsledky, kdy u horní hranice intervalu řezné rychlosti došlo ke změně průběhu, a to k malému nárůstu velikosti řezné síly a dalšímu pozvolnému stoupání. Zmíněnou diferenci lze přičíst určité zastaralosti teoretických tezí, jelikož při konstatování uváděného průběhu nebyly takto vysoké řezné rychlosti

ještě využívány, což v dnešní době umožňuje rozsáhlá inovace nejen materiálů nástrojů. Zároveň nedošlo k projevení teorií předpovídaného nárůstu řezné síly u hodnot posuvu, který je menší než zaoblení špičky nástroje.

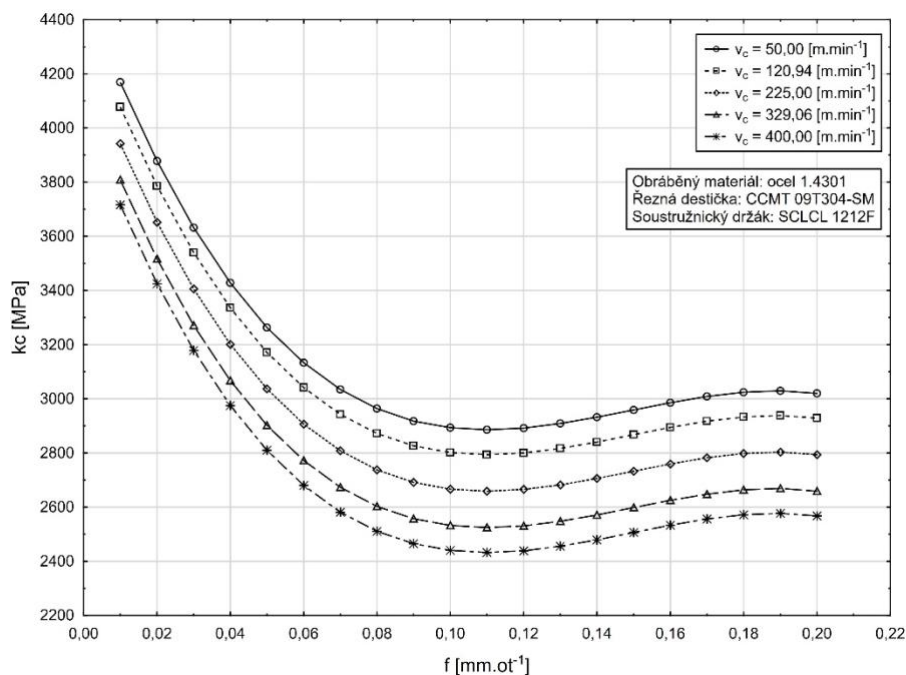
4.4.2 Řezný odpor k_c

Zpracovaná rešerše k řeznému odporu k_c předkládá teze, že největší vliv má šířka odřezávané vrstvy neboli posuv f . Zvyšování hodnoty posuvu se promítne ve snižování velikosti řezného odporu k_c , jelikož zvětšováním posuvu nastává snižování poměrné hodnoty deformační práce, protože se zmenšuje stupeň zpevnění materiálu a podíl pasivních prací na tvorbu třísky, kdy strmost průběhu závisí na druhu materiálu.

Nezanedbatelný vliv na řezný odpor má také řezná rychlost, která se projevuje relativně obdobně jako u řezné síly, kdy po překonání určité hodnoty řezné rychlosti dochází s růstem rychlosti k následnému poklesu řezného odporu, což je způsobeno ovlivňováním velikosti oblasti OMNO, intenzity primární deformace a ovlivňováním teploty deformovaného materiálu a působením na velikost součinitele tření.

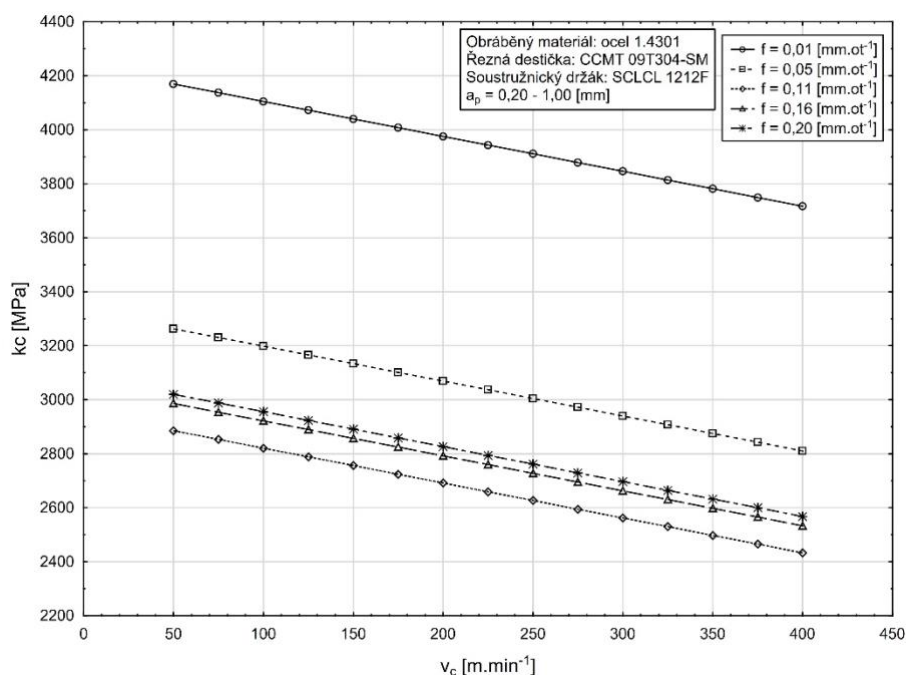
Teorie udává, že hloubka řezu má na řezný odpor jen velmi malý vliv, kdy zvyšováním hloubky řezu by mělo dojít ke snížení řezného odporu. Vliv hloubky řezu na zpevnění obráběného materiálu ve srovnání s posuvem je výrazně menší. Vytyčené předpoklady v rešerši pro hloubku řezu a_p již byly potvrzeny při provedení analýzy řezného odporu, jelikož při tvorbě statistického predikčního vztahu vyjde faktor x_3 , jenž reprezentuje hloubku řezu a_p , jako nevýznamný. Proto lze konstatovat, že v řešeném případě má hloubka řezu zanedbatelný vliv na řezný odpor, a proto dále není zanesena v uváděných grafech.

Analýzou bylo potvrzeno, že nejvýznamnějším faktorem, jenž ovlivňuje řezný odpor je posuv. Zároveň Obrázek 4.18 názorně potvrzuje tezi, že se zvyšujícím posuvem klesá velikost řezného odporu. Zároveň došlo k potvrzení předpokladu, že při hodnotách posuvu, které jsou menší než zaoblení špičky nástroje (u tohoto typu destiček výrobce udává hodnotu 0,015-0,02 mm), dochází k rapidnímu nárůstu hodnoty řezného odporu. To je způsobeno vyšším pěchováním materiálu, což v konečném důsledku zhoršuje odřezávání třísky. Přesto vytvořený model pro spodní hranici intervalu nedostatečně reflektuje skutečnost. Zmíněné potvrzuje výpočet z experimentálně naměřených hodnot, kdy při posuvu $f=0,01$ mm/ot se řezný odpor rovná hodnotě $k_c=7161,79$ MPa. Zmíněná nedostatečnost modelu je způsobena tvorbou modelu z funkce $k_c(f, v_c)$, kdy hodnota vypovídající úrovně modelu odpovídá 89 %, což o modelu sice říká, že je funkčním modelem, ale je potřeba počítat s určitou chybovostí zvláště u krajních hodnot stanoveného intervalu. Proto v tomto případě je třeba se přiklonit k hodnotě, jenž byla získána výpočtem z experimentálně naměřených hodnot, kdy řezný odpor odpovídá funkci $k_c(F_c, A_D)$.



Obrázek 4.18 Závislost řezného odporu na změně posuvu a řezné rychlosti

Obrázek 4.19 přehledně udává vliv řezné rychlosti na řezný odpor a při srovnání s předchozím grafem (Obrázek 4.18) vyplývá, že tento vliv je rapidně menší.



Obrázek 4.19 Závislost řezného odporu na změně řezné rychlosti a posuvu

Závěrem lze konstatovat, že se povedlo ověřit teoretické základy pomocí experimentu a následné analýzy naměřených hodnot, a tím prokázat platnost vytyčených teoretických předpokladů. Potvrzené teze jsou zásadní pro navrhování řezných podmínek pro proces soustružení, jelikož hodnoty řezných podmínek v sobě musí reflektovat jak zájem na vytvoření co nejlepšího povrchu, ale také dosažení nižšího zatížení stroje a nástroje, čímž dojde k celkovému prodloužení životnosti výbavy a tím k úspoře jak času, tak i financí.

5. Závěr

Na základě vytyčených cílů diplomové práce byla vytvořena obsáhlá rešerše, která byla zaměřena na vytvoření uceleného přehledu silového zatížení při procesu soustružení a vlivů jednotlivých faktorů na velikost řezné síly a řezného odporu. Zpracovaná rešerše přinesla přepokládané teze, podle kterých byl dále navrhován experiment tak, aby předpoklady plynoucí z rešerše byly potvrzeny či vyvráceny.

Stěžejní částí této práce představuje část věnující se experimentu a jeho vyhodnocení. Pro experiment byly zvoleny vstupní faktory, za které byly dle zjištěných poznatků vybrány řezné podmínky. Realizace experimentu proběhla na Západočeské univerzitě v Plzni, kde pracoviště disponuje nezbytným vybavením. Pomocí experimentálně naměřené velikosti hlavní složky řezné síly při zvolených řezných podmínkách dle navrženého experimentu byla provedena statistická analýza těchto dat. Pro ověření správnosti měření došlo k vytvoření statistického modelu pro řeznou sílu. Ze zjištěných výsledků lze konstatovat, že nalezený model pro určení hlavní složky řezné síly dostatečně popisuje sledované veličiny. Zmíněné bylo dále také potvrzeno provedeným validačním experimentem, který prokázal dostatečnou přesnost nalezeného modelu.

Z naměřených hodnot hlavní složky řezné síly byly dále vypočítány hodnoty řezného odporu, jenž byly opět podrobeny statistické analýze. Pro řezný odpor byl také vytvořen statistický model, který popisuje průběh závislostí. Pomocí získaných dat byl vypočten měrný řezný odpor. Výsledky potvrdily jak správnost provedeného experimentu, tak i vztahu pro výpočet, což lze tvrdit na základě porovnání získané hodnoty s tabulkovou hodnotou měrného řezného odporu pro danou ocel.

Poslední část práce se věnuje vyhodnocení faktorů a porovnání s předpoklady, jenž vycházejí z teorie obrábění. Získané výsledky potvrzují popsanou teorii, že zvyšováním hodnot hloubky řezu a posuvu dochází k nárůstu velikosti hlavní složky síly. Zvyšování řezné rychlosti způsobuje pokles hlavní složky řezné síly, tak jak tvrdí teorie. Přesto u horní hranice stanoveného intervalu pro řeznou rychlost došlo k malému nárůstu velikosti hlavní složky řezné síly, což se s teoretickými předpoklady rozchází.

U řezného odporu se pomocí zjištěných výsledků také dosáhlo potvrzení teoretických předpokladů z rešerše. Největší vliv má tloušťka odřezávané vrstvy, resp. posuv, kdy zvyšováním hodnoty posuvu dochází k poklesu řezného odporu. Vliv řezné rychlosti je výrazně menší než posuvu. Zároveň byla potvrzena teze, že hloubka řezu nemá prakticky vliv na velikost řezného odporu. Podařilo se také prokázat rapidní nárůst řezného odporu za podmínky, kdy se hodnota posuvu pohybuje kolem hodnoty zaoblení bříty.

Závěrem lze konstatovat, že práce splnila stanovené cíle. Hlavním přínosem práce je prostudování a potvrzení teoretických tezí, které byly stanoveny již před několika desítkami let, a to při nižších hodnotách řezných podmínek. Jako navazující práce na tento výzkum se nabízí rozšíření experimentu pro jiné materiály a intervaly řezných podmínek, kdy by bylo vhodné více prozkoumat závislost velikosti řezného odporu a hlavní složky řezné síly na vyšších řezných rychlostech, než byly použity v práci. Dále se nabízí provést obsáhlejší experiment, který by přímo sledoval změnu velikosti řezného odporu na změně posuvu, který by se pohyboval kolem hodnoty zaoblení bříty. V neposlední řadě by bylo možné rozšířit počet vstupujících faktorů.

Jako příhodné by se jevilo vytvoření databáze materiálů na základě takto provedených experimentů, kdy z vytvořených statistických modelů by se dále dala vytvořit aplikace, která by sloužila k volbě vhodných řezných podmínek pro obrábění vybraných materiálů.

6. Seznam použité literatury

- [1] CHLADIL, Josef. *Přípravky a nástroje: část-obrábění*. 3. vyd. Brno: VUT, 1992. ISBN 80-214-0408-6.
- [2] BENEŠ, Vladimír; MRKVICA, Miloš. *Teorie řezných nástrojů: určeno pro stud. fak. strojní*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1990. ISBN 80-01-00265-9.
- [3] SCHMIDT, Eduard. *Příručka řezných nástrojů*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1974.
- [4] CHVÁLA, Břetislav; Votava, Josef. *Přípravky: celost. vysokošk. učebnice pro strojní fakulty vys. škol techn.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1988.
- [5] VLACH, Bohumil. *Technologie obrábění*. Praha: ČVUT, 1986.
- [6] PŘIKRYL, Zdeněk, MUSÍLKOVÁ, Rosa. *Teorie obrábění*. 3. vyd. Praha: SNTL:1982
- [7] MAREK, Josef. *Experimentální ověření závislosti měrného řezného odporu na tloušťce odřezávané vrstvy*. Plzeň, 2018. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta strojní. Vedoucí práce: Ing. Jiří Vyšata, Ph.D.
- [8] SPURNÝ, Martin. *Průřez odebírané vrstvy materiálu a jeho vliv na měrný řezný odpor*. Ostrava, 2016. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava, fakulta strojní. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.
- [9] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: ČVUT, 1989.
- [10] ZEMAN, Petr. *Měření užitečného výkonu při podélném soustružení*. Liberec, 2018. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, fakulta strojní. Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Jersák, CSc.
- [11] HAVLÍČEK, Dušan. *Výzkum vztahů pro měrnou řeznou sílu*. Liberec, 1994. Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, fakulta strojní. Vedoucí práce: doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.
- [12] GAZDA, J. *Teorie obrábění: Řezné síly při obrábění*. 1. vyd. Liberec: Ediční středisko VŠST Liberec, 1993. 123 s. ISBN 80-7083-110-3.
- [13] VOS, Patrick De. *Příručka pro technology – Jak je to s řeznými silami?*. [online]. Praha, MM publishing s. r. o., 13. 3. 2012. [cit. 18. 1. 2022]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami>
- [14] ASM Handbook, Vol. 16: Machining. Ohio, 1999. ISBN 0871700077.
- [15] SHAW, Milton Clayton. *Metal cutting principles*. New York: Oxford University Press, 2005. ISBN 0-19-514206-3.
- [16] Childs, Thomas. *Metal machining: theory and applications*. New York: Elsevier, 2000. ISBN 0-340-69159-X.
- [17] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*; přel. Miroslav Kudela. Praha: Sadvik, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [18] ČEP, Robert. PETRŮ, Jana. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. [online], Ostrava: VŠB-TUO, 2011 [cit. 21. 1. 2022]. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_komplet_finish.pdf. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [19] JIŘINSKÝ, Jiří. *Experimentální zjišťování měrné řezné síly a její vliv na obrábění*. Praha, 2020. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta strojní. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pelikán

- [20] KAFKA, Jindřich, VRABEC, Martin. Technologie obrábění: návody ke cvičení. Vyd. 3. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 1995. ISBN 80-01-03434-8.
- [21] BRYCHTA, Josef. ČEP, Robert. SADÍLEK, Marek. NOVÁKOVÁ, Jana. PETŘÍKOVÁ, Lenka. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archived/FS/NSPO/texty.pdf>. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [22] TRČKA, Tomáš. Analýza silového zatížení stopkových fréz s PCD s ohledem na jejich ostří. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojní. Vedoucí práce: Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
- [23] KISTLER. *Analyzing and optimizing cutting processes*. Kister Group. Winterthur, 2019. Dostupné z: <https://www.kistler.com/files/download/960-002e.pdf?callee=frontend>
- [24] FIALA, Zdeněk. Analýza měrných řezných sil pro nové obráběné materiály a CNC technologie. Brno, 2014. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce: prof. Ing Miroslav Píška, CSc.
- [25] MÁDL, Jan. Technologie obrábění. Vydání 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [26] SPURNÝ, Ondřej. *Experimentální zjišťování měrného řezného odporu u slitin neželezných kovů*. Plzeň, 2019. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta strojní. Vedoucí práce: Ing. Josef Sklenička, Ph.D.
- [27] GOMBÁR, Miroslav. *Design of Experiments: Spracovanie a vyhodnotenie experimentálnych dát*. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, 2017. [cit. 7. 2. 2022]. Učební text.
- [28] GOMBÁR, Miroslav. *Plánovanie experimentov (DoE) ako nástroj efektívneho výskumu technologických procesov*. Prešov, 2017. [cit. 7. 2. 2022]. Podklady k přednáškám.
- [29] MICHÁLEK, Jiří. *Navrhování a vyhodnocování experimentů (DOE) – Učební texty k semináři*. [online], Brno: Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií, 2010. [cit. 7. 2. 2022]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA_05_1012_2.PDF
- [30] HENDL, Jan. *Přehled statistických metod: Analýza a metaanalýza dat*. Praha: Portál, 2015. ISBN 978-80-262-09812
- [31] TOŠENOVSKÝ, Josef. *Plánování experimentů*: učební text. [online], Ostrava: VŠB-TUO, 2012 [cit. 7. 2. 2022]. ISBN 978-80-248-2592-2. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/DOE/Planovani%20experimentu.pdf>. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [32] SKLENIČKA, Josef. *Příspěvek k experimentálnímu stanovení modelu silového zatížení šroubového vrtáku*. Plzeň, 2017. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta strojní, katedra technologie obrábění.
- [33] KÖNIGFRANKSTAHL. *Charakteristika nerezových ocelí*. [online]. [cit. 7. 3. 2022]. Dostupné z: <http://www.koenigfrankstahl.cz/?menu=234>
- [34] ARMAT spol. s.r.o. Specifikace nerezových materiálů. [online]. [cit. 7. 3. 2022]. Dostupné z: <https://armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf>
- [35] TECHportal.cz. *Cr-Ni austenitická ocel odolná korozi*. [online]. [cit. 7. 3. 2022]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrODF32bS3UUhLnlz00RA9x7p75N8MGgz73w

- [37] Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni. *Učebna předmětu KTO/PEMO*. [online]. [cit. 7. 3. 2022]. Dostupné z: https://www.kto.zcu.cz/o-katedre/Vybaveni_katedry/UF106.html
- [38] EMCO. *MAXXTURN 25*. [online]. [cit. 7. 3. 2022]. Dostupné z: <https://www.emco-world.com/de/produkte/industrie/drehen/maxxturn-25.html>
- [39] ISCAR. [online]. [cit. 7. 3. 2022]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/ecatalog/item.aspx?cat=5566931&fnum=867&mapp=IS&app=20&GFSTYP=M&isoD=1&lang=WZ#>
- [40] MORÁVKA, Jan. MAROŠ, Bohumil. MICHALEK, Karel. Vliv neortogonality plánu experimentu na statistickou korektnost modelu. [online], Třinecký inženýring, a. s., VUT Brno. Technická univerzita Ostrava. [cit. 11. 3. 2022]. Dostupné z: https://www2.humusoft.cz/www/papers/tcp08/073_moravka.pdf
- [41] KAVKOVÁ, D. *Práce a síla při řezání*. [online]. [cit. 15. 3. 2022]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/68628228-Prace-a-sila-pri-rezani.html>
- [42] ČEP, Robert. Skripta z technologie II- 2.díl. [online]. Ostrava: Technická univerzita Ostrava. [cit. 15. 3. 2022]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf
- [43] HABILIS STEEL. [online]. [cit. 7. 3. 2022]. Dostupné z: <https://habilis-shop.eu/async/attachment.php?id=145780>

Příloha č. 1

Experimentálně naměřené řezné síly

Výsledky měření F_c									
Č. m.	v_c [m/min]	f [mm/ot]	a_p [mm]	F_{c1} [N]	F_{c2} [N]	F_{c3} [N]	F_{c4} [N]	F_{c5} [N]	F_{c6} [N]
1	120,94	0,05	0,36	70,57	75,37	73,38	72,76	72,10	71,51
2	329,06	0,05	0,36	65,42	66,18	72,51	68,44	64,65	66,01
3	120,94	0,16	0,36	154,1	148,6	150,8	150,1	152,5	152,6
4	329,06	0,16	0,36	134,7	136	137,3	139,5	140,1	140,2
5	120,94	0,05	0,84	141,9	137	138,7	155,6	154,6	149,2
6	329,06	0,05	0,84	136,8	133,3	125,1	124,5	124	122,2
7	120,94	0,16	0,84	340,9	346,4	350,2	352,7	352,8	356,6
8	329,06	0,16	0,84	304,5	298,8	301,5	311,9	324,2	327,2
9	50,00	0,11	0,60	242,7	240,7	239,5	237,3	237,3	240,6
10	400,00	0,11	0,60	164,2	158,5	167,9	173,8	171,4	173,1
11	225,00	0,01	0,60	43,52	44,57	43,27	42,74	42,01	41,71
12	225,00	0,20	0,60	277	279,1	285,5	288,8	300,7	301,2
13	225,00	0,11	0,20	72,2	64,77	66,53	65,55	69,82	71,76
14	225,00	0,11	1,00	259,9	259,4	275,8	273,5	284,8	287,2
15	225,00	0,11	0,60	165	171,4	175,1	178,1	179,4	181,4
16	225,00	0,11	0,60	178	172,5	174,4	175,7	176,5	178,9
17	225,00	0,11	0,60	174,1	178,6	178,4	182,6	185,3	187,7
18	225,00	0,11	0,60	170,8	175,2	175,9	177,3	180,3	180,2

Příloha č. 2

Vypočtené hodnoty řezného odporu

Vypočtené hodnoty řezného odporu k_c					
Č. m.	a_p [mm]	f [mm/ot]	A [mm²]	F_c [N]	k_c [MPa]
1	0,36	0,05	0,01798697	72,62	4037,09
2	0,36	0,05	0,01798697	67,20	3736,15
3	0,36	0,16	0,05722189	151,45	2646,71
4	0,36	0,16	0,05722189	137,97	2411,09
5	0,84	0,05	0,04198697	146,17	3481,25
6	0,84	0,05	0,04198697	127,65	3040,23
7	0,84	0,16	0,13402189	349,93	2611,01
8	0,84	0,16	0,13402189	311,35	2323,13
9	0,60	0,11	0,06586500	239,68	3639,00
10	0,60	0,11	0,06586500	168,15	2552,95
11	0,60	0,01	0,00599990	42,97	7161,79
12	0,60	0,20	0,11932237	288,72	2419,64
13	0,20	0,11	0,02186500	68,44	3130,03
14	1,00	0,11	0,10986500	273,43	2488,81
15	0,60	0,11	0,06586500	175,07	2657,97
16	0,60	0,11	0,06586500	176,00	2672,13
17	0,60	0,11	0,06586500	181,12	2749,82
18	0,60	0,11	0,06586500	176,62	2681,50