ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**

Studijní specializace: **strojírenská technologie - technologie obrábění**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Experimentální měření řezných sil

Autor: Jan Pražák

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

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Jan PRAŽÁK**
Osobní číslo:	**S19B0644P**
Studijní program:	**B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace:	**Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Téma práce:	**Experimentální měření řezných sil**
Zadávající katedra:	**Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

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

Rozsah bakalářské práce:	**30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací:	**dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské 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 bakalářské práce:	**Ing. Josef Sklenička, Ph.D.** Katedra technologie obrábění
Konzultant bakalářské práce:	**Ing. Jan Hnátík, Ph.D.** Katedra technologie obrábění
Datum zadání bakalářské práce:	**15. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce:	**27. května 2022**

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: ……. …….

podpis autora

Rád bych poděkoval panu Ing. Josefovi Skleničkovi Ph.D. za trpělivost a odborné vedení při tvorbě bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Luboši Kroftovi za pomoc při provádění experimentu.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** Pražák	**Jméno** Jan
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství	
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** Ing. Sklenička, Ph.D.	**Jméno** Josef
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST – KTO	
DRUH PRÁCE	~~**DIPLOMOVÁ**~~	**BAKALÁŘSKÁ**	**Nehodící se škrtněte**
NÁZEV PRÁCE	Experimentální měření řezných sil	

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	54	**TEXTOVÁ ČÁST**	54	**GRAFICKÁ ČÁST**	0

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) **ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY**	Bakalářská práce obsahuje experimentální měření řezné síly. Nejprve byla síla měřena při standardním upnutí nože, poté při vyosení soustružnického nože pod osu obrobku a následně byla tyto měření zpracovaná a nakonec porovnána s teorií obrábění.
KLÍČOVÁ SLOVA **ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE**	Řezná síla, obrobek, průměr obrobku, soustružení

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	**Surname** Pražák	**Name** Jan	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
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 measuring of cutting force		

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

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	54		**TEXT PART**	54	**GRAPHICAL PART**	0

BRIEF DESCRIPTION **TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS**	This bachelor thesis contains experimental measuring of cutting forces. First the force was measured with standard toll clamping, then the tool was offset below the workpiece axis and after that these measurements were processed and finally compared with machining teory.
KEY WORDS	Cutting force, workpiece, workpiece diameter, lathe work

Obsah

Zadání BP 2
Přehled použitých zkratek a symbolů 10
Odvozené fyzikální jednotky 12
Seznam obrázků 13
Seznam tabulek 14
Seznam grafů 15
1 Úvod 16
1.1 Cíl práce 16
2 Rozbor současného stavu 17
2.1 Řezné podmínky 17
2.1.1 Určování řezných podmínek experimentální metodou 17
2.1.2 Určování řezných podmínek podle tabulek a nomogramů 17
2.1.3 Určování řezných podmínek podle normativů 17
2.1.4 Určení řezných podmínek výpočtem 17
2.2 Tříska 19
2.3 Řezné nástroje 20
2.4 Soustružnické nože 20
2.5 Geometrie soustružnických nožů 21
2.6 Pracovní roviny a úhly 23
2.6.1 Pracovní roviny 23
2.6.2 Pracovní úhly 23
2.7 Břitové diagramy 23
2.7.1 Břitový diagram čela 24
2.7.2 Břitový diagram hřbetu 24
2.8 Řezná síla 25
2.9 Měření velikosti řezných sil 25
2.9.1 Nepřímé měření řezných sil 25
2.9.2 Přímé měření řezných sil 26
2.10 Upínací síly 27
2.11 Měrný řezný odpor 27
2.12 Vliv vyosení soustružnického nože na změnu pracovních úhlů 29
2.13 Vliv průměru obrobku na řeznou sílu 30
3 Návrh a realizace experimentu 31
3.1 Plán experimentu 31

3.1.1 Faktory experimentu ... 33
3.1.2 Volba řezných podmínek ... 33
3.2 Materiál a polotovar pro experiment ... 33
3.3 Vybavení pro experiment ... 34
3.3.1 Soustružnický nůž ... 34
3.3.2 Stroj ... 35
4 Vyhodnocení experimentu ... 37
4.1 Naměřené hodnoty při standardním upnutí nástroje ... 40
4.2 Naměřené hodnoty při vyosení nástroje o 1 mm ... 41
4.3 Naměřené hodnoty při vyosení nástroje o 1,5 mm ... 41
4.4 Naměřené hodnoty při vyosení nástroje o 2 mm ... 41
4.5 Standardní upnutí nástroje ... 42
4.6 Velikost plochy odebírané vrstvy ... 43
4.7 Změna úhlu čela při vyosení soustružnického nože ... 45
4.8 Posunutí nože v ose y ... 45
4.9 Měření bez posunutí nože v ose y ... 48
4.10 Měření s posunutím nože v ose y ... 48
4.11 Porovnání výsledků bez vyosení a s vyosením nože ... 48
5 Závěr ... 51
Seznam použitých zdrojů ... 53

Seznam použitých zkratek a symbolů

CNC… Computer Numeric Control (počítačové číslicové řízení)

D… průměr rotačního obrobku [mm]

v_c… řezná rychlost [$m.min^{-1}$]

n… počet otáček [min^{-1}]

V_T… řezná rychlost při žádané trvanlivosti ostří [m/min]

T… žádaná trvanlivost ostří [min]

a_p… hloubka řezu [mm]

f… posuv na otáčku obrobku [mm]

C_v… konstanta, která určuje vliv způsobu práce [-]

m… exponent určující vliv materiálu břitu na trvanlivost ostří [-]

x… exponent určující vliv hloubky záběru na řeznou rychlost [-]

y… exponent určující vliv posuvu na posuv [-]

K_κ… konstanta určující vliv úhlu nastavení hlavního ostří κ na řeznou rychlost [-]

K_{κ_1}… konstanta určující vliv úhlu nastavení vedlejšího ostří K_{κ_1} na řeznou rychlost [-]

K_r… konstanta určující vliv poloměru zaoblení špičky nože na řeznou rychlost [-]

K_{ch}… konstanta určující vliv způsobu chlazení nástroje a obrobku na řeznou rychlost [-]

K_m… konstanta určující vliv materiálu obrobku na řeznou rychlost [-]

K_n… konstanta určující vliv materiálu obrobku na řeznou rychlost [-]

K_Δ… konstanta určující vliv dovoleného opotřebení břitu na řeznou rychlost [-]

α… úhel hřbetu [°]

α'… úhel vedlejšího hřbetu [°]

γ… úhel čela [°]

δ… úhel řezu [°]

β… úhel břitu [°]

κ_R'… úhel nastavení vedlejšího ostří [°]

κ_R… úhel nastavení hlavního ostří [°]

λ_s… úhel sklonu ostří [°]

ψ_r… doplňkový úhel nastavení [°]

ϵ_r… úhel špičky [°]

r_ϵ… poloměr zaoblení špičky [mm]

P_f… nástrojová boční rovina

P_r… základní nástrojová rovina

P_p… nástrojová zadní rovina

P_s… nástrojová rovina ostří

P_n… nástrojová normálová rovina

P_o… nástrojová ortogonální rovina

P_{re}… pracovní základní rovina

P_{fe}… pracovní rovina boční

v_f… posuvová rychlost [m.min^{-1}]

v_e… směr výsledného řezného pohybu

P_{pe}… pracovní základní rovina

P_{se}… pracovní rovina ostří

P_{ne}… pracovní normálnová rovina

P_{se}'… pracovní rovina vedlejšího ostří

λ_{se}… pracovní úhel sklonu ostří [°]

S_e… pracovní ostří

β_e…pracovní úhel břitu [°]

α_e.. pracovní úhel hřbetu [°]

γ_f… nástrojový boční úhel čela [°]

γ_p… nástrojový úhel zadního čela [°]

γ_g… nástrojový úhel největšího spádu čela [°]

κ_γ… pomocný úhel pro stanovení polohy nástrojové roviny největšího spádu čela [°]

α_0… nástrojový ortogonální úhel hřbetu [°]

α_f… nástrojový boční úhel hřbetu [°]

α_p… nástrojový zadní úhel hřbetu [°]

α_b… nástrojový úhel největšího spádu hřbetu [°]

P_b… rovina největšího spádu hřbetu

m… jednotková vzdálenost uvažovaného bodu ostří od základny nástroje [mm]

γ_α… pomocný úhel pro stanovení polohy nástrojové roviny největšího spádu hřbetu [°]

F… řezná síla [N]

F_c… řezná složka síly obrábění [N]

F_f… síla posuvu [N]

F_p… pasivní síla [N]

P_c… řezný výkon [W]

$P_{už}$… užitečný výkon [W]

P_o… výkon stroje naprázdno [W]

a… zrychlení [m.s^{-2}]

m… hmotnost [kg]

v… rychlost pohybu [m.s^{-1}]

t… čas změny rychlosti pohybu [s]

k_c… měrný řezný odpor [MPa]

S… plocha třísky [mm^2]

k_{c1}… měřený řezný odpor [MPa]

γ_0… úhel čela měřený v ortogonální rovině [°]

m_c… koeficient změny intenzity měrného řezného odporu

k… vzdálenost špičky nástroje od osy obrobku [mm]

a… velikost vyosení nástroje [mm]

R… poloměr obrobku [mm]

S-N-O-P… Stroj, nástroj, obrobek, přípravek

VBD… vyměnitelná břitová destička

F_x… posuvová složka řezné síly [N]

F_y… pasivní složka řezné síly [N]

F_z… hlavní složka řezné síly [N]

Odvozené fyzikální jednotky

N	Newton	kg.m.s^{-2}
MPa	Megapascal	m^{-1}.kg.s^{-2}.10^6
mm	Milimetr	m.10^{-3}
W	Watt	m^2.kg.s^{-3}
kW	Kilowatt	m^2.kg.s^{-3}.10^3
min	Minuta	s.60

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 Tři způsoby lomu třísky [4] ... 20
Obrázek 2-2 Soustružnický nůž [6] ... 21
Obrázek 2-3 Geometrie soustružnického nože [8] ... 22
Obrázek 2-4 Pracovní geometrie soustružnického nože [10] ... 23
Obrázek 2-5 Břitový diagram čela [11] ... 24
Obrázek 2-6 Břitový diagram hřbetu [11] ... 24
Obrázek 2-7 Ortogonální řezání [12] ... 25
Obrázek 2-8 Vázané řezání [12] ... 25
Obrázek 2-9 Síly při ortogonálním řezání [12] ... 26
Obrázek 2-10 Síly při vázaném řezání [12] ... 26
Obrázek 2-11 Piezoelektrický dynamometr [12] ... 27
Obrázek 2-12 Určení velikosti koeficientu m_c [6] ... 28
Obrázek 2-13 Měrný řezný odpor [6] ... 29
Obrázek 2-14 Změna geometrie soustružení dle polohy špičky nože [14] ... 30
Obrázek 3-1 Nastavení rozsahu zesilovače [6] ... 32
Obrázek 3-2 Vyhodnocení řezné síly programem DynoWare [6] ... 32
Obrázek 3-3 Struktura materiálu [15] ... 33
Obrázek 3-4 Fotografie polotovaru ... 34
Obrázek 3-5 Držák pro VBD [17] ... 34
Obrázek 3-6 Charakteristika VBD [18] ... 35
Obrázek 3-7 Soustruh MAXXTURN 25 [6] ... 36
Obrázek 4-1 Velikost plochy při obrábění průměru 100 mm ... 44
Obrázek 4-2 Velikost plochy při obrábění průměru 80 mm ... 44

Seznam tabulek

Tabulka 2-1 Řezná rychlost pro vybrané materiály [1] 19
Tabulka 3-1 Zvolené řezné podmínky 33
Tabulka 3-2 Velikost soustružnického nože [17] 35
Tabulka 3-3 Jmenovité rozměry VBD [18] 35
Tabulka 3-4 Charakteristika soustruhu [19] 36
Tabulka 4-1 Naměřené hodnoty při experimentu bez vyosení nástroje 40
Tabulka 4-2 Naměřené hodnoty při experimentu s vyosením nástroje o 1 mm 41
Tabulka 4-3 Naměřené hodnoty při experimentu s vyosením nástroje o 1,5 mm 41
Tabulka 4-4 Naměřené hodnoty při experimentu s vyosením nástroje o 2 mm 41

Seznam grafů

Graf 4-1 Závislost řezné síly na průměru obrobku bez vyosení nástroje 38
Graf 4-2 Závislost řezné síly na průměru obrobku s vyosením nástroje 39
Graf 4-3 Hodnoty řezné síly bez vychylujících hodnot 42
Graf 4-4 Hodnoty řezné síly bez vychylujících hodnot pro VBD 3x, 5x v řezu 43
Graf 4-5 Hodnoty řezné síly při vyosení soustružnického nože 45
Graf 4-6 Hodnoty řezné síly při vyosení nože o 1 mm 46
Graf 4-7 Hodnoty řezné síly při vyosení nože o 1,5 mm 47
Graf 4-8 Hodnoty řezné síly při vyosení nože o 2 mm 47
Graf 4-9 Porovnání hodnot při vyosení o 1 mm 49
Graf 4-10 Porovnání hodnot při vyosení o 1,5 mm 49
Graf 4-11 Porovnání hodnot při vyosení o 2 mm 50
Graf 5-1 Porovnání obou způsobů měření 51

1 Úvod

V dnešní době má obrábění zásadní význam, co se týká přesnosti, kvality a efektivity výroby. S rostoucími požadavky na přesnost je kladen důraz na neustálý vývoj a výzkum v oblasti obráběcích strojů a také obráběcích nástrojů. Obrobené výrobky mohou dosahovat přesnosti až desetitisícin milimetru. Zároveň při použití výrobních linek a automatických obráběcích CNC center, je obrábění jako takové schopno dosáhnout vysoké míry efektivity a rovněž si zachovat požadovanou přesnost. To z něj činí nepostradatelný článek v dnešním průmyslu. Díky obrábění může jít výzkum a vývoj neustále dopředu, jelikož se naskýtají stále nové možnosti technologie výroby, bez kterých by celý průmysl zůstával pozadu. Jedním z faktorů, které ovlivňují výslednou cenu výrobků, je řezná síla. Ta představuje odpor, který materiál klade proti vniknutí cizího předmětu. Pokud je řezná síla velká, je potřeba zvolit velký výkon obráběcího stroje, aby součást mohla být obrobena v požadované přesnosti a jakosti. Tím, že se použije vyšší výkon, samozřejmě rostou náklady celé výroby. Pokud je řezná síla nízká, není zapotřebí takový výkon obráběcího stroje, a to znamená levnější výrobu.

1.1 Cíl práce

Tato práce se bude zabývat tím, jak se mění řezná síla v závislosti na průměru obrobku. Jak již může být z názvu patrné, všechna měření se budou konat na soustruhu za použití přímého soustružnického nože. Bude zvolen maximální průměr, od kterého se celý experiment začne měřit a následně se bude průměr zmenšovat, než se dostane na minimální hodnotu, která bude pro tuto práci stanovena. Data naměřena v průběhu celého experimentu budou následně porovnána a vyhodnocena. Mezi tyto vlivy se bude řadit například odpor prostředí či vliv teploty, která bude ovlivňovat nejen řezné podmínky, ale také výchozí geometrii nástroje, který bude zvolený materiál obrábět. Jako obráběný materiál bude zvolena klasická uhlíková ocel, která se běžně používá k obrábění. Důvodem pro výběr tohoto materiálu je dobrá obrobitelnost. To kvůli tomu, aby experiment měl po vyhodnocení dat a vytvoření závěru vypovídající hodnotu a výsledný vztah se nechal aplikovat v široké škále klasického soustružení.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Řezné podmínky

Mezi řezné podmínky se obecně řadí řezná rychlost, posuv a hloubka záběru. Podle zvolení řezných podmínek je ovlivněn výkon obrábění. Výkonem obrábění se rozumí množství odebraného materiálu za časovou jednotku, velikost řezných sil, jakost obrobené plochy, příkon stroje a další parametry. S výrobním postupem právě úzce souvisí i řezné podmínky, jejichž určení je cílem vypracování pracovního postupu.

Řezné podmínky jsou voleny podle jakosti břitu nástroje, obrobitelnosti materiálu obrobku, způsobu a přesnosti obrábění, podle druhu chladící kapaliny nebo třeba podle upnutí obrobku. Při určování řezných podmínek je nutné vycházet z kompromisu mezi optimálními řeznými podmínkami a cenou výsledného produktu. Čím větší přesnost výroby, jinak řečeno, čím optimálnější řezné podmínky, tím víc rostou náklady. Stejně to funguje i naopak. Je zřetelné, že pokud budeme provádět sériovou výrobu, nebude na dosažení optimálních podmínek kladen tak velký důraz, jelikož by se to firmě finančně nevyplatilo. Na druhou stranu, pokud mluvíme o volbě řezných podmínek pro výrobu hromadnou či sériovou, tak pro tyto objemy výroby se už vyplatí popřemýšlet o volbě a o nejlepším řešení co se týká určení řezných podmínek jako takových. Vyplývá to z toho, že se při sériové výrobě vyprodukuje mnohem více kusů výrobků než při výrobě kusové. Řezné podmínky se určují experimentální metodou podle tabulek a nomogramů, podle normativů a výpočtem. [1] [2]

2.1.1 Určování řezných podmínek experimentální metodou

Tento způsob určování se běžně používá, pokud neznáme přesné označení materiálu, a tedy jeho vlastnosti. V praxi probíhá tak, že obsluha zkouší různé varianty řezných podmínek a poté se rozhodne pro tu nejpřijatelnější. Tato metoda se také používá u malého objemu výroby. Zpravidla se jedná o výrobu kusovou. [1]

2.1.2 Určování řezných podmínek podle tabulek a nomogramů

V tabulkách a nomogramech se nachází souvislosti mezi obráběným materiálem, materiálem nástroje a řeznými podmínkami. Mezi výhody patří vysoká rychlost určení řezných podmínek. Mezi nevýhody naopak patří nepřesnost určení, která je spojená s využitím výrobní kapacity stroje. Z těchto důvodů se s určováním řezných podmínek pomocí tabulek a nomogramů můžeme setkat pouze u kusové či malosériové výroby. [1]

2.1.3 Určování řezných podmínek podle normativů

Normativy jsou dokonalé propracované a velmi podrobné tabulky, které dávají do souvislosti různé faktory, které ovlivňují volbu řezných podmínek. Pomocí normativů se určí řezné podmínky, které jsou velmi podobné podmínkám optimálním. Z tohoto důvodu se tento způsob využívá hlavně v sériové výrobě, kde se už vyplatí přiblížit se k optimálním řezným podmínkám. [1]

2.1.4 Určení řezných podmínek výpočtem

Tento způsob se používá v nejkrajnějších případech. Je to nejpřesnější způsob určení řezných podmínek a zároveň se tyto řezné podmínky nejvíce přibližují podmínkám optimálním.

Vzorec pro určení řezné rychlosti pro soustružení je obecně dán vztahem (1). Kde D označuje průměr rotačního obrobku v milimetrech, n jsou otáčky za minutu a v_c je samotná řezná rychlost

v metrech za minutu. Nicméně je možno určit řezné podmínky i o dost přesnějším, ale zároveň náročnějším způsobem, který je popsán ve vztahu (2). [1]

$$V_c = \frac{\pi.D.n}{1000} \quad [m.min^{-1}] \qquad (1),$$

kde:

D – průměr obrobku [mm],

n – počet otáček [min^{-1}].

$$V_T = \frac{C_V}{T^m.ap^x.f^y}.K_\kappa.K_{\kappa_1}.K_r.K_{ch}.K_m.K_n.K_\Delta \; [m.min^{-1}] \qquad (2),$$

kde:

V_T – řezná rychlost při žádané trvanlivosti ostří [$m.min^{-1}$],

T – žádaná trvanlivost ostří [min],

a_p – hloubka řezu [mm],

f – posuv na otáčku obrobku [mm],

C_v – konstanta, která určuje vliv způsobu práce, tj. například hrubování, práce načisto, vnější soustružení, vnitřní soustružení, čelní soustružení, soustružení válcové plochy atd [-],

m – exponent určující vliv materiálu břitu na trvanlivost ostří [-],

x – exponent určující vliv hloubky záběru na řeznou rychlost [-],

y – exponent určující vliv posuvu na posuv [-],

K_κ – konstanta určující vliv úhlu nastavení hlavního ostří κ na řeznou rychlost [-],

K_{κ_1} – konstanta určující vliv úhlu nastavení vedlejšího ostří K_{κ_1} na řeznou rychlost [-],

K_r – konstanta určující vliv poloměru zaoblení špičky nože na řeznou rychlost [-],

K_{ch} – konstanta určující vliv způsobu chlazení nástroje a obrobku na řeznou rychlost [-],

K_m – konstanta určující vliv materiálu obrobku na řeznou rychlost [-],

K_n – konstanta určující vliv materiálu břitu nástroje na řeznou rychlost [-],

K_Δ – konstanta určující vliv dovoleného opotřebení břitu na řeznou rychlost [-].

Určení hodnoty z tohoto vzorce není při stavu dnešní výpočetní techniky tak složité. Největší problém nastává při zjišťování všech konstant, které se objevují v tomto vzorci. Pro stanovení těchto konstant je nutno provést opravdu masivní experimentální měření. Proto se toto určení hodí pro velkosériovou a hromadnou výrobu, kde představuje zvýšení efektivity výroby a má výrazný vliv na zvýšení zisků z ní. [1]

Tabulka 2-1 Řezná rychlost pro vybrané materiály [1]

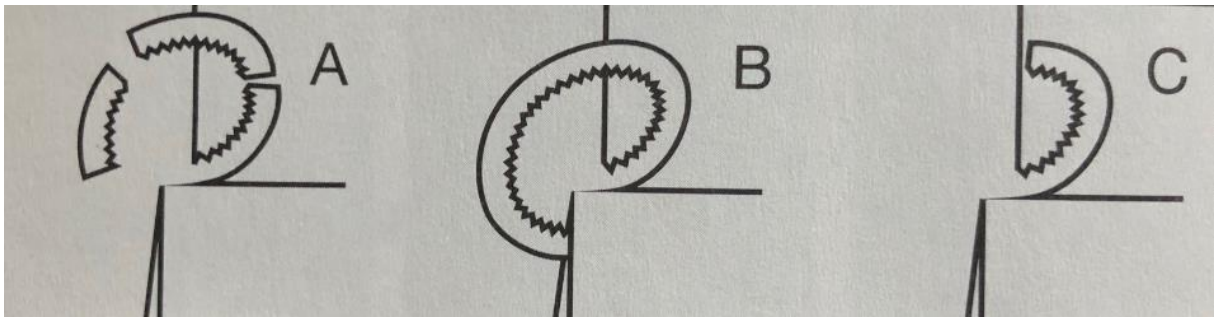
Druh obrábění	Materiál nástroje	Materiál obrobku	Hrubování [m.min^{-1}]	Na čisto [m.min^{-1}]
soustružení	Rychlořezná ocel	ocel	25	15
		litina	20	15
		bronz a mosaz	40	30
		hliník	150	150
	Slinutý karbid	ocel	55	170
		litina	60	80
		bronz a mosaz	150	220
		hliník	až 1000	až 1000
	keramika	ocel	250	500
		litina	150	280
		neželezné kovy	350	500
frézování	Rychlořezná ocel	ocel	25	40
		litina	25	40
		bronz a mosaz	30	50
		hliník	250	375
	Slinutý karbid	ocel	130	180
		litina	130	180
		bronz a mosaz	150	200
		hliník	1200	2000
broušení		ocel		30[m.s^{-1}]
		litina		25[m.s^{-1}]
		neželezné kovy		30[m.s^{-1}]

2.2 Tříska

Tvar odlamované třísky při obrábění je ovlivněn především materiálem obrobku, který na celý jev odlamování má největší vliv. Uhlíková ocel má oproti oceli legované silnější deformaci a větší počáteční zakřivení. S ohledem na nižší pevnost se nelegovaná ocel utváří mnohem snadněji než například ocel vícelegovaná. Je-li řeč o utváření třísek, nelze tvrdit, že se jedná pouze o sladění správné kombinace úhlu čela a posuvu. Je to z toho důvodu, že při obrábění je veliké množství proměnných, které utváření třísky ovlivňuje. Mezi ně patří řezné síly, pevnost nástroje, teplota anebo třeba vibrace. Výše uvedené faktory mají také velký význam, pokud se hovoří o kontrolovaném odchodu třísky z místa řezu za různých řezných podmínek. Kvůli těmto veličinám se z utváření třísky stává samostatná oblast technologie, která stále zaznamenává neustálý a mimořádný rozvoj.

Článkovité třísky nebo třísky ve tvaru krátkých šroubovic jsou přesně těmi typy třísek, které jsou žádoucí jako výstupní tvary z procesu obrábění. Kontrolované odvádění třísek je dnes velice důležitou záležitostí v procesu obrábění, protože se díky němu zvyšuje spolehlivost obrábění a jeho výkon zůstává konstantní.

S odvodem třísky také velmi úzce souvisí způsob lomu třísky, který se dělí do tří skupin. Jedná se o lom samočinný (A), lom třísky na nástroji (B) a lom třísky při nárazu na obrobek (C). [3]



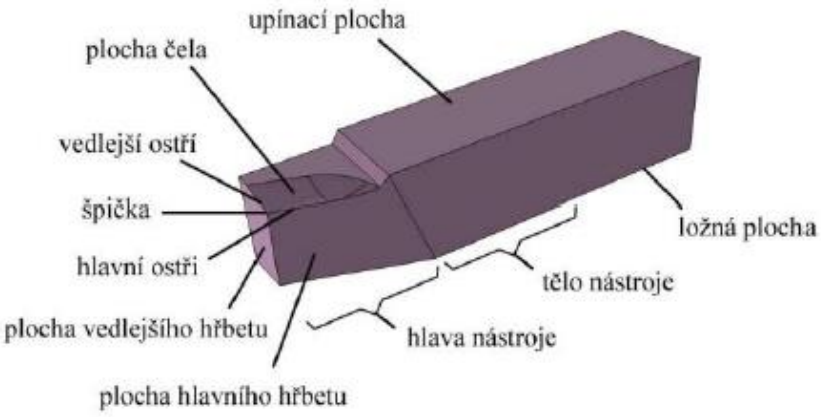
Obrázek 2-1 Tři způsoby lomu třísky [3]

2.3 Řezné nástroje

Obráběcím nástrojem se obecně rozumí těleso, které je upnuto do prostoru pro něj určený v systému obráběcího stroje. Pomocí něho je obrobek obráběn na požadovaný rozměr, přesnost a drsnost povrchu. Zvolení řezného nástroje zcela zásadním způsobem ovlivňuje velikost a tvar třísky, hodnoty řezných podmínek a tím pádem celkovou cenu vyrobené součásti. Vzhledem k tomu, že téma práce je „experimentální měření řezných sil“ a měření budou probíhat na soustruhu, tak budou níže popsány pouze nástroje pro soustružení. [4]

2.4 Soustružnické nože

Soustružnickým nožem (Obrázek 2-2) se rozumí řezný nástroj, který je zpravidla jednobřitý. Skládá se z upínací části, která se upíná do části soustruhu a označuje se jako nožový suport neboli nástrojová hlava. Nože se můžou dělit do dvou základních skupin. Do první skupiny patří soustružnické nože, které jsou monolitní, tj. skládají se z jednoho materiálu. Do druhé skupiny patří nože s tzv. vyměnitelnou břitovou destičkou. Tyto nože mají podstatnou výhodu, co se týká efektivity výroby. Když dojde k opotřebení břitu na monolitních nožích, tak je tento nástroj nutno vyjmout z nástrojové hlavy a přebrousit znovu na požadovaný tvar a geometrii, poté je operátor nucen nůž znovu upnout do nástrojové hlavy. Hlavní nevýhoda je v tom, že obsluha musí nůž znovu seřídit. Z tohoto důvodu se od používání těchto nožů upustilo. Avšak když dojde k opotřebení nože s vyměnitelnou břitovou destičkou, jediný úkol obsluhy je povolit zajišťovací šroub a destičku otočit či vyměnit. Kvůli tomu nedochází ke snižování efektivity výroby tak zásadním způsobem jako u monolitních nožů. I samotné obrábění vyměnitelnou břitovou destičkou je přesnější a můžou na ní být kladeny náročnější řezné podmínky. [4]



Obrázek 2-2 Soustružnický nůž [5]

2.5 Geometrie soustružnických nožů

Konstrukce geometrie břitu je nejvýznamnější prací konstruktéra řezných nástrojů. Geometrie je ovlivňována řadou činitelů, které jsou mnohdy protichůdné a konstruktér musí nalézt jistý kompromis. Geometrie jako celek poté ovlivňuje trvanlivost břitu, životnost nástroje, drsnost povrchu obrobené plochy, přesnost obrábění a tuhost soustavy stroj-obrobek-nástroj.

Tvar břitu jako takový je jednoznačně dán úhlem hřbetu α, úhlem vedlejšího hřbetu α', úhlem čela γ, úhlem řezu δ, úhlem břitu β, úhlem nastavení hlavního ostří κ_R', úhlem nastavení vedlejšího ostří κ_R, úhlem sklon ostří λ_s, úhlem špičky ϵ_r a poloměrem zaoblení špičky břitu r_ϵ.

Úhel čela γ je definován jako úhel, který svírá tečná rovina vedená k čelu ve zvoleném místě ostří. Velikost tohoto úhlu má rozhodující vliv na pevnost břitu, velikost řezného odporu, výslednou jakost obrobené plochy a také na řeznou sílu. Čím větší úhel čela je, tím snadněji vniká břit do materiálu a řezný odpor se snižuje.

Úhel hřbetu α je definován jako úhel, který svírá tečná rovina vedená k hlavnímu hřbetu ve zvoleném místě ostří s rovinou řezu. Tento úhel má vliv na pevnost břitu a tření nože o obrobek.

Úhel břitu β je definován jako úhel, který ve zvoleném místě ostří spolu svírají tečná rovina vedená k čelu a tečná rovina vedená ke hřbetu. Tento úhel má vliv na pevnost břitu, velikost řezného odporu a také na odvod tepla z místa obrábění.

Úhel řezu δ je definován jako úhel, který svírá tečná rovina vedená k čelu ve zvoleném místě ostří s rovinou řezu.

Doplňkový úhel nastavení ψ_r je úhel měřený v nástrojové základní rovině mezi nástrojovou rovinou ostří a nástrojovou zadní rovinou.

Platí následující vztahy $\alpha + \beta + \gamma = 90° ; \gamma + \delta = 90°$

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

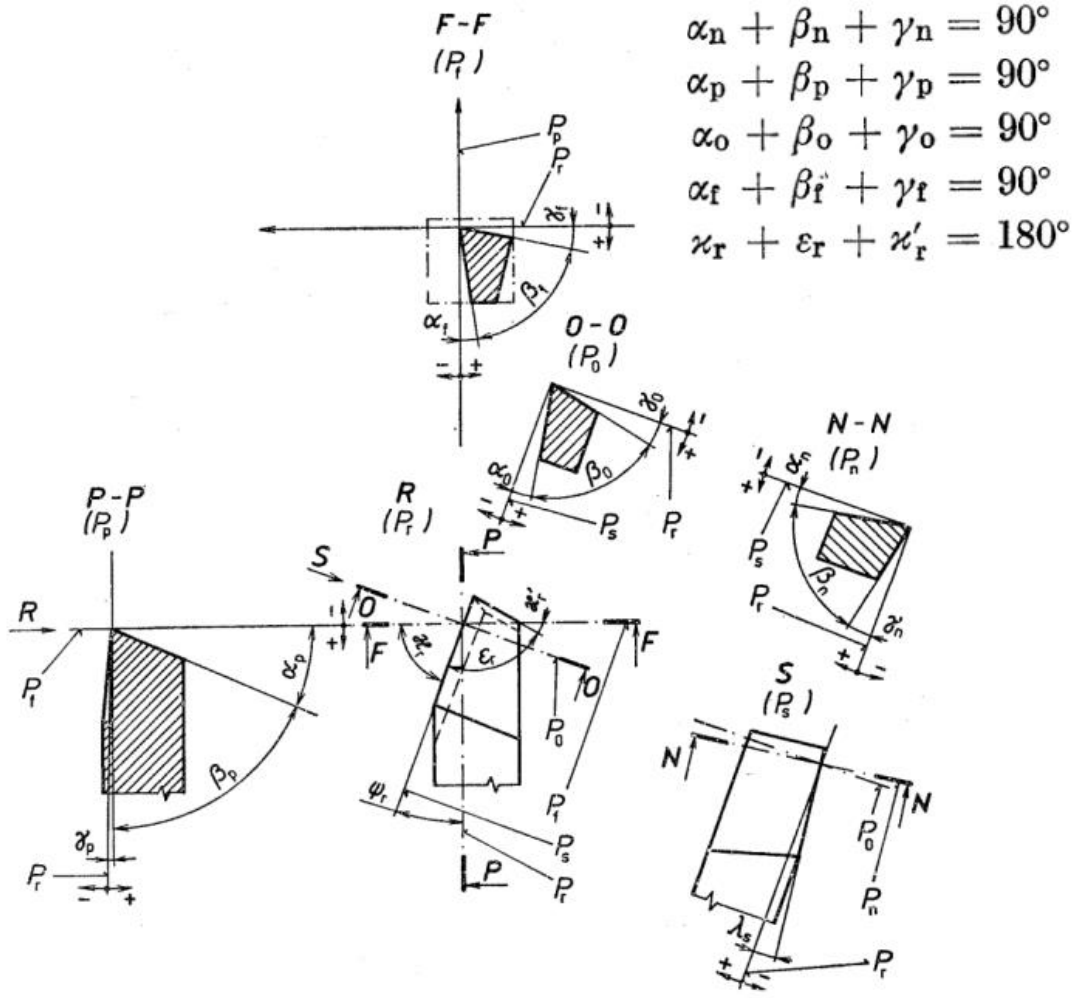
Nástrojová boční rovina P_f prochází bodem uvažovaným kolmo k ose nástroje a základní nástrojové rovině P_r.

Nástrojová zadní rovina P_p je definována bodem ostří a je kolmá k rovinám P_r a P_f.

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

Nástrojová normálová rovina P_n je kolmá na ostří a prochází uvažovaným bodem.

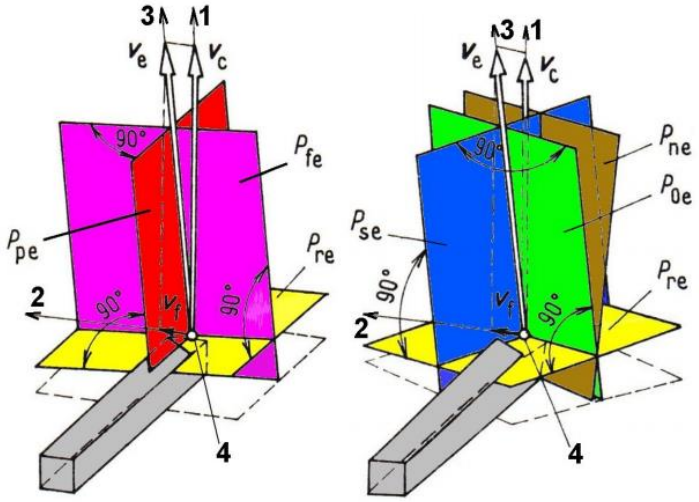
Nástrojová ortogonální rovina P_o prochází zvoleným bodem a také je kolmá na rovinu základní P_r a rovinu ostří P_s. [1] [6]



Obrázek 2-3 Geometrie soustružnického nože [7]

2.6 Pracovní roviny a úhly

Pracovní (kinetická) geometrie představuje v souřadnicové soustavě geometrii řezné části v procesu řezání. Roviny, které se používají v pracovní souřadnicové soustavě, se nazývají pracovní roviny. [8]



Obrázek 2-4 Pracovní geometrie soustružnického nože [9]

2.6.1 Pracovní roviny

Pracovní roviny jsou zobrazeny na obrázku 2-4.Pracovní základní rovina P_{re} je rovina, která prochází bodem ostří a je kolmá na směr řezného pohybu. Pracovní boční rovina P_{fe} je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, ve které leží vektory všech pohybů (v_c,v_f,v_e), a která je kolmá na pracovní základní rovinu P_{re}. Pracovní rovina zadní P_{pe} je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, je kolmá na pracovní rovinu základní P_{re} a na pracovní rovinu boční P_{fe}. Pracovní rovina ostří P_{se} je rovina tečná k ostří v uvažovaném bodě ostří a je kolmá na pracovní rovinu základní P_{re}. Pracovní rovina ortogonální P_{oe} je rovina procházející uvažovaným bodem ostří kolmá na pracovní rovinu základní P_{re} a pracovní rovinu ostří P_{se}. Pracovní rovina normálová P_{ne} je rovina kolmá na ostří ve zvoleném bodě ostří. [9]

2.6.2 Pracovní úhly

Pracovní úhel nastavení hlavního ostří κ_{re} je definovaný jako úhel mezi pracovní rovinou ostří P_{se} a pracovní rovinou P_{fe} měřený v pracovní základní rovině P_{re}. Pracovní úhel nastavení vedlejšího ostří κ_{re}' je úhel mezi pracovní rovinou vedlejšího ostří P_{se}' a pracovní rovinou P_{fe} měřený v pracovní základní rovině. Pracovní úhel sklonu ostří λ_{se} je definován jako úhel mezi pracovním ostřím S_e a pracovní základní rovinou P_{re} a čelem, měřený v příslušné pracovní rovině. Pracovní úhel břitu β_e je úhel, který svírá čelo a hřbet nástroje. Pracovní úhel hřbetu α_e je úhel mezi hřbetem nástroje a pracovní rovinou ostří P_{se} měřený v příslušné pracovní rovině. [9]

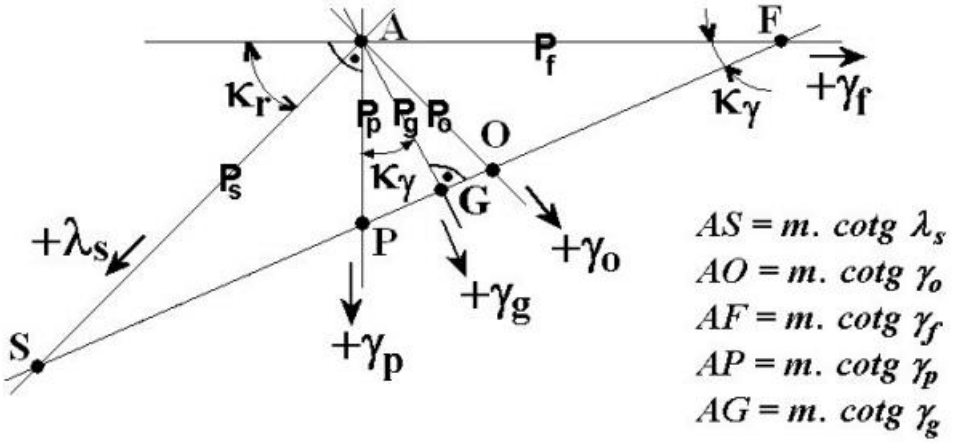
2.7 Břitové diagramy

Břitové diagramy čela a hřbetu slouží k rychlému určení vzájemné závislosti jednotlivých nástrojových úhlů a využívají se zpravidla při ostření nástrojů. Jejich konstrukce vychází z jednotkové vzdálenosti uvažovaného bodu ostří od základny nástroje. Protože vzdálenost uvažovaného bodu ostří od základny nástroje je rovna jedné, je zřejmé, že úsečka

AF představuje na obrázku 2-5 kotangentu úhlu γ_f a na obrázku 2-6 tangentu úhlu α_f. Podobně jako úhly měřené v rovině P_f, platí i pro úhly v dalších nástrojových rovinách předpoklad, že odpovídající úsečky v břitovém diagramu představují hodnoty jejich goniometrických funkcí. [10]

2.7.1 Břitový diagram čela

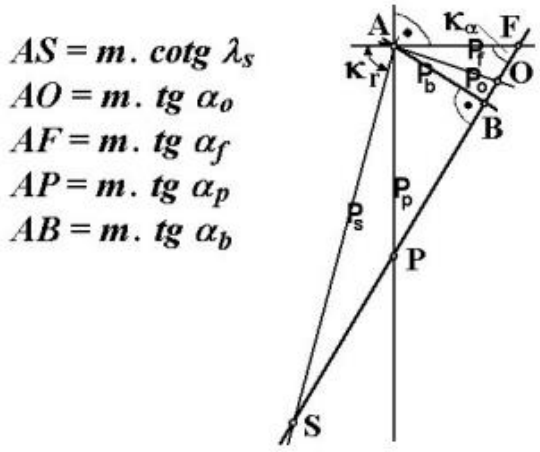
Slouží pro stanovení vzájemné závislosti úhlů $\kappa_r, \lambda_s, \gamma_0$ (nástrojový úhel nastavení hlavního ostří, nástrojový úhel sklonu hlavního ostří, nástrojový ortogonální úhel čela) a úhlů $\gamma_f, \gamma_p, \gamma_g, \kappa_\gamma$ (nástrojový boční úhel čela, nástrojový zadní úhel čela, nástrojový úhel největšího spádu čela, pomocný úhel pro stanovení polohy nástrojové roviny největšího spádu čela). Při konstrukci obrázku 2-5 je bez výjimky využívána goniometrické funkce kotangens. [10]



Obrázek 2-5 Břitový diagram čela [10]

2.7.2 Břitový diagram hřbetu

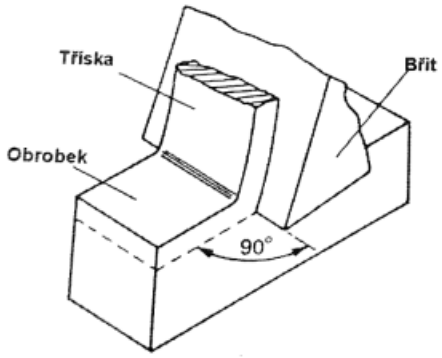
Slouží pro stanovení vzájemné závislosti úhlů $\kappa_r, \lambda_S, \alpha_0$ (nástrojový úhel hlavního ostří, nástrojový úhel sklonu hlavního ostří, nástrojový ortogonální úhel hřbetu) a úhlů $\alpha_f, \alpha_p, \alpha_b$(nástrojový boční úhel hřbetu, nástrojový zadní úhel hřbetu, nástrojový úhel největšího spádu hřbetu, pomocný úhel pro stanovení polohy nástrojové roviny největšího spádu hřbetu P_b). Při konstrukci obrázku 2-6 je využívána goniometrická funkce tangens s jedinou výjimkou nástrojového úhlu sklonu hlavního ostří λ_S, kde je využívána, tak jako při konstrukci břitového diagramu čela, goniometrické funkce kotangens. [10]



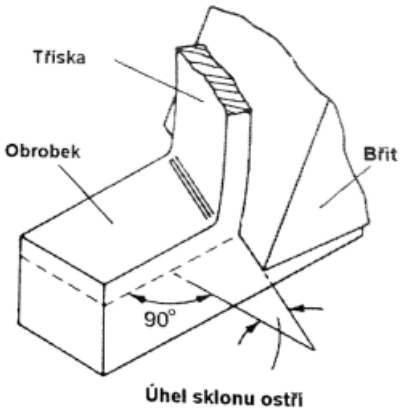
Obrázek 2-6 Břitový diagram hřbetu [10]

2.8 Řezná síla

Je definována jako síla, která brání proti vniknutí obráběcího nástroje do materiálu a tím vzniká odpor. Tvoří se při vtlačování břitu nástroje do obrobku. Jakmile dojde k překonání řezného odporu, který vzniká na povrchu součásti, dojde k oddělení vrstvy materiálu. Řezné síly jsou odlišné během ortogonálního (Obrázek 2-7) a obecného (Obrázek 2-8) řezání. Pokud se bude mluvit o ortogonálním řezání neboli o řezání volném, jedná se o takový druh řezání, při kterém je ostří kolmé na směr řezného pohybu a síly působí pouze v rovině. Tento způsob se ale nebude dále rozebírat, neboť se vyskytuje převážně u frézování. Dalším druhem řezných sil jsou řezné síly u obecného řezání. Při tomto způsobu jsou složky síly F rozděleny do složky řezné síly F_c, síly posuvu F_f a pasivní síly F_p. Složka řezné síly F_c působí ve směru hlavního řezného pohybu a je ze všech složek bezesporu největší. Oproti tomu složka síly posuvu F_f leží ve směru posuvu a ve směru největší tuhosti obráběcího stroje. A nakonec pasivní síla F_p, která působí kolmo na obráběnou plochu. Ovlivnění přesnosti obrobené plochy a chvění při obrábění je způsobeno tím, že pasivní síla působí ve směru nejmenší tuhosti obráběcí soustavy. [5] [11]



Obrázek 2-7 Ortogonální řezání [11]



Obrázek 2-8 Obecné řezání [11]

2.9 Měření velikosti řezných sil

Tato kapitola se zabývá rozdělením řezných sil podle způsobu měření, které může být prováděno buď přímou nebo nepřímou metodou.

2.9.1 Nepřímé měření řezných sil

Pokud bude řečeno, že se má řezná síla určit pomocí nepřímé metody, vyjde se ze vztahu (3), který zohledňuje převážně výkon elektromotoru obráběcího stroje

$$P_c = F_c . v_c \ [W] \quad (3),$$

kde:

P_c – řezný výkon [W],

F_c – řezná složka síly obrábění [N],

v_c – velikost řezné rychlosti při obrábění [$m.min^{-1}$].

Ze vztahu (3) vyplývá, že pokud se bude aplikovat nepřímé měření, výsledkem bude pouze řezná složka síly F_c a nikoliv celková velikost řezné síly F. Jakmile je potřeba stanovit konkrétní hodnotu užitečného výkonu $P_{už}$ [W], použije se vztah (4).

$$P_{už} = P_c - P_o \ [W], \quad (4),$$

kde:

P_c – výkon stroje [W],

P_o – výkon stroje naprázdno [W].

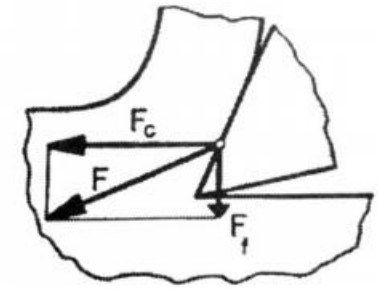
Potom řezná složka síly řezání je $F_c = \frac{P_{už}}{v_c}$ [N] (5),

kde:

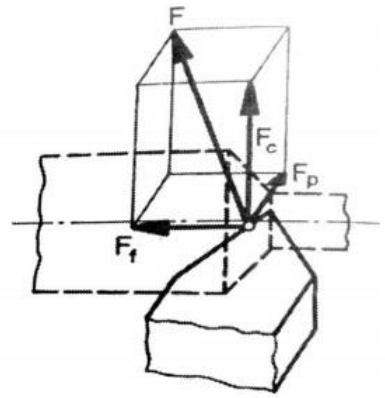
$P_{už}$ – užitečný výkon [W],

v_c – řezná rychlost[m/min].

Největší přednost této metody je v jednoduchosti provedení, ceně a také faktu, že ji lze použít u veškerého obrábění. Mezi hlavní nevýhody patří relativně velká nepřesnost výsledků z měření, což je způsobeno rozdílnou účinností stroje při zatížení a při chodu na prázdno. Výsledná síla řezání je rovna vztahu (6).



Obrázek 2-9 Síly při ortogonálním řezání [11]



Obrázek 2-10 Síly při vázaném řezání [11]

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \ [N] \quad (6),$$

kde:

F_c – řezná složka síly obrábění [N],

F_f – složka síly posuvu [N],

F_p – pasivní síla [N]. [11]

2.9.2 Přímé měření řezných sil

Mezi nejpoužívanější způsoby měření řezných sil se řadí měření pomocí dynamometru, který pracuje na principu měření elastické deformace obráběcí soustavy. Jsou na ně kladeny vysoké požadavky, a to jak na tuhost, citlivost, stálost údajů, reprodukovatelnost, tak i na konstrukci a minimální setrvačnost. Dělí se podle počtu měřených složek síly řezání na jednosložková, dvousložková, třísložková měřidla a měřidla na měření kroutících momentů. Na měření se může použít mechanický, hydraulický a pneumatický dynamometr. Mezi další možnosti, jak měřit řeznou sílu patří piezoelektrický dynamometr (Obrázek 2-11). Ten pracuje na základě vzniku elektrického náboje na povrchu určitých krystalů při mechanickém zatížení. Při zatížení dynamometru je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly a při snížení zatížení opět klesá. [11]

Obrázek 2-11 Piezoelektrický dynamometr [11]

2.10 Upínací síly

Co se týká závislosti řezných sil na těch upínacích, jsou to právě řezné síly, které určují směr, velikost a působiště těch upínacích. Nedílnou součástí k určování upínacích sil jsou síly odstředivé. K těm je potřeba přihlížet zvláště v případech, kdy není obrobek vyvážen, tzn, že se na obrobku nachází kupříkladu drážka pro pero nebo nějaký přivařený kus k jedné části obrobku. Při vratném pohybu je odstředivá síla rovna

$F = \mathrm{m.\,a}$ [N] (7),

kde:

a– zrychlení [m.s^{-2}],

m – hmotnost [kg].

Pokud dojde ke konstantní velikosti zrychlení, potom se může psát, že velikost odstředivé síly

$\mathrm{F} = \mathrm{m}.\frac{\mathrm{v}}{\mathrm{t}}$ [N] (8),

kde:

v – rychlost pohybu [m.s^{-1}],

t – čas změny rychlosti pohybu [s]. [12] [13]

2.11 Měrný řezný odpor

Měrný řezný odpor je definován jako jednotka řezného odporu na jednotku průřezu třísky. A jeho výpočet vychází z velikosti síly ve směru hlavního řezného pohybu. Proto lze napsat

$\mathrm{k_c} = \frac{\mathrm{F_c}}{\mathrm{S}}$ [MPa] (9),

kde:

F_C – řezný odpor [N],

S – vyjadřuje plochu třísky, které byla změřena v základní rovině [mm^2].

To je rovina, která je kolmá na směr hlavního pohybu. Velikost měrného řezného odporu jako celku závisí především na podmínkách obrábění. V praxi se určují jeho hodnoty podle grafů, které byly vytvořeny experimentálně. Na velikost měrného řezného odporu má vliv obráběný materiál, posuv, řezná rychlost a např. úhel řezu. S rostoucím posuvem nebo tloušťkou odřezávané vrstvy klesá měrná řezná síla. Střední velikost měrného řezného odporu se obvykle

pohybuje řádově 3 až 5krát výše, než je pevnost obráběného materiálu v tahu. Jak klesá tloušťka odřezávané vrstvy, řezný odpor se zvětšuje. Dá se také vypočítat z rovnice (10).

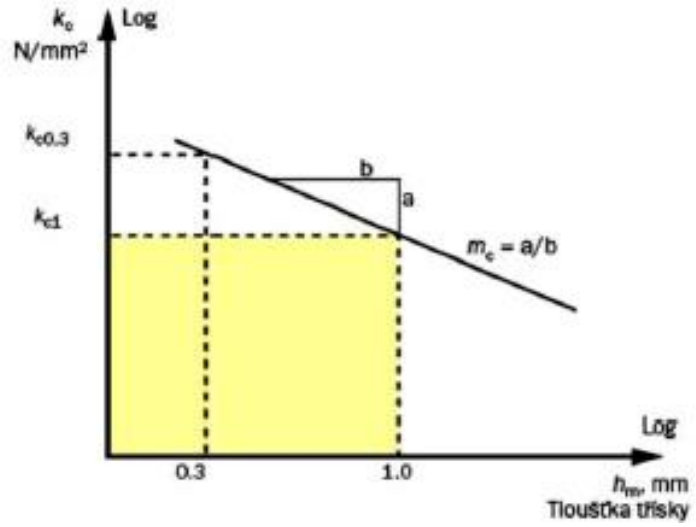
$$k_c = k_{c1} . a^{-mc} . (1 \frac{\gamma_0}{100}) \text{ [MPa]} \quad (10),$$

kde:

k_{c1} – měrný řezný odpor [MPa],

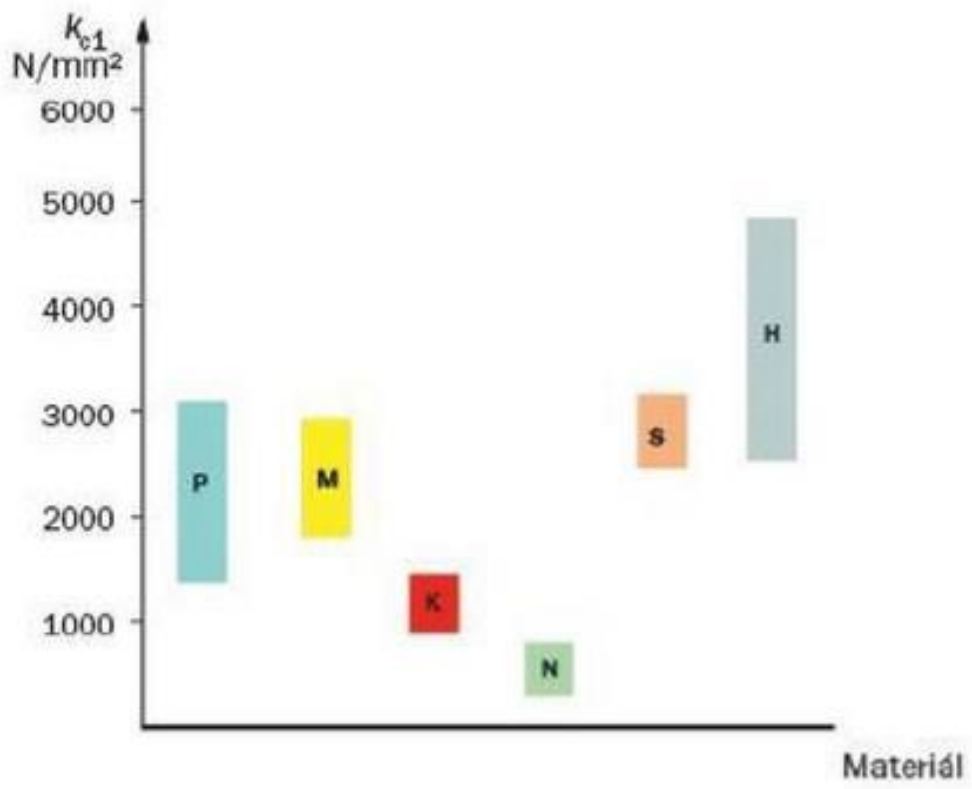
γ_0 – úhel čela měřený v ortogonální rovině [°],

m_c – koeficient změny intenzity měrného řezného odporu ve vztahu k tloušťce třísky [-], velikost koeficientu m_c lze určit z následujícího grafu, kde m_c=a/b. [5]



Obrázek 2-12 Určení velikosti koeficientu m_c [5]

V dnešní době je kladen důraz na snížení měrného řezného odporu kvůli snížení zatížení stroje. V praxi je kladen největší důraz na kvalitu a produktivitu práce. Z důvodu produktivity je vyžadováno se pokoušet celý obrobek obrábět najednou. To je vhodné při dokončovacích operacích, ale vzhledem k hospodárnosti výroby je optimální volit co nejmenší přídavky jak na obrábění, tak na tloušťku odebíraného materiálu.



Obrázek 2-13 Měrný řezný odpor [5]

Měrný řezný odpor se dá zjistit například pomocí grafu, který je vyobrazen na obrázku 2-13. Ten popisuje, jak se mění měrný řezný odpor v závislosti na obrobitelnosti příslušného materiálu. [12] [13] [5]

2.12 Vliv vyosení soustružnického nože na změnu pracovních úhlů

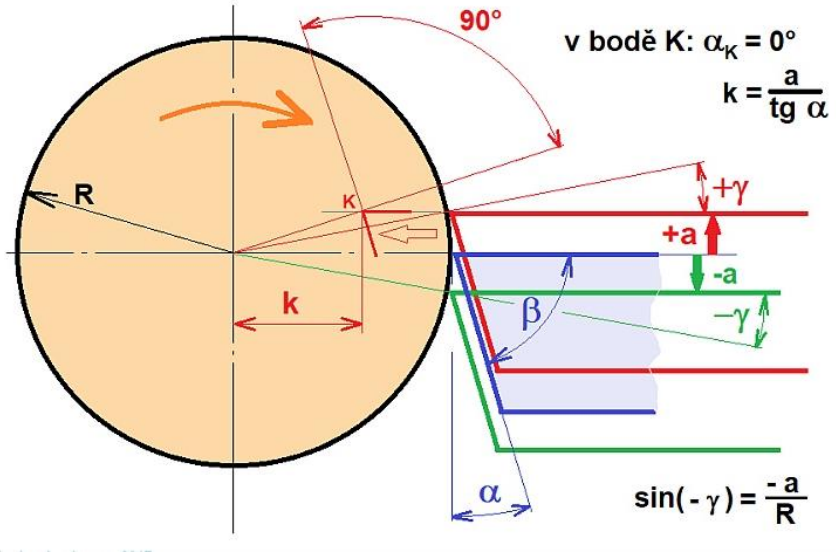
Pokud se chce docílit vyosení soustružnického nože, jsou dvě možnosti, jak to provést. Buď soustružnický nůž posunout nad osu nebo pod osu obrobku. Jestliže bude špička nástroje nad osou o vzdálenost a, potom se při přibližování špičky k ose obrobku bude zmenšovat úhel hřbetu až ve vzdálenosti, která je popsána ve vztahu (11).

$$k = \frac{a}{tg\alpha}\ [mm] \quad (11).$$

Naopak pokud se bude špička nástroje nacházet pod osou obrobku, bude se nepříznivě zmenšovat úhel čela o úhel, který je popsán ve vztahu (12).

$$-\gamma = \arcsin -\frac{a}{R}\ [°] \quad (12).$$

Oba tyto případy jsou znázorněny na obrázku 2-14, kde R značí poloměr obrobku. [4]



Obrázek 2-14 Změna geometrie soustružení dle polohy špičky nože [4]

2.13 Vliv průměru obrobku na řeznou sílu

Z výše uvedeného rozboru je patrné, že čím je větší průměr obrobku, tím se zmenšuje celková hodnota řezné síly. Jinak řečeno, pokud je uvažován velký průměr obrobku, tak ze vzorce (1) je patrné, že řezná rychlost bude vysoká, jelikož průměr obrobku se nachází v čitateli. Pokud se však zvětší řezná rychlost, tak je zřejmé, že bude ovlivněn vztah (5), který určuje velikost řezné složky síly, jelikož se řezná rychlost nachází ve jmenovateli. To znamená, že čím větší bude řezná rychlost, tím nižší bude velikost složky řezné síly. Ve výsledku se to projeví v součtu složek řezné síly ve vztahu (6).

Může být tedy konstatováno, že čím větší bude průměr, tím menší bude celková řezná síla. Pokud však máme malý průměr obrobku, tak velikost řezné rychlosti bude nižší a tím pádem se zvětší velikost řezné složky řezné síly. Poté se toto zvětšení opět projeví v součtu jednotlivých složek řezné síly a tím pádem bude celková velikost řezné síly vyšší. V ojedinělých případech vzniká i dostředivá složka řezných sil způsobená nesymetričností obrobku. Cílem technologa či konstruktéra je tyto síly zmenšit, aby nedocházelo k zatěžování stroje, přílišnému opotřebování nástroje či k přehřívání místa řezu. Nadále je však nutné zachovat efektivitu a rychlost práce, která se odvádí na obráběcích strojích. Proto je nutné stále hledat optimální řešení, které se skrývá v podobě kompromisu mezi výkonem, kvalitou a rychlostí výroby.

Pokud se bude zmiňovat závislost průměru obrobku na velikosti měrného řezného odporu, je patrné, že pokud bude velký průměr obrobku a tím nižší síla, tak velikost vztahu (9) bude taktéž malá. Pokud však bude malý průměr obrobku, tak velikost vztahu (9) bude stoupat. Velikost této veličiny poté ovlivní vztah (10). Tudíž se může říct, že čím větší průměr obrobku je, tím nižší řezný odpor bude. Naopak s klesajícím průměrem obrobku bude velikost řezného odporu stoupat.

3 Návrh a realizace experimentu

3.1 Plán experimentu

Tato kapitola bude podrobně vysvětlovat, jak celý experiment s měřením řezné síly probíhal. Vzhledem k tomu, že piezoelektrický dynamometr je zařízení, které je schopno měřit přímo řeznou sílu, nebude potřeba žádného přepočítávání pomocí dalších vztahů pro to, aby bylo dosaženo požadované hodnoty.

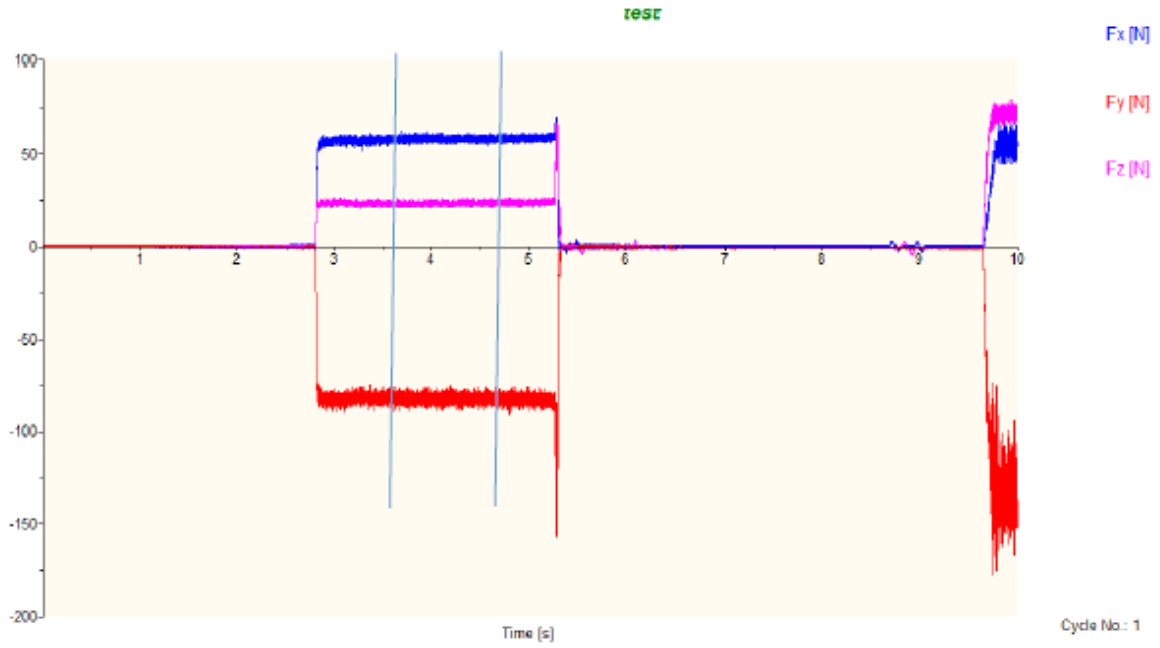
Experiment byl prováděn na půdě Západočeské univerzity v Plzni v laboratořích Regionálního technologického institutu, na soustružnickém stroji MAXXTURN 25. Předtím, než bude měření zahájeno, je nezbytné nastavit zařízení a připravit pracoviště.

Pokus se bude provádět na CNC soustruhu. Na upnutém nástroji bude namontován piezoelektrický dynamometr a polotovarem bude tyč kruhového průřezu o průměru 100 mm a délce 50 mm a opatřena osazením o průměru 25 mm v délce 25 mm, za které se obrobek upnul do sklíčidla. Vřeteno se roztočí na určité otáčky, které se budou v čase měnit a všechno ostatní, co se týká řezných podmínek, je rozepsáno v kapitole řezných podmínek. Soustružník odebere z polotovaru 1 mm na průměru a přehled o tom, jak se měnila řezná síla na čase, nám zajistí dynamometr, který je napojen na počítač, kde je vyobrazen graf s časovým intervalem celé operace na vodorovné ose a velikost řezné síly na svislé ose. Z toho poté bude vybrán úsek, kde je nástroj již v řezu a vypočítá se aritmetický průměr řezné síly, která se poté zanese do tabulky. Takhle se měření zopakuje tolikrát, dokud průměr polotovaru neklesne na 25 mm. Zároveň se sleduje, jak se mění řezná síla při vyměnění břitové destičky, aby se zabránilo zkreslenému výsledku z experimentu. Z naměřených hodnot se udělá graf, který bude ukazovat závislost řezné síly na průměru obrobku.

Měření bude probíhat na dvou polotovarech, přičemž při měření u prvního polotovaru nebude standardně docházet k jakýmkoliv úpravám, ale u polotovaru číslo dva dochází k posunutí nože v ose y. Zpočátku je nůž posunut o 1 mm, následně o 1,5 mm a nakonec o 2 mm. Z teorie se předpokládá, že velikost řezné síly by se měla určitým způsobem změnit.

Co se týká přenosu dat z dynamometru, tak jejich přenos probíhá pomocí elektrického náboje, jenž se vede skrz zesilovač (Obrázek 3-1) a digitalizační kartu, které jsou spojeny s počítačem. V počítači je pak možno zobrazit všechny složky řezné síly v programu, který se jmenuje DynoWare (Obrázek 3-2). Velký požadavek je na nastavení synchronizace a spojení programu se zbytkem sestavy. Pokud by došlo k chybnému nastavení hodnot v programu a zesilovači, měření by bylo chybné a došlo by k přetížení kanálů. Tento nábojový zesilovač od firmy Kistler disponuje 8 kanály. K tomuto případu slouží červená dioda, která se rozsvítí v momentě, kdy by byly kanály přetíženy.

Obrázek 3-1 Nastavení rozsahu zesilovače [5]



Obrázek 3-2 Vyhodnocení řezné síly programem DynoWare [5]

Také je potřeba nastavit vhodný rozsah měření řezných sil. Ten se nastavuje podle plánovaných řezných podmínek. Na obrázku 3-1 je vidět příklad nastavení zesilovače a na obrázku 3-2 je zobrazen názorný příklad měření složky řezné síly. Pro sledování řezné síly je nejdůležitější hodnota Fz, která se takto značí v obecném souřadnicovém systému, avšak na dynamometru je označována jako Fy a je nazývána hlavní složka řezné síly. Další složky řezné síly (posuvová a pasivní), jsou pro tento experiment irelevantní. Na obrázku 3-2 je vidět, jak program DynoWare byl schopen vykreslit křivku naměřených řezných sil. Při pohledu na obrázek 3-2 je možno spatřit, kdy dojde ke kontaktu nástroje s obrobkem a k rozkmitání soustavy S-N-O-P, což má za následek rozhození měření. Proto je nutné brát v úvahu při vyhodnocování střední

hodnoty v časovém okamžiku, kdy je celá soustava již v ustáleném stavu. Oblast výběru časového intervalu se označí dvěma svislými čárami a poté počítač zobrazí průměrnou hodnotu z daného intervalu. [5]

3.1.1 Faktory experimentu

K nejdůležitějším faktorům celého měření se řadí:

a) Sledovaná odezva je hlavní složka řezné síly, která je v tomto případě síla $F_{y,}$
b) Průměr obrobku, který se každým přejetím zmenšuje o 1 mm,
c) Opotřebení břitové destičky, které je potřeba sledovat, jelikož tento faktor značně ovlivňuje velikost řezné síly.

3.1.2 Volba řezných podmínek

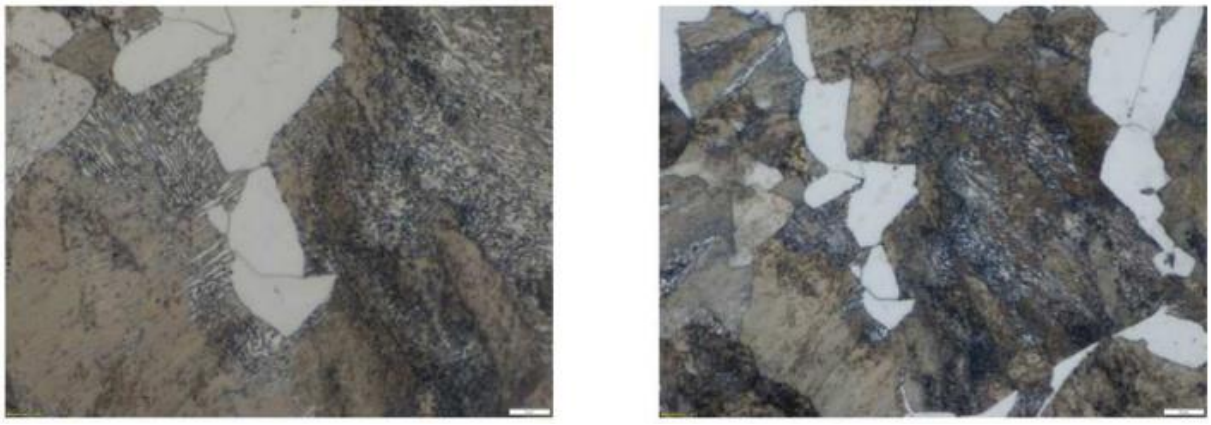
Co se týká řezných podmínek, ty jsou definovány v tabulce níže (Tabulka 3-1). Důležité je zmínit, že tyto řezné podmínky jsou stálé a v čase se neměnily a od těchto podmínek se odvíjí otáčky, které se v čase mění, jelikož se mění průměr obrobku. Délka měřeného úseku je 10 vteřin.

Tabulka 3-1 Zvolené řezné podmínky

Řezná rychlost v_c [m.min^{-1}]	470
Posuv na otáčku f [mm.ot^{-1}]	0,3
Hloubka řezu a_p [mm]	0,5

3.2 Materiál a polotovar pro experiment

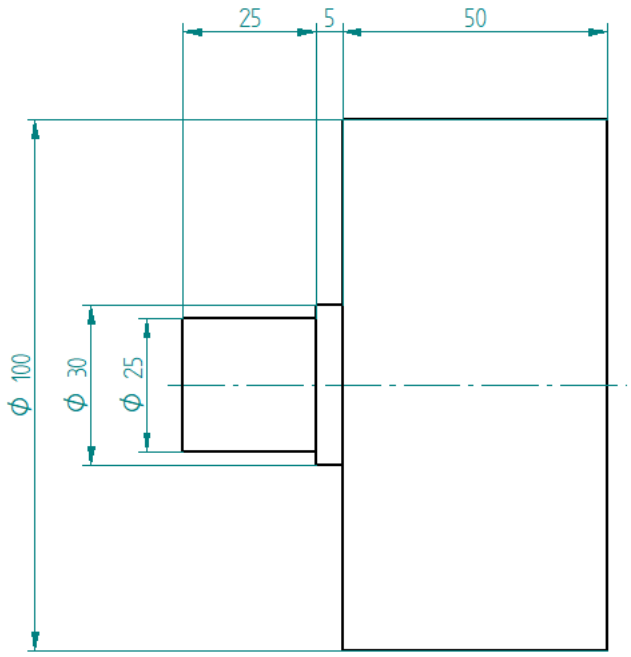
Materiál, který byl použit na měření experimentu je ČSN 41 2050.1, což je uhlíková ocel válcovaná za tepla, určena k základnímu zpracování.



Obrázek 3-3 Struktura materiálu [14]

Tyč je nařezána na délku 50 mm a její výchozí průměr je 100 mm, který musel být zarovnán z důvodu zlepšení drsnosti povrchu, což je podstatné pro přesnost měření. Znázornění vzorku je zobrazeno na obrázcích 3-4 a 3-5. [15]

Obrázek 3-4 Fotografie polotovaru

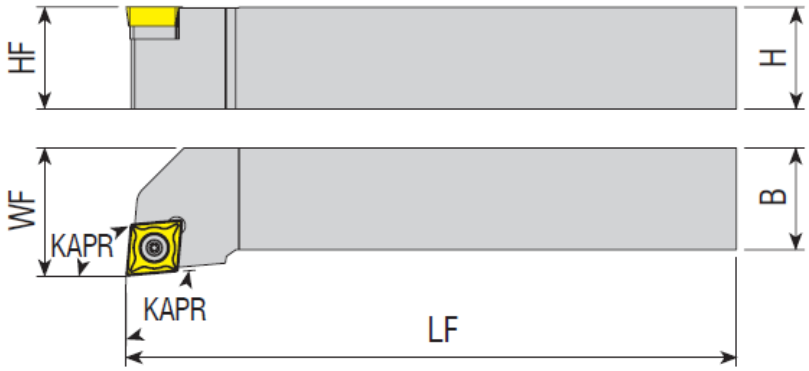


Obrázek 3-5 Výkres polotovaru

3.3 Vybavení pro experiment

Pro měření experimentu byl jako stroj použit soustruh Emco MAXXTURN 25, soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou a piezoelektrický dynamometr..

3.3.1 Soustružnický nůž



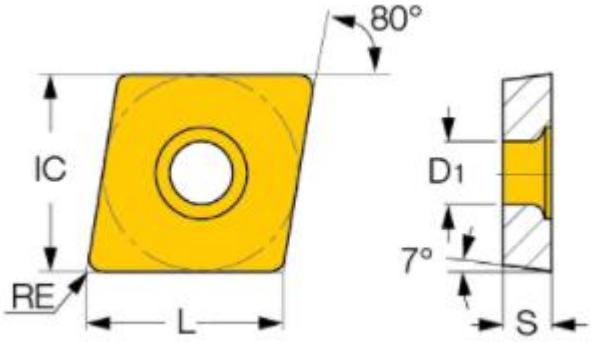
Obrázek 3-5 Držák pro VBD [16]

Při experimentu bude použit soustružnický nůž (obrázek 3-5) pro podélné soustružení s vyměnitelnou břitovou destičkou a úhlem nastavení hlavního ostří $\kappa_r = 95°$. Úhel čela VBD činil 18° kvůli jejímu utvařeči. Tyto úhly jsou pro experiment nejdůležitější. Jmenovité rozměry nástrojového držáku jsou popsány tabulce 3-2.

Tabulka 3-2 Velikost soustružnického nože [16]

HF=H [mm]	12
B [mm]	12
LF [mm]	80
WF [mm]	16

Druh vyměnitelné břitové destičky byl zvolen CCMT 09T304-SM IC 8250 a její geometrii je možno vidět na obrázku 3-6. Označení IC8250 znamená, že se jedná o houževnatý substrát, který je opatřen vrstvou, jenž je napuštěná kobaltem. Vykazuje vysokou houževnatost a odolnost proti opotřebení. Jmenovité rozměry VBD jsou popsány v tabulce 3-3.



Obrázek 3-6 Charakteristika VBD [17]

Tabulka 3-3 Jmenovité rozměry VBD [17]

L [mm]	9,7
IC [mm]	9,52
S [mm]	3,97
RE [mm]	0,4
D1 [mm]	4,4

[16] [17]

3.3.2 Stroj

Soustruh EMCO MAXXTURN 25, jenž je vidět na obrázku 3-7, je dokonalé řešení pro možnost komplexního opracování, co se týká drobných dílů. Jedná se o úsporné zařízení s vysokou přesností, které je vhodné pro tyče od průměru 25 mm a do průměru 85 mm pro upínání ve sklíčidle. V revolverové hlavě je 12 míst pro držáky nástrojů VDI16. Díky 36 indexovaným polohám může být počet řezných nástrojů zvýšený až na celkový počet 42. Tento soustruh je vybavený řídícím systémem SIEMENS anebo FANUC a standardně obsahuje ShopTurn a případně ManualGuide. Co se týká charakteristiky stroje, ta je popsána v tabulce 3-4, kde jsou uvedeny základní parametry.

Obrázek 3-7 Soustruh MAXXTURN 25 [5]

Tabulka 3-4 Charakteristika soustruhu [18]

Pracovní prostor	
Posuv v ose X/Y/Z [mm]	100/35/300
Vzdálenost mezi vřeteny [mm]	485
Rychloposuv v ose X/Y/Z [m/min]	20/10/30
Hlavní vřeteno	
Maximální otáčky [ot/min]	8000
Maximální výkon vřetena [kW]	6,5
Maximální kroutící moment [Nm]	20
Revolverová hlava	
Počet naháněných nástrojů	6
Maximální otáčky [ot.min^{-1}]	6000
Maximální výkon nástrojů [Kw]	1,2
Stroj	
Rozměry (délka x šířka x výška) [mm]	2180 x 1425 x 1870
Hmotnost stroje [kg]	2100

[18]

4 Vyhodnocení experimentu

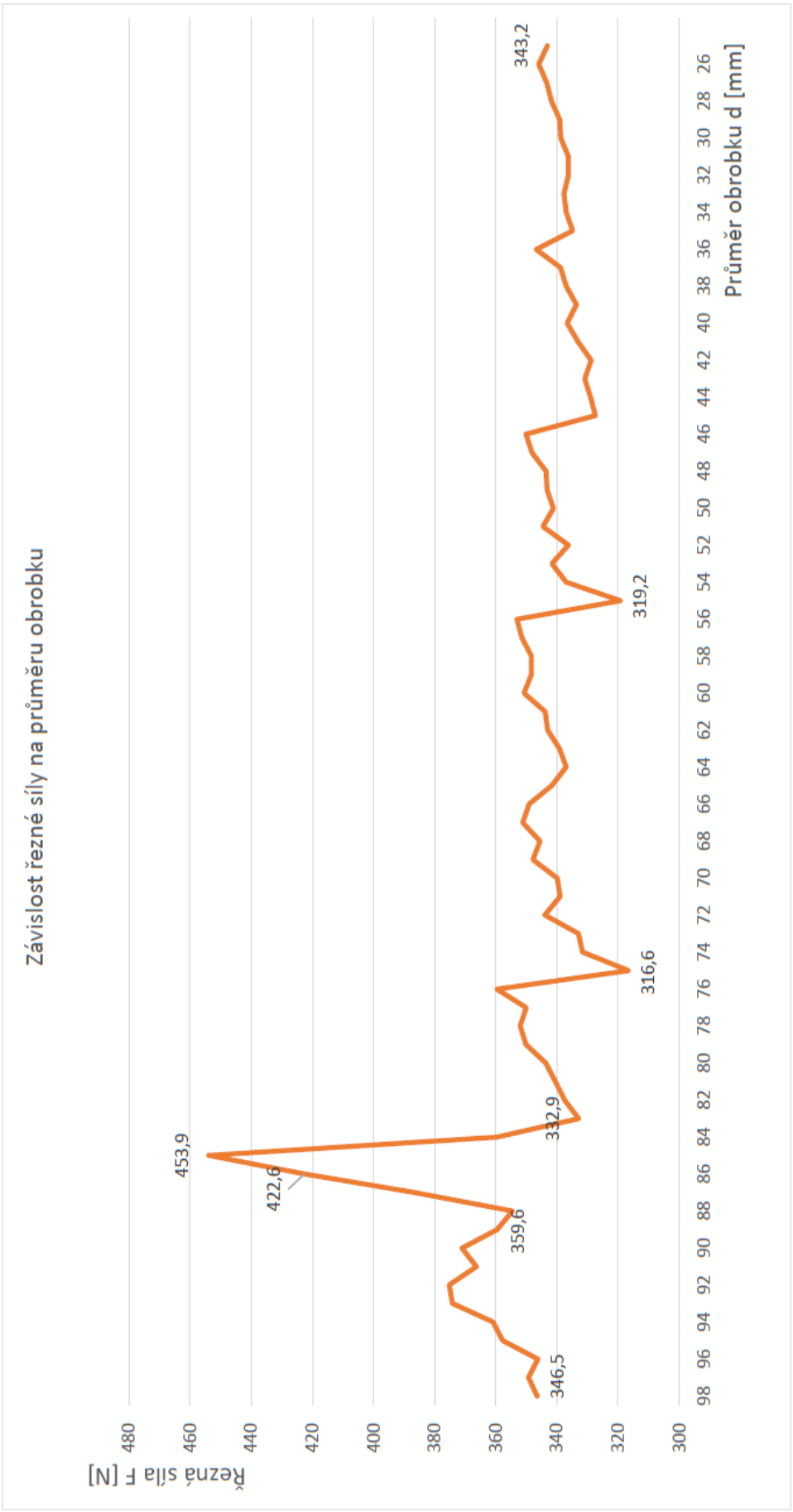
Proběhlo měření pro zjištění vlivu průměru obrobku na řeznou sílu. V prvním případě se začíná měřit až od průměru 99 mm a nikoliv 100 mm, jelikož při prvním měření proběhla chyba a tento přejezd nebyl zaznamenán. Dále už se pokračovalo standardním postupem. Během experimentu došlo k několika vyštípnutím řezných destiček a také vytažení otřepu, což ovlivnilo velikost řezné síly.

Předpoklad pro tento experiment byl fakt, že se hlavní složka řezné síly bude měnit v závislosti na průměru obrobku tak znatelně, že její nárůst bude možný vidět na zpracovaném grafu. Bohužel tato skutečnost se na první pohled nepotvrdila, na přiložených diagramech jde vidět pouze citlivost na výměnu břitové destičky, která se podepsala ve snížení řezné rychlosti. Taktéž je z grafu patrný fakt, že při vytažení otřepu nebo vylomení destičky v řezu řezná síla rapidně vzrostla.

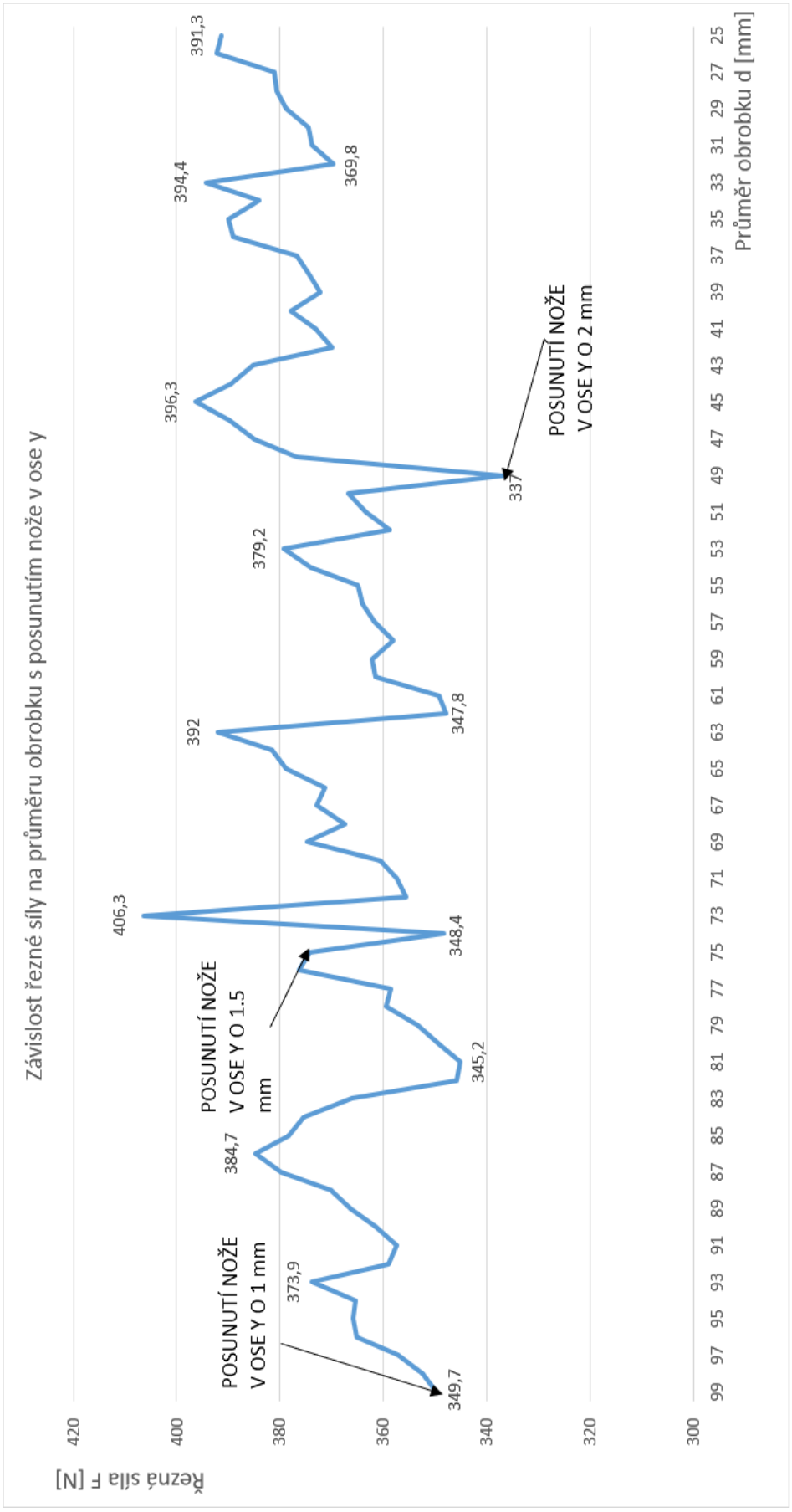
Teorie vlivu průměru obrobku na hlavní složku řezné síly se bohužel nepotvrdila, a to nejspíše z důvodu, že oblast měření byla pouze v rozsahu od 100 mm do 25 mm, což je pravděpodobně příliš malý rozsah. Dále je z měření patrné, že stav a kondice vyměnitelné břitové destičky má na výsledek vyšší vliv, než se předpokládalo. Jelikož se předpoklad v prvním případě nepotvrdil, bylo provedeno posunutí nože v ose y. Nejdříve o 1 mm, poté o 1,5 mm, a nakonec o 2 mm. Každé toto posunutí, bylo provedeno po odebrání 25 mm na průměru obrobku. První posunutí začalo na průměru 100 mm, dále byl nůž posunut, když obrobek dosáhl průměru 75 mm a finální posun proběhl v momentě, kdy obrobek byl na 50 mm svého průměru. V tomto případě se potvrdil předpoklad toho, že s klesajícím průměrem bude výraznějším způsobem stoupat velikost řezné síly.

Zároveň je také velice znatelné opotřebení vyměnitelné břitové destičky. Zatímco pro měření řezné síly bez vyosení soustružnického nože bylo použito 7 VBD, tak pro měření hodnot vyoseným nožem pod osou, bylo použito 8 VBD. Dále je důležité zmínit to, že naprosto ideálním případem by bylo, kdyby pro každé měření byla použita nová břitová destička. Tento způsob měření nebyl možný, kvůli finanční náročnosti celého experimentu. Důvod výměny břitové destičky po každém řezu je zřejmý. Jedná se o protiopatření, jak zamezit vlivu opotřebení nástroje a také jak eliminovat co nejvíce otřesy a vibrace, které můžou tímto opotřebením vznikat.

Grafické znázornění celého experimentu, je vyobrazeno na grafech 4-1 a 4-2, kde jsou vypracovány obě varianty. Hodnoty do těchto grafů jsou dány tabulkami 4-1, 4-2, 4-3 a 4-4, kde jsou zaneseny výsledky měření s posunutím nože pod osu obrábění i se standardním upnutím nástroje. I když se na první pohled může zdát, že velikost řezné síly nemá žádnou určitou závislost na průměru obrobku, při pozornějším zaměření se na záznam z měření je však možno zjistit, že při vynechání největších odchylek v měření, tzn. bodů, které mají nejvyšší či nejnižší hodnoty a nejvíce zkreslují výsledek, se závislost se projevila.



Graf 4-1 Závislost řezné síly na průměru obrobku bez vyosení nástroje



Graf 4-2 Závislost řezné síly na průměru obrobku s vysunením nástroje

4.1 Naměřené hodnoty při standardním upnutí nástroje

Tabulka 4-1 Naměřené hodnoty při experimentu bez vyosení nástroje

měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
n[min^{-1}]	1537	1553	1570	1587	1600	1620	1640	1658	1676	1695	1715	1735	1755	1775
d[mm]	98	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86	85
F[N]	347	349	346	358	361	374	375	366	371	360	355	387	423	454

měření	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
n[min^{-1}]	1795	1820	1842	1865	1889	1913	1938	1964	1990	2017	2045	2072	2102	2132
d[mm]	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	74	73	72	71
F[N]	360	333	338	341	344	350	352	350	360	317	332	333	344	339

měření	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
n[min^{-1}]	2163	2195	2228	261	2297	2332	2370	2407	2448	2488	2530	2574	2620	2666
d[mm]	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61	60	59	58	57
F[N]	340	348	346	351	349	342	337	339	343	344	351	348	348	352

měření	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
n[min^{-1}]	274	2766	2818	2872	2928	2986	3048	3112	3177	3245	3320	3394	3472	3560
d[mm]	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43
F[N]	353	319	337	342	336	345	341	343	344	348	350	328	329	331

měření	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
n[min^{-1}]	3642	3732	3830	3930	4037	4151	4268	4395	4527	4669	4820	4980	5150	5335
d[mm]	42	41	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30	29
F[N]	329	333	337	334	337	339	347	335	337	338	336	336	339	339

měření	71	72	73	74
n[min^{-1}]	5534	5748	5796	6225
d[mm]	28	27	26	25
F[N]	342	343	346	343

4.2 Naměřené hodnoty při vyosení nástroje o 1 mm

Tabulka 4-2 Naměřené hodnoty při experimentu s vyosením nástroje o 1 mm

měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
n[min^{-1}]	1521	1537	1553	1570	1587	1603	1621	1640	1657	1676	1695	1715	1735	1755
d[mm]	99	98	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	87	86
F[N]	350	352	357	365	366	365	374	359	357	362	366	370	380	385

měření	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
n[min^{-1}]	1775	1795	1820	1842	1865	1889	1913	1938	1964	1990
d[mm]	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76
F[N]	378	375	366	346	345	349	353	359	359	376

4.3 Naměřené hodnoty při vyosení nástroje o 1,5 mm

Tabulka 4-3 Naměřené hodnoty při experimentu s vyosením nástroje o 1,5 mm

měření	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
n[min^{-1}]	2017	2045	2072	2102	2132	2163	2194	2228	2261	2297	2332	2370	2408	2448
d[mm]	75	74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62
F[N]	374	348	406	356	357	361	375	368	373	371	379	382	392	348

měření	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
n[min^{-1}]	2488	2530	2574	2620	2666	2715	2765	2817	2870	2927	2987	3047
d[mm]	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50
F[N]	349	362	362	358	362	364	365	374	379	359	363	367

4.4 Naměřené hodnoty při vyosení nástroje o 2 mm

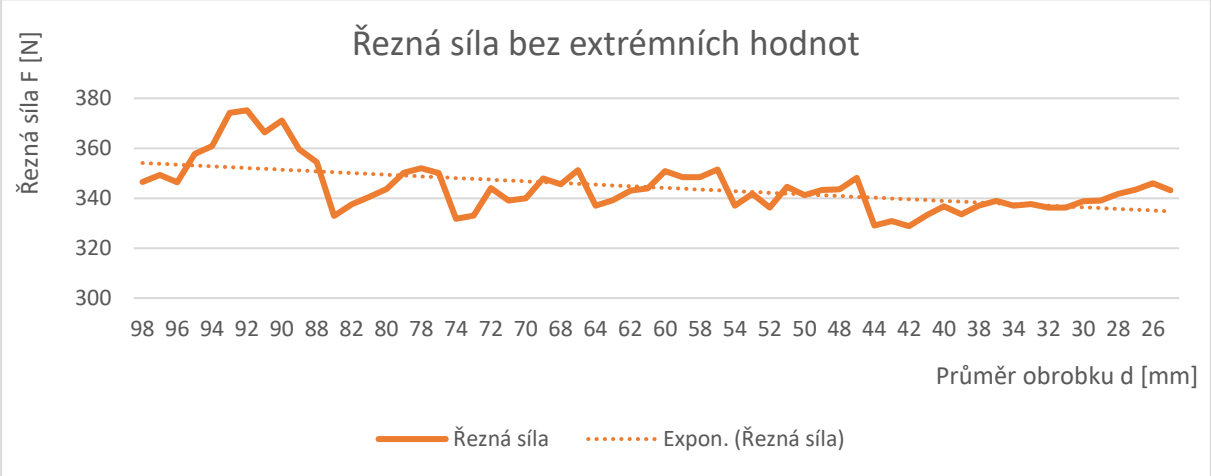
Tabulka 4-4 Naměřené hodnoty při experimentu s vyosením nástroje o 2 mm

měření	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
n[min^{-1}]	3111	3178	3245	3319	3394	3473	3557	3643	3733	3830	3930	4038	4150	4268
d[mm]	49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	37	36
F[N]	337	377	385	390	396	390	385	370	373	378	372	375	377	389

měření	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
n[min^{-1}]	4393	4527	4667	4820	4980	5152	5337	5535	5748	5977	6225
d[mm]	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25
F[N]	390	384	394	370	374	375	379	381	381	392	391

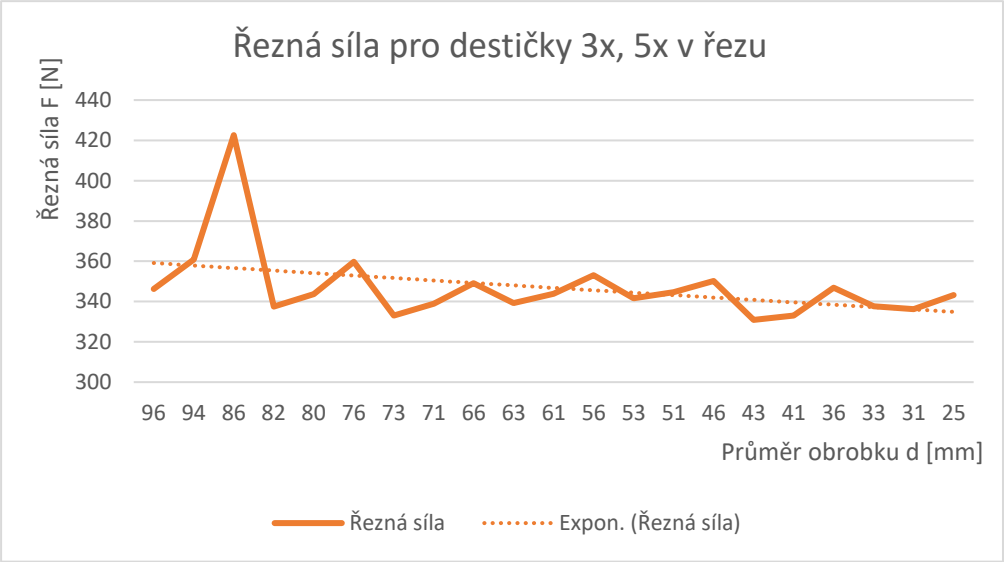
4.5 Standardní upnutí nástroje

Pro větší přesnost a přehlednost při měření experimentu jsou následně z naměřených hodnot odebrána data, která nepříznivým způsobem ovlivňují vyhodnocení a grafické zobrazení celého měření. Po odebrání těchto extrémů je zřetelněji vidět výsledek měření bez posunutí nože v ose y. Došlo k odebrání konkrétních číselných hodnot, které se zpravidla nachází před vyměněním břitové destičky, kde měla řezná síla teoreticky nejvyšší hodnotu, jelikož původní VBD byla již dost opotřebovaná na to, aby měření s touto destičkou v tomto nepříznivém stavu mělo dostatečnou vypovídající hodnotu k vyhodnocení. Další odebrání pro zpřesnění výsledku došlo v místech, kde je zcela znatelné vychýlení, jelikož i tyto výsledky nemusely být relevantní kvůli celkové kondici VBD. Na grafu 4-3 jsou vidět finální hodnoty bez naměřených dat, které jsou popsány výše.



Graf 4-3 Hodnoty řezné síly bez vychylujících hodnot

Z vloženého grafu 4-3 je vidět, že po odstranění nepříznivých hodnot a přidání spojnice trendu se neprojevuje závislost řezné síly na průměru obrobku podle očekávání, která nám popisuje teorie obrábění. Tím se dá konstatovat, že se vyvrací fakt z teoretické části práce a řezná síla s klesajícím průměrem také klesá. Tento trend není úplně zřetelný, a to z důvodu nízkého rozsahu měření, který byl dán relativně malým průměrem obrobku, jenž byl 100 mm. Tento nízký rozsah byl nezbytný pro vyhotovení experimentu, jelikož měření bylo limitováno možnostmi stroje.

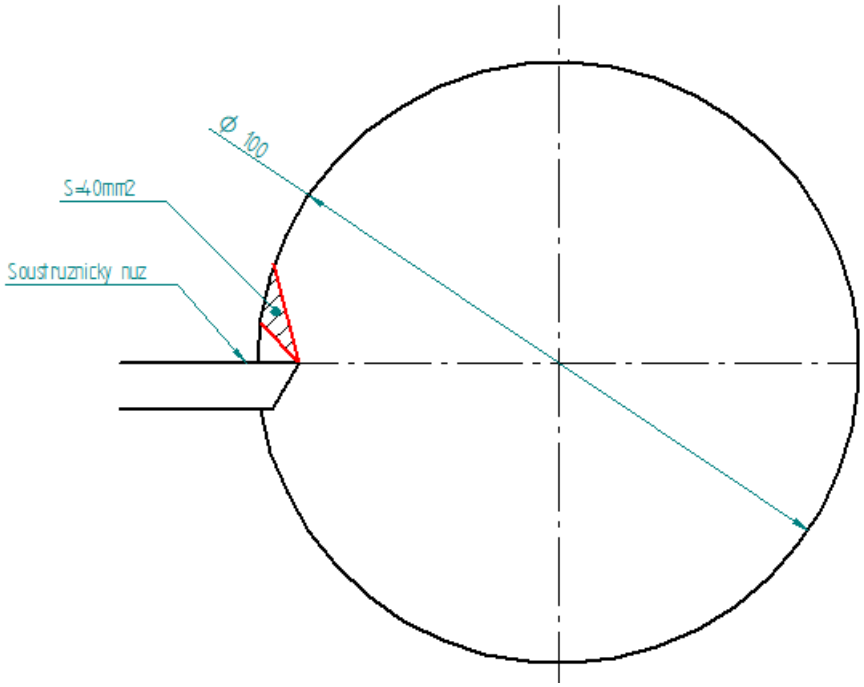


Graf 4-4 Hodnoty řezné síly bez vychylujících hodnot pro VBD 3x, 5x v řezu

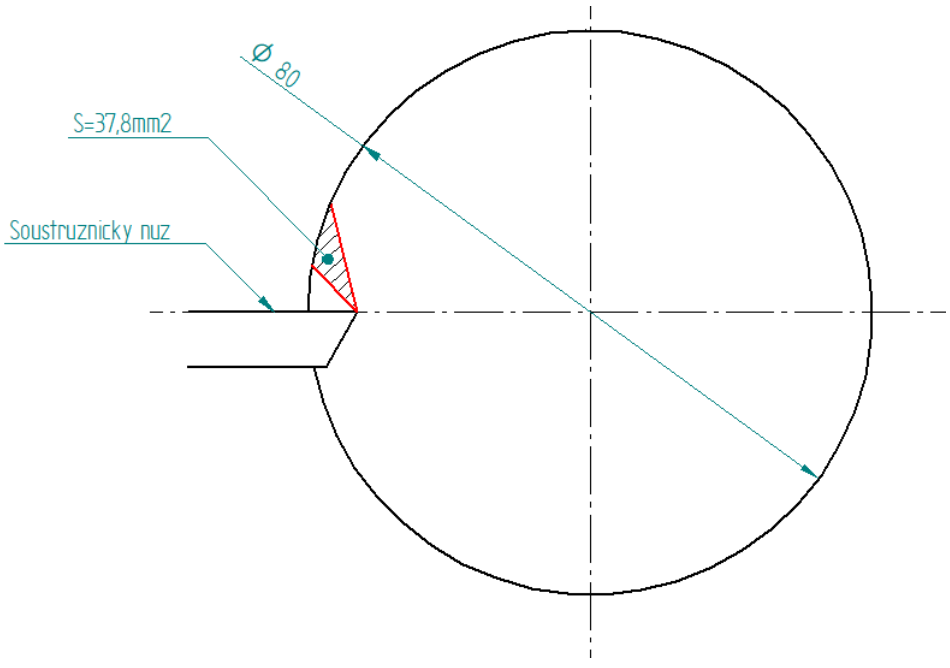
Jako další možnost zhodnocení výsledků byl vybrán postup, kde se porovná celkové měření se všemi břitovými destičkami (Graf 4-4). Tyto hodnoty jsou vybrány z bodů, kde břitová destička byla 3x v řezu, 5x v řezu a poté těsně před výměnou. Opět je těžké z tohoto zobrazení vyvodit jakékoliv výsledky nebo celkový trend. Proto se přistoupilo k možnosti zobrazit trend chování této závislosti a z toho je patrné, že má klesající tendenci. Znovu se nepotvrdilo tvrzení z teorie obrábění, které říká, že řezná síla bude stoupat s klesajícím průměrem obrobku. Tento vliv není tak markantní z důvodu malého rozsahu hodnot, které byly naměřeny. Dále bylo měření ovlivněno také faktem, že velikost plochy, která kladla odpor VBD se se zmenšujícím průměrem také zmenšuje, což popisuje kapitola 4.6.

4.6 Velikost plochy odebírané vrstvy

Jeden z důvodů, proč se nepotvrdila teorie obrábění je skutečnost, že se s ubývajícím průměrem také zmenšuje plocha, která klade odpor vyměnitelné břitové destičky při obrábění. Tento jev je zobrazen na obrázcích 4-1 a 4-2, jenž ukazují, že při průměru 100 mm a hloubce řezu 7 mm, která byla pouze ilustračně zvolena, aby výsledný rozdíl byl markantnější a zřetelnější z obrázku, byla tato plocha rovna 40 mm^2. Oproti tomu tato plocha při obráběném průměru 80 mm měla velikost pouze 37,8 mm^2. To znamená, že při rozdílu na průměru o 20 mm se tato plocha zmenšila o 5 %.



Obrázek 4-1 Velikost plochy při obrábění průměru 100 mm



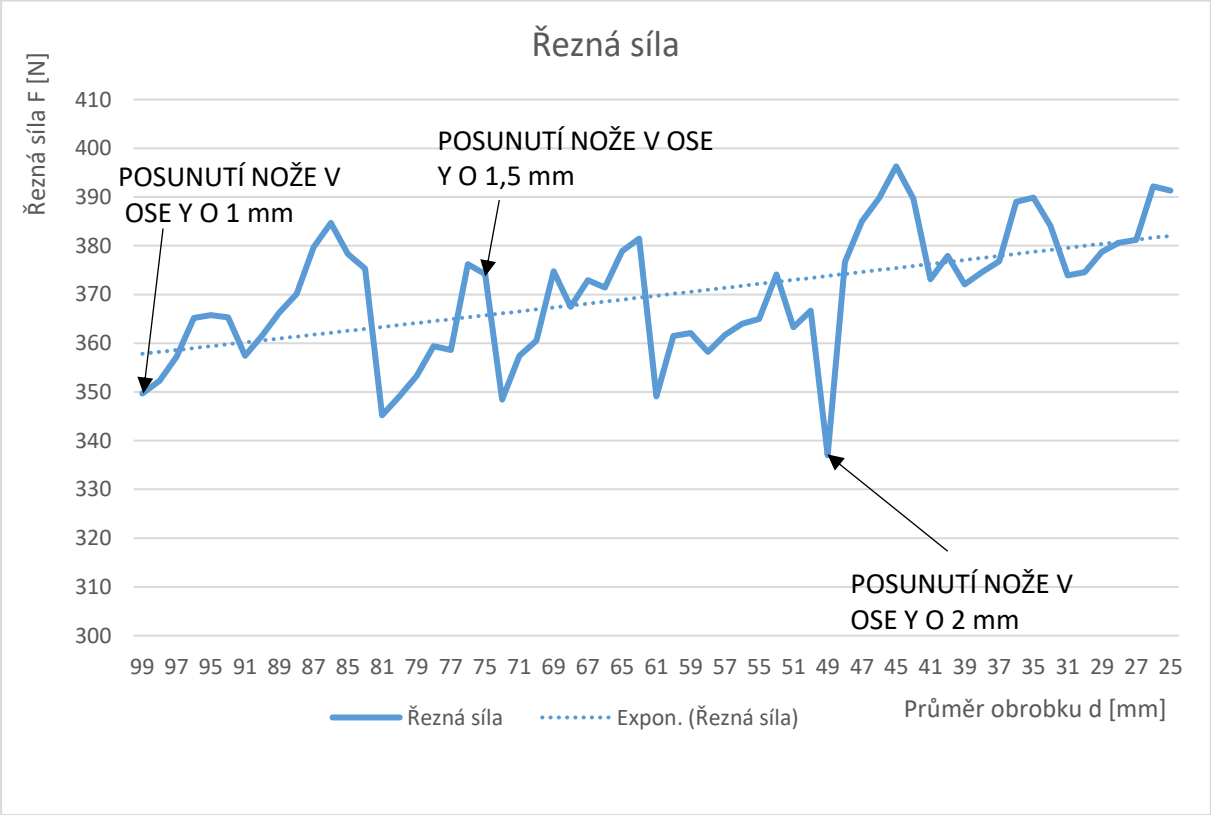
Obrázek 4-2 Velikost plochy při obrábění průměru 80 mm

4.7 Změna úhlu čela při vyosení soustružnického nože

Z teoretické části, konkrétně z obrázku 2-14, je patrné, že změna úhlu čela bude záporná, jelikož soustružnický nůž byl posunut pod osu obrobku. Úhel čela se bude měnit v závislosti na velikosti vyosení a poloměru obrobku. Proto byly stanoveny konkrétní hodnoty změny úhlu čela při posunutí soustružnického nože pod osu y. Při vyosení o vzdálenost 1 mm, tedy při rozsahu průměru od 99 mm do 75 mm, byl interval změny velikosti nástrojového úhlu čela $\langle -1{,}15°; -1{,}53\rangle$. Pokud se nůž posunul v ose y o 1,5 mm, tj. rozsah průměrů od 74 mm do 50 mm, tak změna velikosti nástrojového úhlu čela se pohybovala v rozmezí $\langle -2{,}32°; -3{,}43°\rangle$. Nakonec při pousnutí nože o 2 mm, čemuž odpovídají průměry od 49 mm do 25 mm, se diference velikosti nástrojového úhlu čela pohybovala v intervalu $\langle -4{,}68° ; -9{,}2°\rangle$. Tyto hodnoty byly vypočítány pomocí dosazení do vztahu (14).

4.8 Posunutí nože v ose y

Jelikož první měření, které bylo provedeno standardním upnutím nože v nástrojové hlavě nepřineslo žádné prokazatelné a očividné výsledky, bylo přistoupeno k alternativnímu řešení. Po vyhodnocení situace se soustružnický nůž posunul v ose y nejdříve o 1 mm poté o 1,5 mm a nakonec o 2 mm v očekávání, že tento zásah do měření už by mohl mít požadované výsledky. Zhodnocení a naměřené hodnoty jsou patrné z grafu 4-5. Jelikož v tomto případě také hraje velkou roli fakt, že se destička tentokrát opotřebovává mnohem více než kdyby byl nástroj standardně upnutý, bylo potřeba bedlivě pozorovat její stav. Avšak i přes hlídání jejího stavu došlo ve dvou případech k vyštípnutí, proto následující obrázek vynechává hodnoty, které byly změřeny těsně před vyměněním a při vyštípnutí, jelikož se dá předpokládat, že kondice VBD již nebyla dostačující.

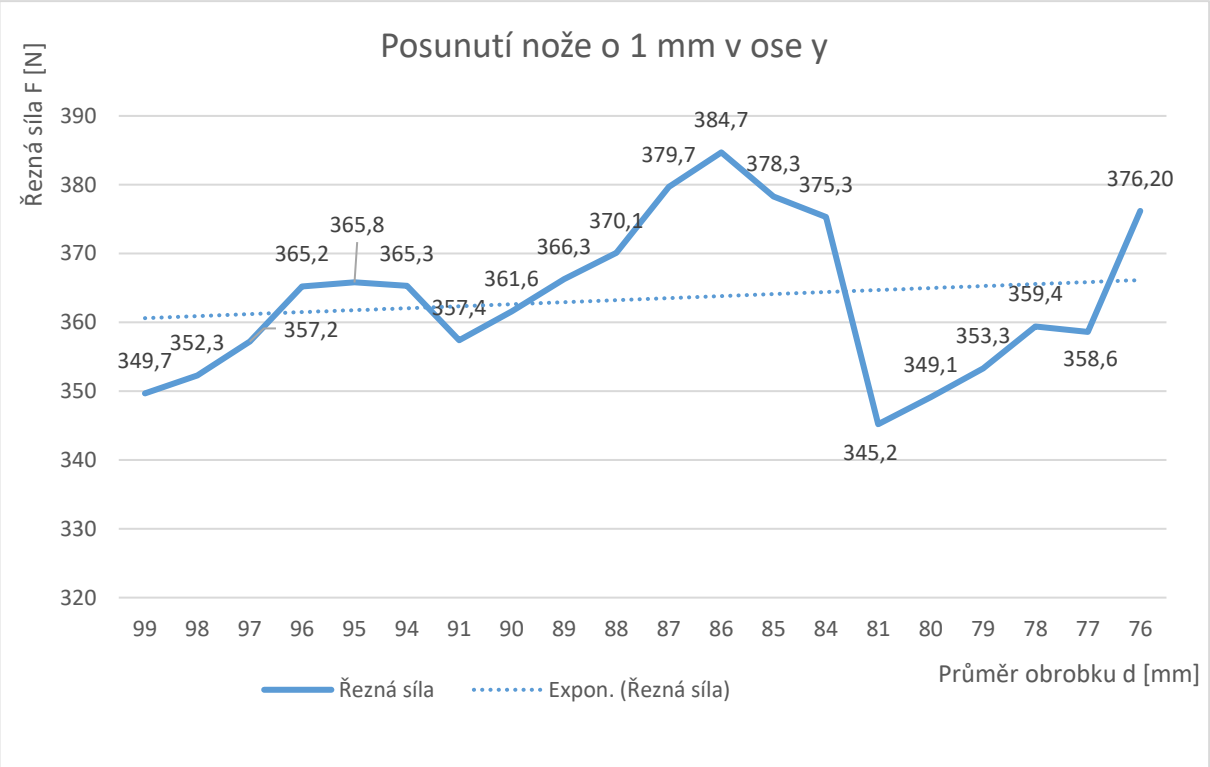


Graf 4-5 Hodnoty řezné síly při vyosení soustružnického nože

Z grafu 4-5, který zobrazuje naměřené hodnoty s vyoseným soustružnickým nožem, není opět znovu patrný trend, jestli se závislost nějak projevuje. Z tohoto důvodu byla opět přidána spojnice trendu, která jednoznačně ukazuje, že čím víc je soustružnický nůž vyosený a čím nižší průměr je, tím vyšší je řezná síla. Avšak v tomto zobrazení jsou zahrnuty dva faktory, které mohou ovlivňovat výsledek. První věc, která může zkreslovat výsledek je již zmíněné vyosení soustružnického nože, které se každých 25 měření posunulo o 0,5 mm. Druhý faktor je již měnící se průměr obrobku, proto na dalších obrázcích je uvedena závislost síly na obrobku po jednotlivých posunutích. Tyto grafy jsou vyhodnoceny níže.

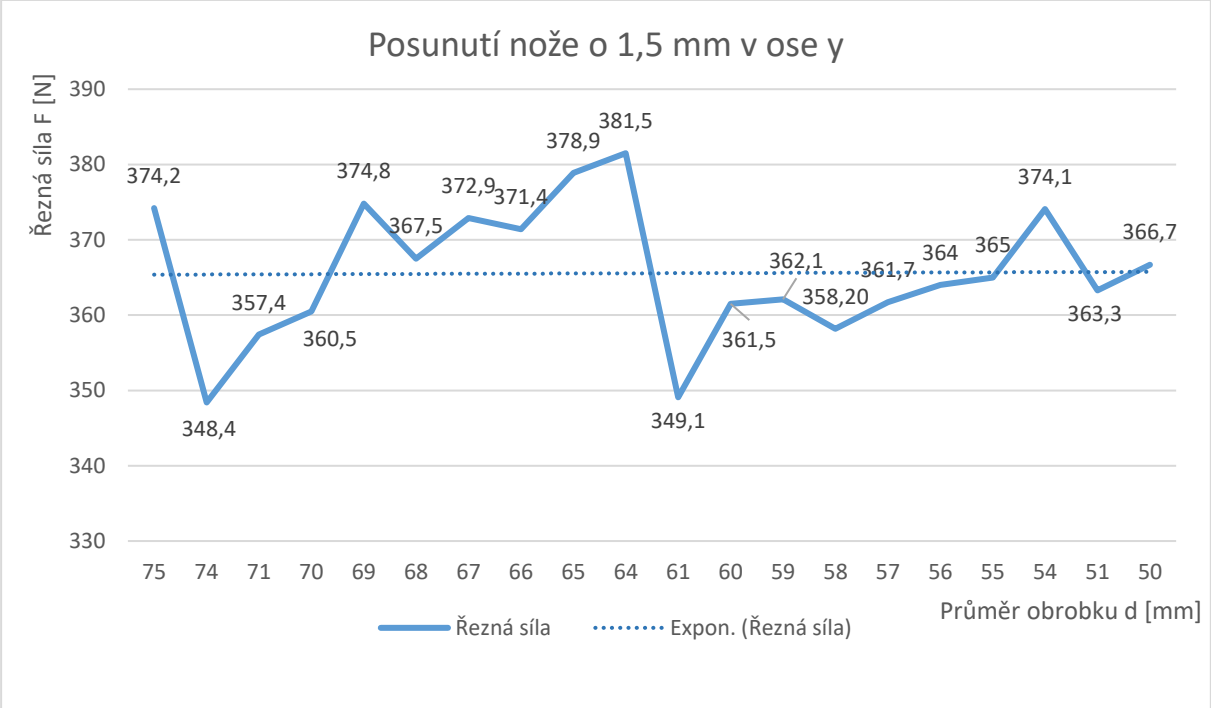
Celková stabilita řezu byla v případě posunutí nože v ose y tímto posunutím značně ovlivněna a křivka, kterou tvoří velikost řezné síly je mnohem nestabilnější než křivka, kde k žádnému posunu nože v ose y nedošlo. Jinak výraznější změna není patrná. Nestabilita řezu však mohla mít vliv na celkové větší opotřebení destiček, a proto by toto měření mohlo být nepřesnější než měření, kde k posunu destičky nedošlo.

Aby se co nejvíce eliminoval vliv opotřebení destičky a další faktory které nepříznivě ovlivňují výsledky měření, byla aplikována opatření, která by měla výsledky zpřesnit.

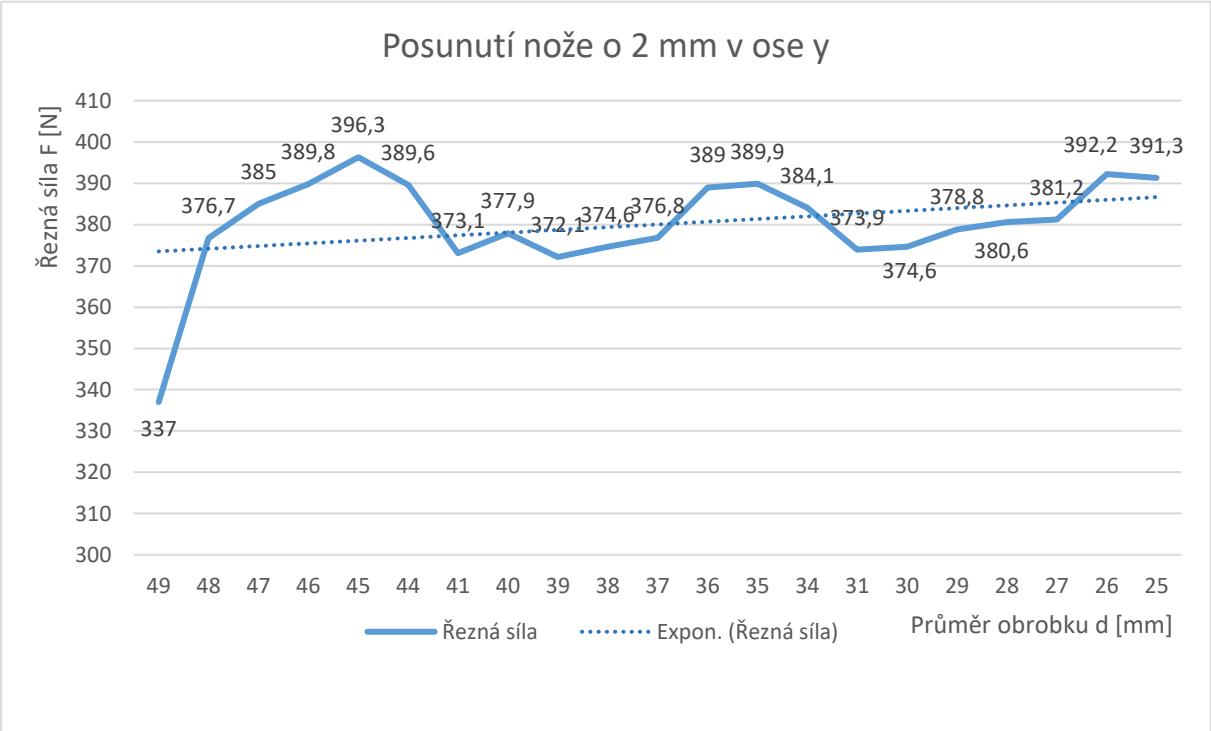


Graf 4-6 Hodnoty řezné síly při vyosení nože o 1 mm

Z analýzy naměřených dat byly vyloučeny hodnoty, při kterých se destička vyštípla nebo došlo k její výměně, jelikož oba tyto stavy jsou krajními případy a přináší do záznamu výsledků nejvíce vychylujících se hodnot. Díky aplikování tohoto opatření se celková analýza výsledků stává objektivnější a výsledky mají větší vypovídající hodnotu. Rozdělení měření s vyoseným nožem v ose y je patrné v grafech 4-6, 4-7, 4-8.



Graf 4-7 Hodnoty řezné síly při vyosení nože o 1,5 mm



Graf 4-8 Hodnoty řezné síly při vyosení nože o 2 mm

4.9 Měření bez posunutí nože v ose y

Z teorie obrábění vyplývá, že pokud je soustružnický nůž standardně upnutý v ose obrobku, bude se řezná síla snižovat s ubývajícím průměrem. Konkrétně o tom hovoří vztah (5) a (6). Ve vztahu (5) je popsáno, že řezná složka síly pro řezání F_c je dána jako podíl užitečného výkonu stroje $P_{už}$ a velikosti řezné rychlosti v_c. Tato velikost je popsaná vztahem (1).

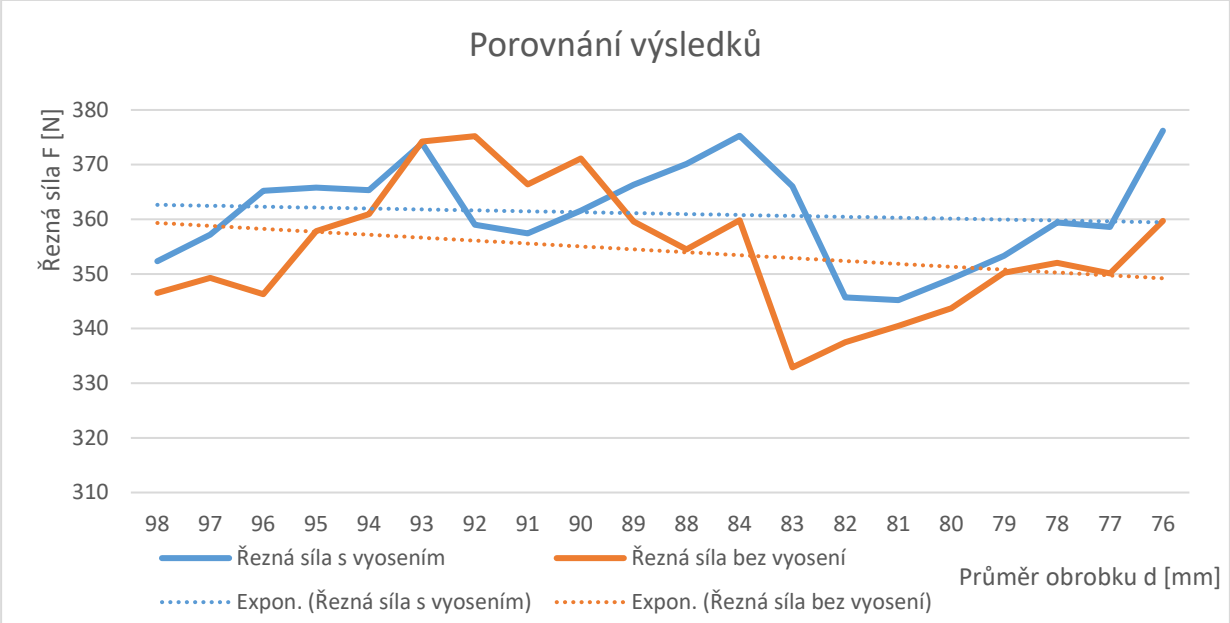
Z měření je patrný fakt, že spojnice trendu mezi počátečními a koncovými hodnotami má sestupnou tendenci. Tato tendence není ale nijak markantní. Může to být tím, že pro měření byl zvolen nízký rozsah měření, a proto se fakta z teorie obrábění nepodařilo potvrdit, jelikož rozdíl mezi počáteční hodnotou řezné síly při největším průměru a hodnotou koncovou, kdy byl průměr nejnižší, činí pouze 4 N. Dále při měření hrálo velkou roli opotřebení nástroje a tím i vyšší zahřívání, jelikož experiment byl prováděn bez chlazení.

4.10 Měření s posunutím nože v ose y

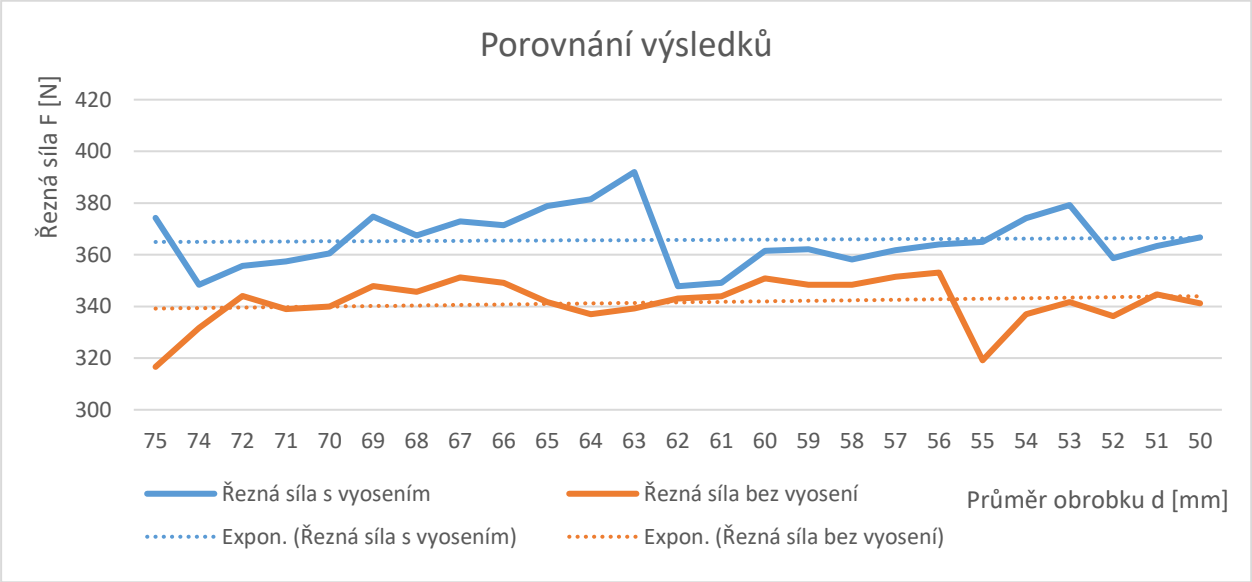
Z měření je patrný fakt, že pokud si dáme naměřené hodnoty do jednoho velkého grafu, spojnice trendu nám ukazuje rostoucí tendenci velikosti řezné síly při snižujícím se průměru obrobku. Toto je patrné v grafu 4-5. Dále bylo rozhodnuto zkusit rozdělit tento graf na tři menší, kde každý bude pro hodnoty posunutí o 1, 1,5 a 2 mm. Při vyhotovení diagramu, který zobrazuje hodnoty při rozdělení posunutí je vidět, že při posunutí pod osu y o 1 mm dochází ke vzrůstající tendenci co se týká řezné síly s ubývajícím průměrem. Při posunutí o 1,5 mm je závislost skoro konstantní a při posunutí o 2 mm je trend zase rostoucí. Dá se tedy konstatovat, že při vyosení nože pod osu y řezná síla s ubývajícím průměrem roste.

4.11 Porovnání výsledků bez vyosení a s vyosením nože

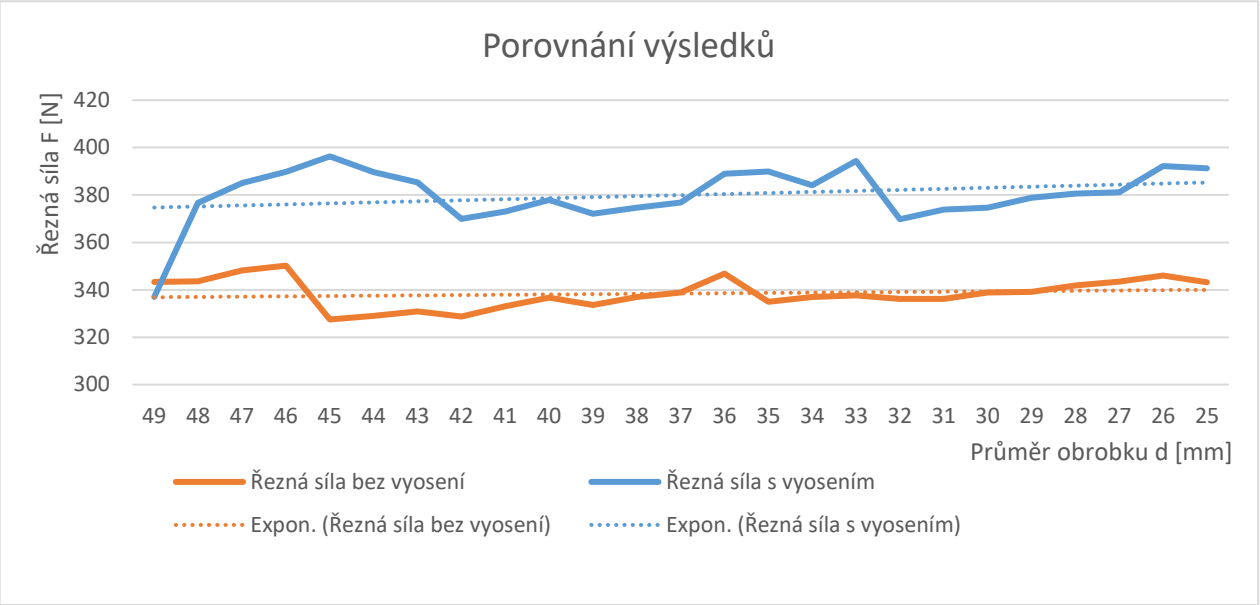
Kvůli lepší interpretaci výsledků a porovnání měření se standardním upnutím nože v ose obrobku jsou níže přiloženy grafy 4-9, 4-10 a 4-11, které porovnávají zvlášť výsledky vyosení nože v ose y o 3 rozdílné hodnoty.



Graf 4-9 Porovnání hodnot při vyosení o 1 mm



Graf 4-10 Porovnání hodnot při vyosení o 1,5 mm



Graf 4-11 Porovnání hodnot při vyosení o 2 mm

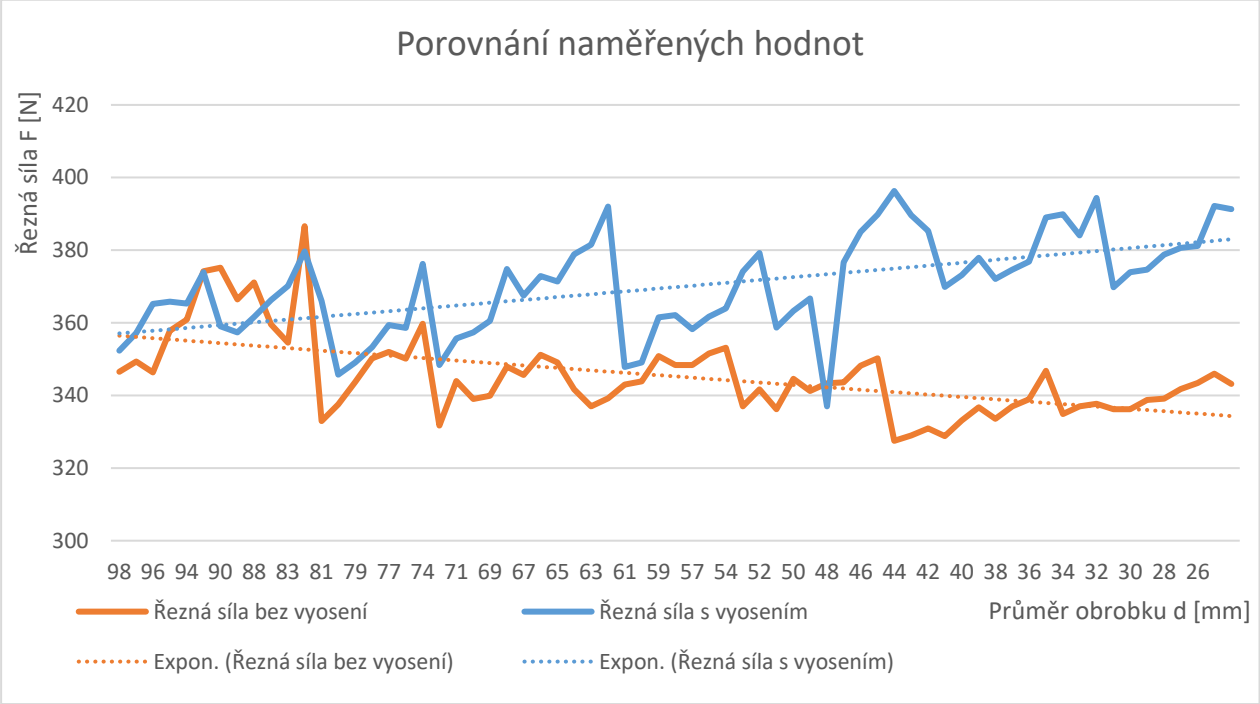
Z výše uvedených analýz je patrné, že obě naměřené řezné síly v případě grafu 4-9 opisují podobný trend. Jejich vzdálenost je na začátku měření pouze 6 N a s přibývajícím počtem měření se tento rozdíl zvýšil skoro až na 10 N. Na druhé straně v grafu 4-10 jsou trendy také podobné, ale rozdíl mezi nimi činí konstantně něco okolo 20 N. Poslední případ ukazuje graf 4-11, kde jsou opět trendy podobné, avšak po celém rozsahu grafu je rozdíl trendů již 40 N. Zvyšující se rozdíl mezi jednotlivými případy vyosení soustružnického nože je způsoben neustále posouvajícím se nástrojem pod osu y.

.

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provést experimentální měření řezných sil s následným porovnáním s teorií obrábění. Tento cíl práce byl splněn.

V této kapitole budou rozebrány výsledky měření z předešlé sekce a proběhne celkové vyhodnocení experimentu včetně porovnání konečných hodnot experimentu s fakty, které určuje teorie obrábění. První měření proběhlo se standardním upnutím nástroje. Jelikož při předběžném vyhodnocení experimentu nebyly výsledky zcela jasné, bylo potřeba přistoupit k určitým modifikacím při rozebírání konkrétních hodnot, které byly naměřeny. Bylo potřeba zanedbat určité náměry, které mohly zásadním způsobem ovlivnit interpretaci výsledků. Jako příklad je vynechání hodnot, kde byla VBD už velice opotřebená, a proto hodnota řezné síly byla vychýlená více než se předpokládalo. Druhé měření proběhlo při vyosení soustružnického nástroje v ose y a při tomto stavu byla měřená řezná síla v závislosti na zmenšujícím se průměru obrobku.



Graf 5-1 Porovnání obou způsobů měření

Při nahlídnutí do grafu 5-1 je patrné, že trend při měření řezných sil, kdy byl nůž posunut v ose y o 1, 1,5 a 2 mm, je jasně rostoucí. Dá se tedy říct, že se potvrdila teorie obrábění, která říká, že při vyosení nože bude řezná síla s klesajícím průměrem růst.

Naopak v případě při standardním upnutí nože, je zřetelně vidět, že řezná síla s klesajícím průměrem také klesá, tudíž se teorie obrábění u tohoto případu nepotvrdila. Důvodů, proč se tak nestalo, je více. Jeden z nich je fakt, že měření bylo provedeno na malém intervalu, to znamená, že samotný rozsah měření nebyl ideální. Další z důvodů může být skutečnost, že vliv opotřebení destičky měl větší dopad na výsledky měření, než bylo předpokládáno. A posledním důvodem je fakt, že plocha materiálu, která klade odpor soustružnickému noži při odebírání třísky je při vyšším průměru větší než při průměru menším. Tento stav popisují obrázky 4-1 a 4-2.

Další možnost provedení toho experimentu do budoucna může být taková, že by po každém řezu byla výměna VBD, aby se co nejvíce zamezilo vlivu opotřebení destičky na výsledky měření. Následně jako další alternativa je provést měření na větším rozsahu průměru, aby se vliv průměru obrobku na velikost řezné síly skutečně a jednoznačně projevil.

Seznam použitých zdrojů

1. **Hamernik, J.** jhamernik.sweb.cz/. [Online] [Citace: 23. 1 2021.] http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm.

2. **Střední škola průmyslová a umělecká, Opava.** *https://www.sspu-opava.cz.* [Online] [Citace: 22. 1 2021.] https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/Praxe_II_a_III/VY_52_INOVACE_H-02-23.pdf.

3. **Kudela, Miroslav.** *Příručka obrábění.* Praha : Sandvik CZ, 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6.

4. **www.cs.wikipedia.org.** Soustružení. [Online] [Citace: 24. 01 2021.] https://cs.wikipedia.org/wiki/Soustru%C5%BEnick%C3%BD_n%C5%AF%C5%BE.

5. **Spurný, Ondřej.** Experimentální zjišťování měrného řezného odporu u slitin neželezných kovů. [Online] 2020. [Citace: 2021. 11 27.] https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/41269/1/BP_SPURNY_ONDREJ.pdf.

6. **Doc.Ing. Josef Chladil, CSc.** *Přípravky a nástroje, část obrábění.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1992. 80-214-0408-6.

7. **Nosek, Adam.** https://adoc.pub/. [Online] 2014. [Citace: 17. Duben 2022.] https://adoc.pub/vysoke-ueni-technicke-v-brn-navrh-zapichovaciho-soustrunicke.html.

8. **https://m.soudom.cz/.** [Online] [Citace: 24. 1 2021.] https://m.soudom.cz/files/odborny_vycvik_-_kovo_1-/vy-inovace-05.02.pdf.

9. http://homel.vsb.cz. [Online] [Citace: 27. 11 2021.] http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf.

10. Doc. Ing. Anton Humár, CSc. Technologie obárbění - 1. část. *ust.fme.vutbr.cz/.* [Online] [Citace: 27. 11 2021.] http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf.

11. Netolická, Eliška. Parametry řezného procesu. *dspace.cvut.cz.* [Online] [Citace: 27. 11 2021.] https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66480/F2-BP-2016-Netolicka-Eliska-Experimentalni%20mereni%20parametru%20rezneho%20procesu.pdf?sequence=-1&isAllowed=y.

12. Schmidt, Eduard. *Příručka řezných nástrojů.* Praha : SNTL, 1967.

13. Prof. Ing. Břetislav Chvála, DrSc., Doc. Ing. Josef Votava, CSc. *PŘÍPRAVKY.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 1980.

14. Sklenička, Josef. Příspěvek k experimentálnímu stanovení modelu silového zatížení šroubovitého vrtáku. *https://dspace5.zcu.cz/.* [Online] 2017. [Citace: 17. Duben 2022.] https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/28409/1/Disertace_Sklenicka.pdf.

15. http://ust.fme.vutbr.cz/. [Online] [Citace: 19. 02 2022.] http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/databaze/ocel_12050.3.pdf

16. www.kovonastroje.cz. [Online] [Citace: 19. 02 2022.] https://www.kovonastroje.cz/out/media/iscar_catalog_2012.pdf.

17. https://www.iscar.com. [Online] iscar. [Citace: 19. 02 2022.] https://www.iscar.com/eCatalog/Grade.aspx?grade=IC8250&item=5508089&fnum=867&map=IS&app=0.

18. https://www.kovo-stroje.sk/. [Online] [Citace: 19. 02 2022.] https://www.kovo-stroje.sk/sustruhy-emco/horizontalny-cnc-sustruh-maxxturn-25/.