

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Bakalářský studijní program

Strojní inženýrství

Účinek procesních plynů na technologii soustružení a kvalitu obrobených součástí

**The effect of the process gases to turning technology and the quality of
the machined part**

KOM - 1267

Adam Junek

Vedoucí práce: Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.

Konzultant: Ing. Miloslav Ledvina

Počet stran: 86

Počet příloh: 5

Počet tabulek: 26

Počet obrázků: 28

Počet grafů: 9

25.6. 2015

Účinek procesních plynů na technologii soustružení a kvalitu obroběných součástí

ANOTACE:

Obsahem bakalářské práce je výzkum vlivu chlazení plynnou látkou na obráběcí soustavu, resp. výsledek obráběcího procesu, při technologii soustružení. Jako procesní plyny byly zvoleny: atmosférický vzduch (bez použití chladicího média), podchlazený stlačený vzduch, zkapalněný oxid uhličitý.

The effect of the process gases to turning technology and the quality of the machined part

ANNOTATION:

Contents of this bachelor thesis is to research the effect of cooling the gaseous substance to the machine system, respectively result of a process, to turning technology. As the process gases were selected: atmospheric air (no coolant), cold compressed air, liquefied carbon dioxide.

Klíčová slova: Obrábění, procesní plyny

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2015

Archivní označ. zprávy:

Počet stran: 86

Počet příloh: 5

Počet obrázků: 28

Počet tabulek: 26

Počet grafů: 9

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

25.6. 2015

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D a konzultantovi Ing. Miloslavu Ledvinovi za cenné připomínky a odborné rady při vypracování této bakalářské práce.

OBSAH

Obsah	5
Seznam použitých zkratk	7
1. Úvod.....	9
2. Teorie	11
2.1 Soustružnické nože a soustruhy	11
2.2 Řezné síly při soustružení.....	15
2.2.1 Výpočet řezné síly	16
2.3 Řezné podmínky při soustružení.....	17
2.3.1 Hloubka záběru	17
2.3.2 Posuv	18
2.3.3 Řezná rychlost.....	18
2.4 Teplo a tepelná bilance při soustružení.....	21
2.5 Řezné prostředí	22
3. Procesní média	23
3.1 Procesní kapaliny.....	23
3.2 Plynné látky.....	24
3.2.1 Obrábění s využitím oxidu uhličitého	24
3.2.2 Obrábění s využitím pochlazeného vzduchu	25
3.2.3 Obrábění s využitím dusíku	26
3.3 Bez chlazení	27
4. Metodika experimentu	28
4.1 Metodika hodnocení plynů pro technologii soustružení.....	28
4.1.1 Experimentální prostředí	28
4.1.2 Řezné podmínky pro experimentální prostředí.....	28
4.1.3 Metodika experimentu	28
4.2 Popis stroje, nástroje a měřicích přístrojů	31
4.3 Měřené parametry.....	37
5. Experimentální měření vlivu chlazení plynou látkou při technologii soustružení.. ..	42
6. Ekonomické vyhodnocení účinnosti procesních plynů	52
7. Diskuze dosažených výsledků chlazení plynou látkou na technologii soustružení	57
8. Závěr.....	60

Seznam použité literatury.....	63
Seznam obrázků.....	65
Seznam tabulek.....	66
Seznam grafu.....	68
Seznam příloh.....	69

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
a_p	[mm]	hloubka řezu
A_D	[mm ²]	plocha jmenovitého průřezu třísky
b_D	[mm]	jmenovitá šířka třísky
C_F	[-]	materiálová konstanta
CO_2	[-]	chemická značka oxidu uhličitého
D	[mm]	průměr
f	[mm/ot]	posuv
F_c	[N]	celková řezná síla
F_e	[-]	chemická značka železa
F_f	[N]	vektor posuvu
F_p	[N]	vektor kolmý na směr posuvu
F_x	[N]	posuvová síla
F_y	[N]	přísvuná síla
F_z	[N]	řezná síla
h_D	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
k_{s11}	[-]	specifický řezný tlak
k_c	[MPa]	měrná síla řezání
K_r	[°]	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
l	[mm]	délka
n	[min ⁻¹]	otáčky
Q_{D1}	[J]	teplo primárních plastických deformací

Q_{D2}	[J]	teplo sekundárních plastických deformací
Q_{D3}	[J]	teplo terciálních plastických deformací
Q_N	[J]	teplo odvedené nástrojem
Q_O	[J]	teplo odvedené obrobkem
Q_P	[J]	teplo odvedené prostředím
Q_T	[J]	teplo odvedené třískou
Q_{TC}	[J]	teplo vzniklé třením třísky na čele nástroje
Q_{TH}	[J]	teplo vzniklé třením třísky na hřbetu nástroje
R_a	[μm]	průměrná aritmetická úchylna profilu
R_t	[μm]	celková výška profilu
R_z	[μm]	největší výška profilu
r_ε	[mm]	poloměr zaoblení špičky nástroje
T_{1;2;3}	[-]	označení použitého termočlánku
VB_{1;2;3}	[-]	označení použité břitové destičky
v_c	[m/min]	řezná rychlost
v_f	[mm/min]	rychlost posuvu
x_F	[-]	exponenty vlivu a_p
y_F	[-]	exponenty vlivu f

1. Úvod

Obsahem bakalářské práce je výzkum vlivu chlazení plynnou látkou na obráběcí soustavu, resp. výsledek obráběcího procesu, při technologii soustružení.

Hlavním cílem bakalářské práce je výzkum využití zkapalněných technických plynů jako procesního média při technologii soustružení z hlediska strojního, fyzikálně-chemického, energetického, ekologického a ekonomického.

Jako plynné látky byly zvoleny: atmosférický vzduch (bez použití chladicího média), podchlazený stlačený vzduch, zkapalněný oxid uhličitý.

Bakalářská práce je rozdělena do několika základních částí. Na část teoretickou, experimentální a část závěrečnou, která informuje o dosažených výsledcích práce.

V rámci teoretické části je popsána technologie soustružení, zejména z pohledu řezných podmínek, včetně nástroje a stroje u soustružení. Dále procesní prostředí včetně médií určených ke chlazení. Celá teoretická část se opírá o odbornou literaturu.

Část experimentální uvádí jednotlivé metody a vybrané parametry, kterými byly hodnoceny vlivy použitých procesních médií u technologie soustružení. Mezi vybrané parametry patří řezná síla, teplota, trvanlivost břitu nástroje, drsnost soustruženého obrobku a rozměrová přesnost. Dále pak obsahuje naměřené výsledky (data) včetně jejich zpracování.

Závěrečná část je tvořena dosaženými výsledky aplikovaného výzkumu včetně vyhodnocení jednotlivých parametrů a závěrečné diskuze k celkovému výsledku bakalářské práce. V závěrečné části je uvedeno i ekonomické zhodnocení. V ekonomickém zhodnocení jsou srovnány fixní a roční náklady pro jednotlivá procesní média, dále jsou porovnány náklady pro sériovou a kusovou výrobu.

Bakalářská práce je součástí výzkumu realizovaného v rámci projektu **TA03010492 - Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů (2013-2015, TA0/TA)** jehož poskytovatelem je Technologická agentura České republiky.

Projekt řeší aktuální problematiku přesného dynamického řízení tepelných procesů ve výrobních nástrojích. Inovativní temperační technologie je

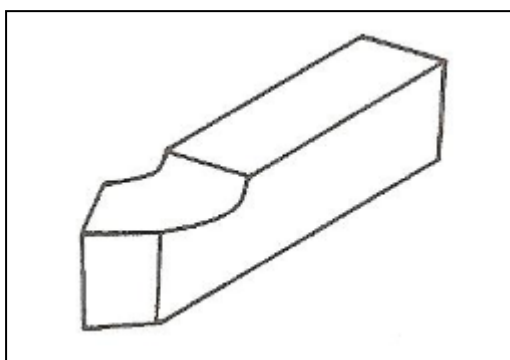
založena na využití vysokého chladícího potenciálu zkapalněných technických plynů cíleně nasměrovaných do kriticky tepelně zatěžovaných oblastí výrobních nástrojů a to tak, aby bylo dosaženo účinného odvodu tepla z výrobku a nástroje v co nejkratším čase s příznivým dopadem na kvalitu a ekonomičnost výroby.

2. Teorie

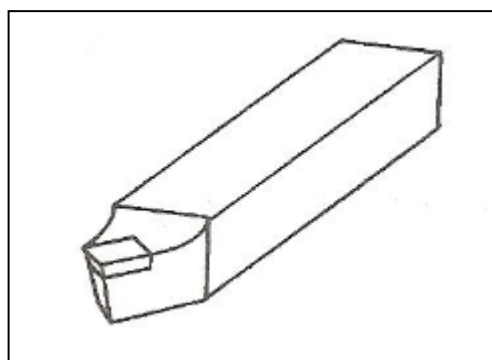
V rámci teoretické části bude popsána technologie soustružení, zejména z pohledu řezných podmínek a řezného prostředí, včetně nástroje a stroje u soustružení. Soustružení patří do kategorie třískového obrábění, většinou jednobřítým nástrojem, při kterém hlavní řezný pohyb, rotační, koná obrobek a vedlejší řezný pohyb, posuv a přísuv, koná nástroj. Soustružení je určeno především k obrábění válcových ploch vnějších i vnitřních. Touto metodou je dále možné obrábět kuželové plochy, čelní rovinné plochy nebo řezat závity. Soustružení provádíme na strojích zvaných soustruh nástrojem označovaným jako soustružnický nůž.

2.1 Soustružnické nože a soustruhy

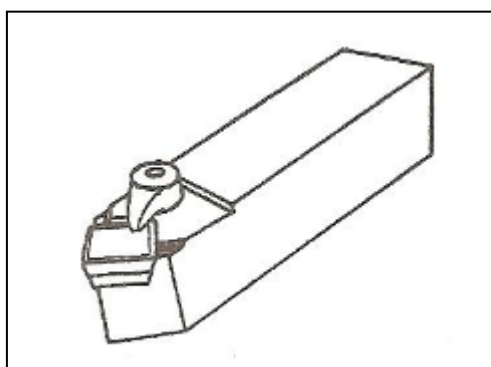
Soustružnické nože jsou obráběcími nástroji s definovanou geometrií břitu [2]. Obecně se skládají z držáku a řezné části. Konstruují se buď celé z nástrojové oceli a jsou označovány jako monolitní (viz. obr. 1.1). Nebo mohou být nože s řeznou částí ze slinutých karbidů, které se konstruují převážně s výměnnými břitovými destičkami (viz. obr. 1.2), popřípadě s pájenými destičkami (viz. obr. 1.3). Nože s řeznou částí z řezné keramiky, kubického nitridu boritého a z diamantu se konstruují s výměnnými břitovými destičkami [2].



Obr. 1.1 Monolitní nůž [2].



Obr. 1.2 Nůž s pájenou destičkou [2].



Obr. 1.3 Nůž s výměnnou břitovou destičkou [2].

Podle směru posuvu dělíme soustružnické nože na:

- pravé - soustružíme zprava doleva,
- levé - soustružíme zleva doprava.

Podle obráběné plochy dělíme soustružnické nože na:

- vnější,
- vnitřní.

Podle druhu práce, pro kterou jsou určeny, dělíme soustružnické nože na (viz. obr. 2):

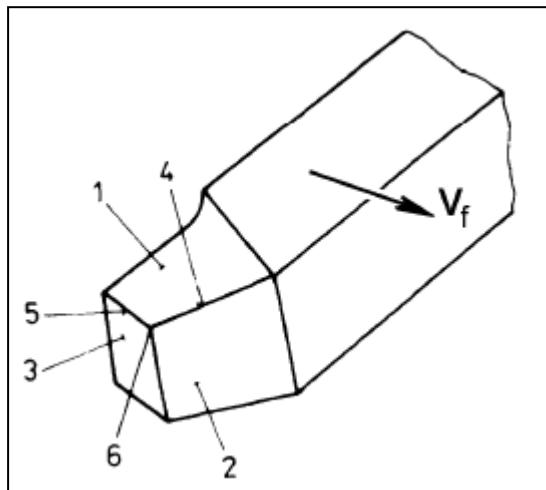
- uběrací,
- hladící,
- zapichovací a upichovací,
- tvarový,
- speciální tvarové.

UBĚRACÍ				HLADÍCÍ			ZAPICHOVACÍ A UPICHOVACÍ	
přímý	ohnutý	stranový	čelní	široký	úzký	rohový	zapichov.	upichov.
TVAROVÉ		SPECIÁLNÍ TVAROVÉ						
rádusov.	závitový	kotoučový		prizmatický	tangenciální			

Obr. 2 Rozdělení soustružnických nožů dle druhu práce pro kterou jsou určeny [3].

Části nástroje (viz. obr. 3):

- čelo - část nástroje, po které odchází tříska; rovina čela A_g
- břít - řezná část nástroje, která je tvořena čelem a hřbetem nástroje
- hřbet - část nástroje přiléhající k řezné (A_a) a obrobené (A_a') ploše
 - rovina hřbetu: A_a - hlavní
 - A_a' - vedlejší
- ostří - průsečnice čela a hřbetu, rozlišujeme hlavní a vedlejší ostří
- špička - část ostří ležící na spojnicí hlavního a vedlejšího ostří



- 1 - čelo
- 2 - hlavní hřbet
- 3 - vedlejší hřbet
- 4 - hlavní ostří
- 5 - vedlejší ostří
- 6 - špička

Obr. 3 Části soustružnického nože [3].

Nástrojové roviny (viz. obr. 4):

- nástrojová základní rovina P_r - prochází uvažovaným bodem a je kolmá na vektor řezné rychlosti v_c
- nástrojová boční rovina P_f - prochází uvažovaným bodem a je dána vektorem řezné rychlosti v_c a posuvu v_f .
- nástrojová zadní rovina P_p - prochází uvažovaným bodem a je kolmá na roviny P_r a P_f
- nástrojová rovina ostří P_s - je dána tečnou k ostří v uvažovaném bodě a je kolmá na rovinu P_r
- nástrojová ortogonální rovina P_o - prochází uvažovaným bodem a je kolmá na roviny P_r a P_s
- nástrojová normálová (normální) rovina ostří P_n - rovina kolmá na tečnu k ostří v uvažovaném bodě.
- nástrojová rovina největšího spádu čela P_g - prochází uvažovaným bodem a je kolmá na roviny P_r a A_g .
- nástrojová rovina největšího spádu hřbetu P_b - prochází uvažovaným bodem a je kolmá na roviny P_r a A_a .

Nástrojové úhly (viz. obr. 4):

- nástrojový úhel nastavení χ_r - úhel svírají roviny P_s a P_f , měříme jej v rovině P_r .
- nástrojový vedlejší úhel nastavení χ_r' - úhel svírají roviny P_s' (rovina procházející vedlejším ostřím) a P_f , měříme jej v rovině P_r .
- nástrojový úhel špičky r_ϵ - úhel svírají roviny P_s a P_s' , měříme jej v rovině P_r .
- nástrojový úhel nastavení doplňkový ψ_r - úhel svírají roviny P_s a P_p , měříme jej v rovině P_r .

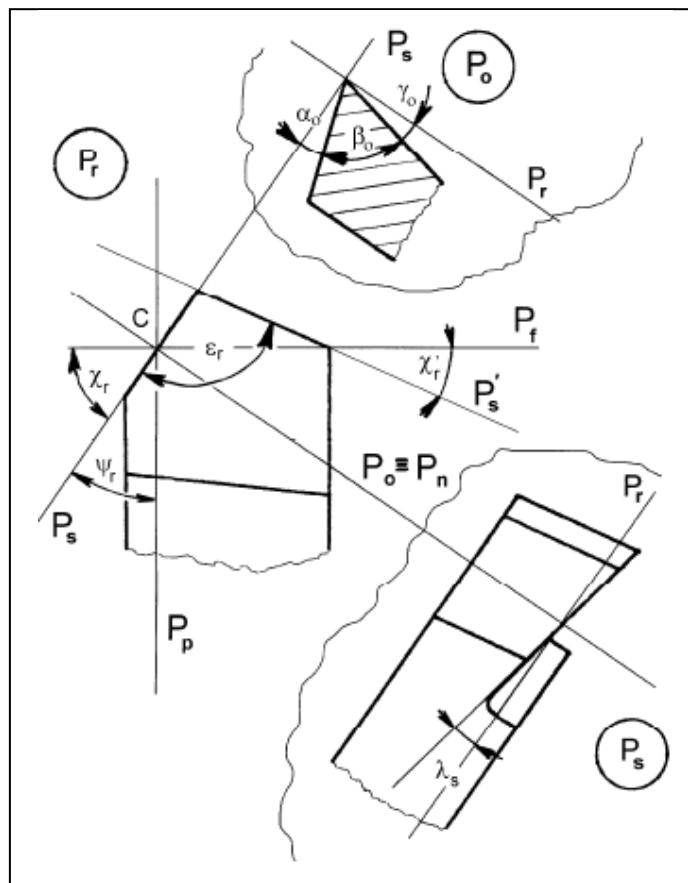
- nástrojový úhel sklonu ostří λ_s - úhel svírá tečna k ostří a rovina P_r , měříme jej v rovině P_s .
- nástrojový úhel čela ortogonální γ_o - úhel svírají roviny A_g a P_r , měříme jej v rovině P_o .
- nástrojový úhel břitu ortogonální β_o - úhel svírají roviny A_g a A_a , měříme jej v rovině P_o .
- nástrojový úhel hřbetu ortogonální α_o - úhel svírají roviny A_a a P_s , měříme jej v rovině P_o .

Poznámky k nástrojovým úhlům:

$$\chi_r + \chi_r + \chi_r = 180^\circ, \quad (1)$$

$$\chi_r + \psi_r = 90^\circ, \quad (2)$$

$$\alpha_o + \beta_o + \gamma_o = 90^\circ. \quad (3)$$



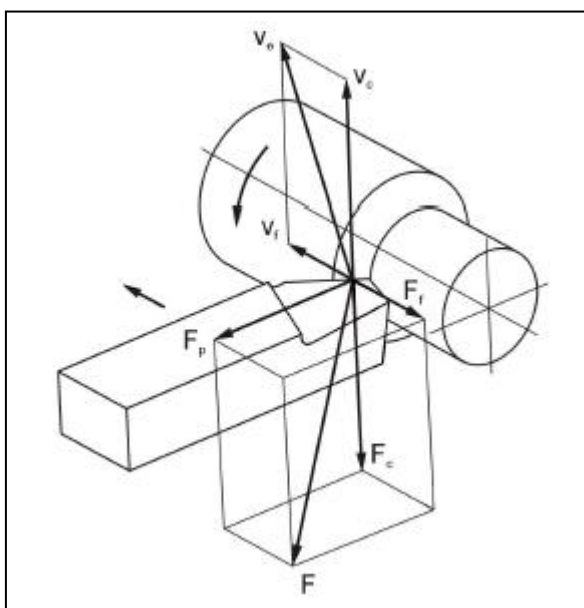
Obr. 4 Geometrie soustružnického nože [3].

Soustruh je stroj, na kterém kromě klasického soustružení lze dále vrtat, vyhrubovat, vystružovat a v některých případech lze vykonávat i další práce. Mezi často používané soustruhy patří hrotový soustruh, čelní soustruh, svislý soustruh, revolverový soustruh, NC a CNC. Nejpoužívanějším soustruhem je hrotový soustruh, který se skládá ze základních částí - lože, vřeteník, koník, suport, pohybové a převodové mechanismy.

2.2 Řezné síly při soustružení [1]

Při vnikání břitu nástroje klade materiál obrobku odpor, který musí být překonán řeznou silou. Při obrábění je dodávaná energie, která je téměř všechna využita na silové působení nástroje na materiál obrobku.

Při soustružení působí na soustružnický nůž síla, kterou můžeme rozložit do tří složek (viz. obr. 5) - do směru vektoru hlavního řezného pohybu F_c , do směru vektoru posuvu F_f , do směru kolmého ke směru posuvu v horizontální rovině F_p .



Obr. 5 Rozklad sil na břitu soustružnického nože [3].

Řezné síly jsou ovlivněny zejména materiálem obrobku, geometrií nástroje a použitelnými řeznými podmínkami. Čím je tvrdost materiálu obrobku větší, tím vyšší jsou řezné síly. Čím je řezná hrana nástroje ostřejší, tím budou řezné síly nižší. Tím ale může dojít ke snadnějšímu vylomení řezné hrany. Důležitou roli řezné hrany hraje úhel čela.

Vysoké řezné síly způsobí větší deformace řezných nástrojů a obrobků, což může mít za následek vibrace a deformace obrobku. V případě, že jsou použité řezné síly příliš vysoké, může být životnost nástroje krátká a může dojít k vylomení řezné hrany.

2.2.1 Výpočet řezné síly

Pomocí rozložení složek řezných sil, hlavní řezný pohyb F_c , posuv F_f , přísvuv F_p , můžeme provést výpočet celkové řezné síly, který je dán vztahem:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}. \quad (4)$$

Pro soustružení se obvykle uvádí poměr sil $F_c : F_p : F_f = 1 : 0,4 : 0,25$, který platí pro střední průřez třísky, $\chi = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$.

Výpočet jednotlivých složek řezných sil můžeme provést z empirických vztahů:

$$F_c = c_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}}, \quad (5)$$

$$F_p = c_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}}, \quad (6)$$

$$F_f = c_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}}, \quad (7)$$

kde: F_c řezná síla [N],
 F_f posuvová síla [N],
 F_p přísvuvová síla [N],
 a_p hloubka záběru [mm],
 f posuv na otáčku [mm],
 c_F konstanta,
 x_F, y_F .. exponenty.

Výpočet řezné síly se může provést pomocí vzorců německého vědce Kienzla:

$$F_c = k_s \cdot A_D, \quad (8)$$

$$k_s = k_{s1.1} \cdot a^{-m}, \quad (9)$$

$$A_D = f_{ot} \cdot a_p = a \cdot b, \quad (10)$$

$$a = f_{ot} \cdot \sin\chi_r, \quad (11)$$

kde: F_c řezná síla [N],
 f_{ot} posuv na otáčku [mm],
 k_s měrná řezná síla [$N \cdot mm^{-2}$],
 $k_{s1.1}$ měrná řezná síla pro tloušťku třísky 1 mm [$N \cdot mm^{-2}$],
 m exponent Kienzleho vztahu,
 A_D průřez třísky [mm^2],
 a tloušťka třísky [mm],
 b šířka třísky [mm],
 a_p hloubka záběru [mm],
 χ_r nástrojový úhel nastavení.

Kienzl definuje specifické řezné síly či specifický řezný tlak (k_{s11}). Tato charakteristická vlastnost materiálu uvádí, jak velký odpor materiál vykazuje při obrábění. Je definována jako řezná síla potřebná pro úběr materiálu obrobku s šířkou záběru 1 mm a hloubkou 1 mm. Tato specifická řezná síla přímo souvisí s tvrdostí nebo pevností v tahu u daného materiálu, ale i ostatní vlastnosti materiálu mají svůj vliv.

2.3 Řezné podmínky při soustružení

Řezné podmínky volíme podle druhu práce, požadované přesnosti rozměrové a jakosti obrobenej plochy. Dále musíme brát při volbě řezných podmínek do úvahy ekonomická hlediska, vlastnosti stroje, obrobku, prostředí a nástroje, především hospodárnou trvanlivost nástroje.

2.3.1 Hloubka záběru

Řezné podmínky při soustružení volíme obecně tak, že z celkového přídavku na obrábění nejprve stanovíme hloubku záběru, přídavek odebíráme pokud možno na jednu třísku. Hloubka záběru je omezena délkou ostří nože, v záběru nemají být více než dvě třetiny délky ostří. Dále je hloubka záběru omezena výkonem stroje a tuhostí stroje a obrobku. Hloubka záběru při soustružení se obvykle pohybuje v rozsahu 0,03 až 30 mm (viz. tab. 1).

Tab. 1 Hloubka záběru při různých operacích.

Operace	Hloubka záběru a_p [mm]
Hrubování	3,00 až 30,00
Načisto	0,50 až 3,00
Jemné soustružení	0,03 až 0,50

Průřez odřezávané vrstvy:

$$A_D = f_{ot} \cdot a_p = h_D \cdot b_D, \quad (12)$$

kde: A_D průřez odřezávané vrstvy [mm^2],
 f_{ot} posuv na otáčku [mm],
 a_p hloubka řezu [mm],
 h_D tloušťka odřezávané vrstvy [mm],
 b_D šířka odřezávané vrstvy [mm].

2.3.2 Posuv

Po volbě hloubky záběru následně stanovíme hodnotu posuvu. Volba posuvu závisí na požadované jakosti obrobené plochy a je ovlivněna též geometrií břitu, tuhostí stroje a jeho výkonem. Posuv se volí co největší tak, aby vyhovoval uvedeným kritériím, obvykle se pohybuje v rozsahu 0,05 až 2 mm/ot (viz. tab. 2).

Tab. 2 Velikost posuvu při různých operacích.

Operace	Posuv f [mm/ot]
Hrubování	0,30 až 2,00
Načisto	0,10 až 0,30
Jemné soustružení	0,05 až 0,10

2.3.3 Řezná rychlost

Řezné rychlosti pro soustružení se obvykle pohybují v rozsahu 10 až 600 m.min⁻¹ a jsou závislé zejména na druhu obráběného materiálu, na způsobu obrábění a na druhu nástrojového materiálu. Pro nástroje z rychlořezné oceli a ze slinutých karbidů a pro jednotlivé způsoby soustružení vnějších rotačních ploch, jsou v následujícím přehledu uvedeny orientační hodnoty řezných rychlostí (viz. tab. 3).

Tab. 3 Řezná rychlost při různých operacích a různých materiálech.

Operace	Řezná rychlost v [m/min]	
	Rychlořezná ocel	Slinuté karbidy
Hrubování	10,00 až 90,00	40,00 až 300,00
Načisto	20,00 až 120,00	50,00 až 500,00
Jemné soustružení	40,00 až 150,00	60,00 až 600,00

V daném rozsahu zpravidla platí nejnižší řezné rychlosti pro obrábění legovaných ocelí, vyšší řezné rychlosti je možno volit pro obrábění nelegovaných uhlíkových ocelí a litiny. Vysoké rychlosti lze použít pro obrábění hliníku a jeho slitin. Maximální hodnoty řezné rychlosti uvedené v jednotlivých rozsazích platí pro povlakované nástroje. Při vnitřním soustružení se hodnoty řezných rychlostí snižují až o 20 %

Výpočet řezné rychlosti pomocí otáček obrobku:

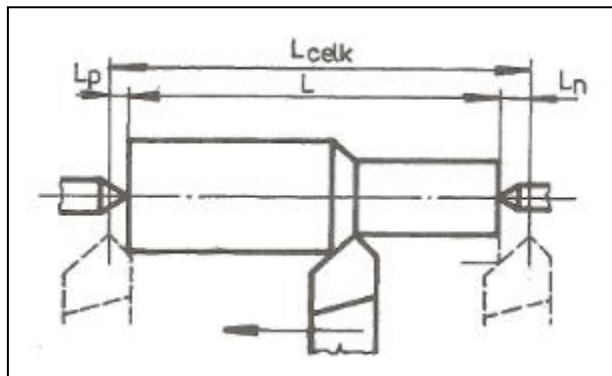
$$v_c = \frac{\pi \cdot D_o \cdot n}{1000}, \quad (13)$$

kde: v_c řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],
 n otáčky [min^{-1}],
 D_o průměr obrobku [m].

Výpočet strojního času:

$$t_{As} = \frac{L_{\text{celk}}}{v_f} = \frac{L_n + L + L_p}{n \cdot f_{ot}}, \quad (14)$$

kde: t_{As} strojní čas [min],
 n otáčky [min^{-1}],
 f_{ot} posuv na otáčku [mm],
 L_{celk} ... celková délka strojního chodu [mm],
 L_n délka náběhu [mm],
 L délka obráběné plochy [mm],
 L_p délka přeběhu [mm].



Obr. 6 Schéma pro výpočet strojního času [2].

Při volbě řezných podmínek je třeba postupovat tak, aby určené řezné podmínky zaručovaly, že výrobek bude vyroben v požadované jakosti a co nejehospodárněji. Pro každý případ obrábění platí pouze jedny takové řezné podmínky. Jsou to tzv. optimální řezné podmínky.

Zásady pro volbu optimálních řezných podmínek:

1. řezné podmínky musí zaručit dodržení požadavků na výrobek, uvedených na výrobním výkrese (rozměrová přesnost a drsnost povrchu),
2. řezné podmínky musí odpovídat technickým parametrům obráběcího stroje (otáčky vřetene, posuvy, výkon pohonného elektromotoru),

3. řezné podmínky (konkrétně průřez třísky) je omezen tuhostí soustavy stroj - nástroj - obrobek - přípravek,
4. řezné podmínky musí být voleny co nejehospodárněji.

Postup volby optimálních řezných podmínek se liší podle toho, zda se jedná o operace hrubování nebo načisto.

Při hrubování, kdy odebíráme třísku větších průřezů, volíme v první řadě hloubku odřezávané vrstvy. Většinou je dána přídavkem na obrábění. Hloubka záběru je omezena délkou ostří nože, v záběru nemají být více než dvě třetiny délky ostří. K rozdělení přídavku na obrábění na více třísek přikročíme pouze tehdy, není-li tuhost soustavy dostatečná nebo nestačí-li výkon pohonu stroje. Stejně volíme posuv co největší, ale takový, jaký dovoluje tuhost soustavy a výkon stroje.

Podmínky pro volbu optimálních řezných podmínek pro operaci hrubování:

- a) Výkon řezání nesmí překročit užitečný výkon $P_{už}$ obráběcího stroje

$$P_{už} \leq F_v \cdot v, \quad (15)$$

$$P_{už} \leq P \cdot \eta, \quad (16)$$

kde: F_v hlavní složka řezné síly [N],
 v řezná rychlost [$m \cdot s^{-1}$],
 P příkon stroje [W],
 η účinnost stroje.

- b) Moment na vřetení nesmí překročit maximální moment odpovídající daným otáčkám. Tento moment určíme z výkonové charakteristiky stroje uvedené v návodu ke stroji. Oblast, ve které může stroj pracovat, je omezena maximálními otáčkami, výkonem a momentem na vřetení.

- c) Složky F_v , F_p , F_f řezné síly nesmějí v žádném případě překročit povolené síly v daných směrech.

- d) Určíme řeznou rychlost v_T odpovídající optimální trvanlivosti břítu.

$$v_{COPT} = v_T = \frac{c_v''}{a_p^{x_v} \cdot f_y^{y_v}}, \quad (17)$$

kde: c_v'' konstanta,
 x_v , y_v exponenty.

Při obrábění načisto většinou není třeba brát v úvahu výkon elektromotoru a tuhost stroje. Průřez třísky je malý. Kritérium volby řezných podmínek je přesnost obrobku a drsnost obrobené lochy. Hloubka odřezávané

vrstvy je známá a je dána přídatkem na obrábění, který zůstal po hrubování. Posuv je omezen pouze požadovanou drsností povrchu, protože by bylo obtížné vázat jej na přesnost obrábění. Přesný výpočet pro určení posuvu z hlediska požadované drsnosti povrchu neexistuje. Z těchto důvodů používáme experimentálně odvozených vzorů nebo hodnot tabulkových. Po stanovení hloubky záběru a posuvu vypočteme opět v_T ze vztahu (17).

Sledovaným parametrem je také drsnost povrchu (viz. tab. 4). Drsnost obrobené plochy je závislá především od posuvu a poloměru špičky nože. Drsnost povrchu nám ovlivňují některé další nástrojové úhly soustružnického nože - úhel nastavení χ_r , vedlejší úhel nastavení χ_r' .

Tab. 4 Orientační hodnoty drsnosti povrchu a přesnosti rozměrů.

Způsob obrábění	Drsnost povrchu Ra [μm]	Přesnost rozměrů IT
Hrubování	$\geq 6,30$	$\geq 12,00$
Obrábění načisto	1,6 až 6,3	9,00 až 11,00
Jemné soustružení	0,20 až 1,60	6,00 až 8,00
Speciální dokončovací soustružení	$< 0,20$	$< 5,00$

2.4 Teplo a tepelná bilance při soustružení

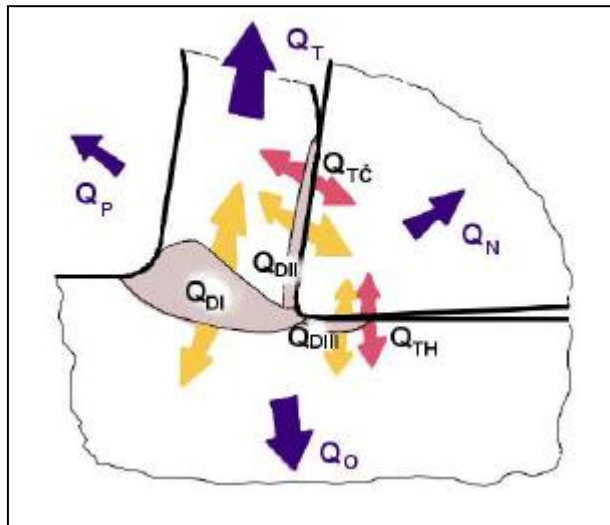
Při třískovém obrábění se až 99 % energie mění v teplo, které má vliv na přesnost obrobku, na vlastnosti povrchové vrstvy obrobku a vlastnosti nástroje [3].

Během soustružení vzniká teplo celkem ve třech oblastech. První oblastí je oblast primární plastické deformace, která vzniká v důsledku plastických a elastických deformací materiálu. Druhou oblast tvoří oblast sekundární plastické deformace, kde dochází ke tření mezi třískou a čelem nástroje. Třetí oblastí je oblast terciálních plastických deformací, kde dochází ke tření mezi hlavním hřbetem nástroje a přechodovou plochou na obrobku.

Vzniklé teplo při obrábění způsobuje ohřev třísky, obrobku, nástroje i vnějšího prostředí [5]. Velikost teploty závisí především na řezných podmínkách a to především na velikosti řezné rychlosti. Dále teplota závisí na vzdálenosti od zdroje tepla a na tepelné vodivosti materiálu.

Pro snížení negativních vlivů na nástroj a obrobek během obrábění je nutné odvést co nejvíce vzniklého tepla třískou nebo do okolního prostředí [5]. Podíl tepla odvedeného třískou závisí na řezné rychlosti. Velké množství tepla odvedeného do nástroje výrazně zvyšuje intenzitu opotřebení, a tudíž snižuje trvanlivost a životnost nástroje. Velké množství tepla odvedeného do obrobku

zhoršuje kvalitu jeho povrchu. Teplo může dosahovat hodnot v rozsahu 300 - 1200 °C.



Obr. 7 Vznik tepla a odvod tepla při soustružení [3].

Tepelná bilance procesu obrábění říká, že teplo vzniklé při soustružení se musí rovnat teplu odvedenému:

$$Q_{DI} + Q_{DII} + Q_{DIII} + Q_{TC} + Q_{TH} = Q_T + Q_O + Q_N + Q_P, \quad (18)$$

- kde: Q_{DI}teplo vzniklé v oblasti primárních plastických deformací [J],
 Q_{DII} ... teplo vzniklé v oblasti sekundárních plastických deformací [J],
 Q_{DIII} ...teplo vzniklé v oblasti terciálních plastických deformací [J],
 Q_{TC} ... teplo vzniklé třením třísky na čele nástroje [J],
 Q_{TH} ... teplo vzniklé třením třísky na hřbetu nástroje [J],
 Q_T teplo odvedené třískou [J],
 Q_O teplo odvedené obrobkem [J],
 Q_N teplo odvedené nástrojem [J],
 Q_P teplo odvedené prostředím [J].

2.5 Řezné prostředí

Obrábění probíhá vždy v určitém prostředí, které hraje významnou úlohu při obrábění. Řezné prostředí svými charakteristikami ovlivňuje průběh procesu, vlastnosti obrobku i hospodárnost celé technologie a tím produktivitu práce. Přirozeným řezným prostředím je vzduchové prostředí, které se často označuje jako suché obrábění. Velice často se používají řezné kapaliny, přesněji pomocné technologické kapaliny pro obrábění. Někdy se aplikují řezné kapaliny ve formě mlhy nebo se výjimečně používají i jiné plyny, než je vzduch.

3. Procesní média

Většina operací obrábění kovů je neproveditelná bez použití procesního média, které má vliv na vznik a průběh primární plastické deformace třísky, vznik a průběh sekundární plastické deformace třísky, teplotu řezání, řezný odpor, trvanlivost a životnost nástroje, kvalitu obrobeného povrchu obrobku, množství spotřebované energie. Správným způsobem chlazení se dosahuje vyšší produktivity.

3.1 Procesní kapaliny

Hlavním úkolem procesních kapalin je především zajištění trvanlivosti nástrojů a jakosti obráběného povrchu při malé spotřebě energie, na což má vliv chladicí a čisticí účinek kapalin. Hospodárnost procesu spočívá také v nízkých pořizovacích nákladech a nákladech na úpravu kapalin. Nesmí zde rovněž docházet ke korozivnímu narušování částí strojů. Mezi sledované vlastnosti procesní kapaliny patří chladicí, mazací, čisticí a ochranný účinek nebo provozní stálost [4].

Chladicím účinkem se rozumí schopnost řezné kapaliny odvádět teplo z místa řezu. Odvod tepla vzniklého při řezání se uskutečňuje tím, že proud řezné kapaliny oplachuje nástroj, třísky i obrobek a přejímá vzniklé teplo. Velikost chladicího účinku závisí na smáčecí schopnosti, na výparném teple, na rychlosti vyparování za určitých teplot, na tepelné vodivosti a na měrném teple.

Mazací účinek je schopnost kapaliny vytvořit na povrchu kovu vrstvu, která brání přímému styku kovových povrchů a snižuje tření, ke kterému dochází mezi nástrojem a obrobkem. Mazací účinek znamená proto zmenšení řezných sil, zmenšení spotřeby energie a také zlepšení jakosti obrobeného povrchu. Mazací schopnost řezné kapaliny je závislá na její viskozitě a na pevnosti vytvořené mezní vrstvy.

Čisticí účinek řezné kapaliny znamená, že její přívod odstraňuje třísky z místa řezání. Řezná kapalina má také bránit slevování částic, které vznikají při řezání, ale má vyvolávat jejich usazování. Čisticí účinek závisí i na čistotě vlastní řezné kapaliny, to znamená na odstraňování nečistot, které kapalina odplavila.

Ochranný účinek řezné kapaliny se projevuje tím, že nenapadá kovy a nezpůsobuje korozi. Toto je důležitý požadavek proto, aby nebylo nutné výrobky mezi operacemi konzervovat, aby se také stroje chránily před korozí.

Dále je u procesních kapalin sledována provozní stálost, kterou je možné hodnotit dobou výměny řezné kapaliny. Dlouhodobost výměny řezné kapaliny je podmíněna zárukou, že se její vlastnosti nebudou po tuto dobu měnit. Provozní stálost řezné kapaliny závisí na jejích fyzikálních a chemických vlastnostech a na teplotě.

Základním hlediskem pro rozdělení procesních kapalin je jejich převažující charakteristická vlastnost, kterou je chladicí nebo mazací účinek. Podle tohoto hlediska se kapaliny třídí na:

- a) chladicí kapaliny,
- b) řezné oleje.

V současnosti je však snahou docílit co možná nejvyšších mazacích účinků i u kapalin s převažujícím chladicím účinkem, čímž se potlačuje rozdíl mezi oběma skupinami. Podle jiných hledisek je možno rozčlenit procesní kapaliny do následujících skupin:

- a) vodné roztoky,
- b) emulzní kapaliny,
- c) řezné oleje,
- d) syntetické kapaliny.

3.2 Plynné látky

Plyny se v současnosti příliš nepoužívají kvůli jejich nízkému chladicímu účinku, problematickému čisticímu účinku a skoro žádnému mazacímu účinku. Mezi vhodné plyny patří oxid uhličitý, dusík, inertní argon nebo freon. Plyn je přiváděn pod vysokým tlakem, pomocí kterého se odstraňují třísky a nečistoty při obrábění. Chlazení plynem se používá především pro výrobu těžkoobrobitelných materiálů. Nevýhodou chlazení plynem jsou poměrně vysoké náklady a riziko nebezpečí při jeho používání.

3.2.1 Obrábění s využitím oxidu uhličitého

Jedním z účinných způsobů chlazení plynem je chlazení stlačeným oxidem uhličitým. Oxid uhličitý se přivádí do místa řezu pod tlakem 0,5 - 7 MPa jako tenký paprsek plynu. Tento způsob chlazení je především vhodný u těžkoobrobitelných materiálů. Oxid uhličitý je k životnímu prostředí šetrný, nehořlavý a je ho všude dost. Po vykonání práce se odpaří do vzduchu, jako jeho přirozená součást. Výhodou této metody je zvýšení výkonu obrábění. Mezi nevýhody patří vysoké náklady na oxid uhličitý a jisté nebezpečí při jeho používání. Vyžaduje se dokonalé odsávání a větrání pracoviště [10].

Pro obrábění vysokého tepleného zatížení s vysokým opotřebením nástroje se používá tryskání pevného oxidu uhličitého. Tato metoda se používá například pro obrábění titanu, slitin niklu, či duplex ocelí. S cíleným chlazením lze dosáhnout větší životnosti nástroje a možností zvýšit i řezné podmínky. Tekutý oxid uhličitý je přiváděn ve formě tryskaného sněhu, proto se této metodě říká "sněhování".

“Sněhování“ využívá proud malých ledových částic o velikosti mikronu. Do tenké trubičky se vede pod tlakem kapalný oxid uhličitý. Po jeho průchodu tryskou, jejíž průměr je pouhé tři desetiny milimetru, se z něj stanou tryskající „sněhánky“. V místě obrábění dojde k ochlazení a současně krystalky oxidu snižují tření. Působí stejně jako mazivo. V laboratorních podmínkách systém sněhování prokázal, že ve srovnání s klasickým obráběním snižuje náklady a rovněž prodlužuje životnost obráběcích nástrojů.

3.2.2 Obrábění s využitím podchlazeného vzduchu

K tomuto účelu se využívá tzv. vírová trubice, která použitím filtrovaného stlačeného vzduchu o tlaku 5,5 – 7 bar jako zdroje energie vytvoří dva proudy vzduchu - jeden studený, který dosahuje teploty až -45°C a jeden horký, který dosahuje teplot až $+120^{\circ}\text{C}$. Proudů vzduchu jsou vytvořeny bez použití elektrické energie, freonů a pohyblivých součástí [10].

Od experimentálních počínů byla dlouhá cesta k průmyslovému využití. V současné době je k dispozici zařízení Cold Air Gun (viz. obr. 8), které pracuje na principu vírové trubice.



Obr. 8 Zařízení Cold Air Gun.

Cold Air Gun používá filtrovaný stlačený vzduch a princip vírové trubice pro vytvoření mrazivého proudu vzduchu. Vírová trubice převádí stlačený vzduch do studeného proudu vzduchu o teplotě až -46°C .

Chlazení studeným vzduchem významně zvyšuje životnost nástroje a to až o 50 %. Dále zvyšuje produktivitu práce a to až o 36 % v porovnání s obráběním na sucho. Účinné chlazení pomocí Cold Air Gun eliminuje místní přehřívání součástí a tím zvyšuje rozměrové tolerance i kvalitu povrchu součástí.

Mezi další výhody Cold Air Gun patří pouhé využití filtrovaného stlačeného vzduchu, vysoká spolehlivost, okamžitý náběh chlazení, snadné seřízení teploty a proudu vzduchu, tichý provoz nebo ekologický provoz.

3.2.3 Obrábění s využitím dusíku

Obrábění s využitím dusíku se dá rozdělit na tři metody - kryogenní chlazení pomocí zkapalněného dusíku, nepřímé chlazení dusíkem a přímé chlazení dusíkem [10].

Pro kryogenní chlazení se využívá kapalného dusíku pro jeho nízké teploty. Dusík se uchovává při teplotě okolo $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tím je umožněno použití rychlé a laciné zásoby chladu. Kapalný dusík lze po jeho zahřátí a následném odpaření využít po procesu jako plyn v prvotní jakosti. Ke zkapalňování dusíku slouží kryogenní expanzní turbíny.

Metoda nepřímého chlazení spočívá v ochlazování místa řezu přívodem dusíku přes trysku umístěnou mimo obráběcí nástroj. Tato metoda velmi závisí na tepelné vodivosti materiálu nástroje či obrobku, kvůli zavedení chladícího účinku až do místa řezu přes odcházející třísku, která brání přímému přístupu do místa řezu. Tím se snižuje efektivita tohoto způsobu chlazení a může dojít k nežádoucím jevům jako je například podchlazení obrobku. Tento způsob lze použít pro jakýkoliv druh obrábění.

Přímé chlazení dusíkem umožňuje přivedení tekutého dusíku přes utvařeč třísky přímo mezi třísku a čelo nástroje. Proud dusíku přes utvařeč třísky pomáhá zvednout třísku a tím zároveň sám sobě umožňuje lepší přístup k ochlazovanému místu a tím dojde ještě k lepšímu chlazení. Na rozdíl od nepřímého chlazení dusíkem tříška neblokuje proudění tekutého dusíku. Tekutý dusík absorbuje teplo, rychle se odpařuje a tvoří kapalino–plynový polštář mezi třískou a čelem nástroje, který funguje jako mazivo. V důsledku toho se snižuje koeficient tření, jakož i sekundární deformace třísky. Mazací a chladicí efekt na nejteplejší místo snižuje teplotu nástroje, čímž účinně snižuje opotřebení nástroje.

3.3 Bez chlazení

Nelze úplně říct, že obrábění bez chlazení neprobíhá v žádném řezném prostředí [8]. V okolí obrábění je okolní vzduch, který má nepatrný vliv na obrábění. Tomuto procesu se říká tzv. suché obrábění. Při procesu obrábění bez chlazení musí být splněna podmínka, že trvanlivost nástroje a jakost obrobené plochy budou minimálně stejné jako při chlazení.

Proces obrábění bez chlazení není vhodný pro všechny druhy materiálů, ale splnit zmiňovanou podmínku dokáže šedá litina. Tento materiál tvoří při obrábění krátkou třísku. Vyvíjí se poměrně malé množství tepla a řezné síly jsou v důsledku přítomnosti grafitu jako mazacího média nízké. Obrábění za sucha se používá především u soustružení při vyšších rychlostech.

Při suchém obrábění musí být nutná úprava nástrojových materiálů, které musí být schopny odolávat teplotám od 1200-1300 °C. Obrábění bez chlazení má ekonomickou výhodu. Podle statistických údajů se do ceny výrobků promítá cena řezné kapaliny 7-16 %. Další výhodou je pracovní prostředí, kde nám řezné kapaliny neznečišťují okolní prostředí, odpadáva skladování a likvidace použitých řezných kapalin.

Ochlazování třísek je poměrně důležitá věc. Třísky se nám mohou usazovat v dutině obrobku, upínacího přípravku nebo obráběcího stroje, a extrémně teplé třísky mají svůj význam na přesnost obrábění. Při obrábění za sucha je přímé ochlazování třísek okolním prostředím velmi malé, proto je nutno se s větší měrou zaměřit na důsledné odstraňování velmi teplých až žhavých třísek z výše jmenovaných oblastí. Tato skutečnost proto obvykle vyžaduje použití speciálních utvářečů. Z jiného pohledu však vyšší teplota řezání zlepšuje plasticitu odřezávaného materiálu třísky a tím její snadnější deformaci a zmenšení řezných sil.

Zajištění nízkého koeficientu tření mezi obrobkem a břitem nástroje lze dosáhnout například vhodným typem ochranné vrstvy nanesené na břit. Chybějící antiadhezní a antidifuzní ochranné účinky procesních kapalin se při obrábění za sucha nahrazují adhezně a difuzně vhodnějšími a odolnějšími řeznými materiály.

Při soustružení za sucha se zpravidla dosahuje nižší trvanlivosti břitu než při použití procesních kapalin. Příčinou jsou vyšší teploty řezání při nepřerušovaném řezu. Zatížení změnami teploty se samozřejmě při plynulém řezu téměř nevyskytuje, protože břit nevybíhá opakovaně ze záběru. Procesní médium tak mění pouze teplotní pole nástroje, ale samotný břit prudce neochlazuje.

4. Metodika experimentu

Kapitola metodika experimentu se zabývá řeznými podmínkami pro experimentální měření, přípravu vzorku, popisem stroje a nástroje, které byly pro experiment použity. Dále je v této kapitole uvedeny měřené parametry použité pro vyhodnocení a měřící zařízení, která umožnila vyhodnocení jednotlivých měřících parametrů.

4.1 Metodika hodnocení plynů pro technologii soustružení

V této části bakalářské práce je popsána metodika pro hodnocení plynů při technologii soustružení.

4.1.1 Experimentální prostředí

Daná problematika bakalářské práce byla řešena společně s problematikou diplomové práce Jaroslava Raka: Účinek procesních plynů a kapalin na technologii soustružení a kvalitu obrobených součástí (diplomová práce). V rámci řešení práce bylo realizováno společné měření (spolupráce) tří procesních médií (za sucha, CO₂ a vírová trubice). V rámci bakalářské práce je zhodnocení tří procesních médií (za sucha, CO₂ a vírová trubice).

4.1.2 Řezné podmínky pro experimentální měření

Řezné podmínky pro experimentální měření jsou popsány v následující tabulce č. 5:

Tab. 5 Řezné podmínky pro soustružení.

Parametr	Označení	Hodnota
Řezná rychlost	v_c [m·min ⁻¹]	141,00
Otáčky	n [min ⁻¹]	900,00
Posuv	f [mm·ot ⁻¹]	0,05
Hloubka záběru	a_p [mm]	1,00

4.1.3 Metodika experimentu

Základní parametry experimentu jsou zpřehledněny v tabulce č. 6.

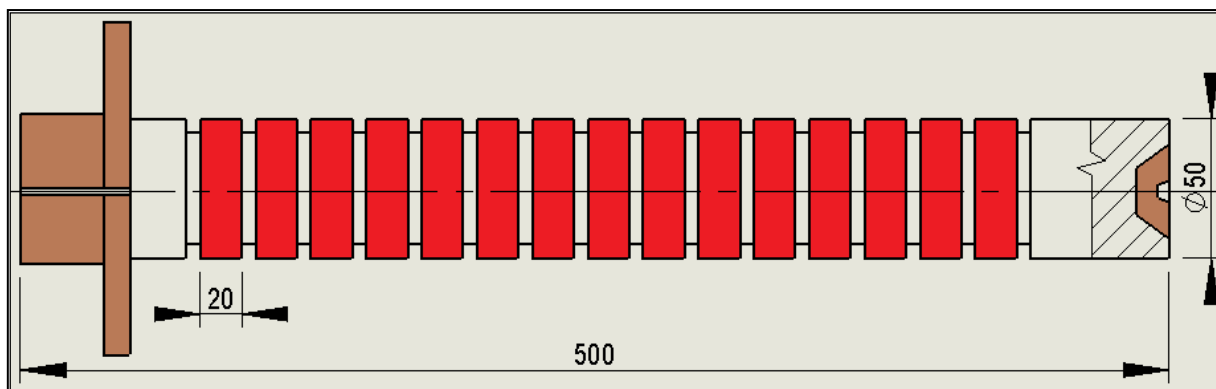
Tab. 6 Základní parametry experimentu.

Měřené parametry	Řezná síla
	Teplota řezného nástroje
	Trvanlivost břítu nástroje
	Drsnost povrchu
	Rozměrová přesnost
Obráběný materiál	Ocel 12 050.1
Rozměry polotovaru	Ø 50x500 mm
Stroj	Soustruh SU50
Nástroj	Nůž stranový ubírací
Nástroj - vyměnitelná břitová destička	TPUN 8230
Řezné prostředí	Obrábění s využitím oxidu uhličitého
	Obrábění s využitím podchlazeného vzduchu
	Obrábění bez chlazení

Příprava zkušebního vzorku pro experiment

Pro experimentální část bakalářské práce byl zvolen materiál ocel 12 050.1. Polotovarem pro výrobu vzorku byla zvolena kruhová tyč Ø50x500 mm.

V první fázi bylo nutné vytvořit na polotovaru 20 mm dlouhé úseky (viz. obrázek 9, zobrazeny červenou barvou), které budou sloužit k měření sil, teploty, drsnosti povrchu a rozměrové přesnosti. Jednotlivé úseky jsou zobrazeny na obrázku 9.



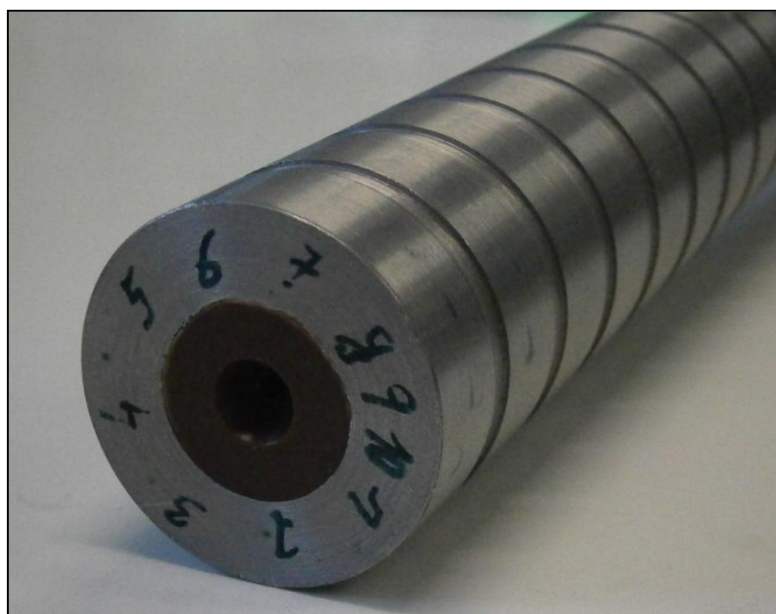
Obr. 9 Příprava vzorku.

Dále bylo nutné odizolovat vzorek od rámu stroje, z důvodu měření teploty termočlánky. K tomuto účelu byla vyrobena speciální objímka z izolačního materiálu kartitu (viz. obrázek 10). Za použití této objímky byl vzorek upnut do sklíčidla. Dále bylo nutné odizolovat vzorek od koníka z důvodu podepření. Pro tento účel byl vyroben izolační kroužek z kartitu, který se vložil

do čela vzorku (viz obrázek 11). Teprve na takto připraveném vzorku mohl být proveden experiment.



Obr. 10 Izolace pro upnutí do sklíčidla.



Obr. 11 Izolace pro upnutí pomocí koníka.

4.2 Popis stroje, nástroje a měřících přístrojů

Obrábění materiálu bylo provedeno na univerzálním hrotovém soustruhu SU 50 s použitím těchto nástrojů:

- soustružnický nůž stranový ubírací pro VBD,
- vyměnitelné břitové destičky TPUN 8230 od firmy Pramet.

Obráběcí stroj

Experimentální část bakalářské práce se uskutečnila s použitím univerzálního soustruhu SU50 (viz. obr. 12), který je součástí strojního vybavení laboratoře Katedry obrábění a montáže TU v Liberci. Základní parametry stroje jsou uvedeny v následující tabulce č. 7.

Tab. 7 Základní parametry soustruhu SU50.

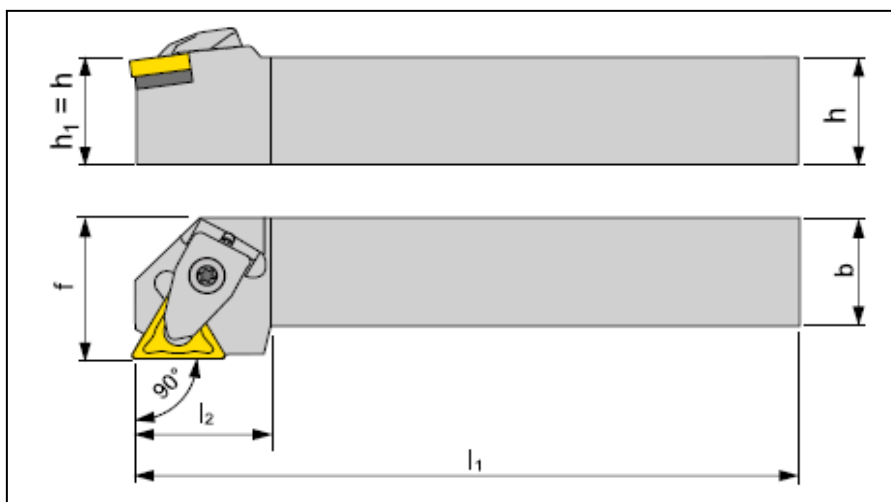
Charakteristika	Hodnota	Jednotka
Oběžný průměr nad ložem	500	[mm]
Oběžný průměr nad suportem	250	[mm]
Průměr sklíčidla	250	[mm]
Největší průřez nože	32x32	[mm]
Počet stupňů otáček vřetena	22	[-]
Rozsah otáček vřetena	11,2-1400	[min ⁻¹]
Rozsah podélného posuvu	0,027-3,8	[mm/ot]
Rozsah příčného posuvu	0,013-1,9	[mm/ot]
Počet motorů pro hlavní pohon stroje	2	[-]
Výkon motoru pro hlavní pohon stroje	2x5,5	[kW]
Otáčka motoru pro hlavní pohon stroje	1400	[ot/min]



Obr. 12 Soustruh SU50.

Nástroj a vyměnitelná břitová destička

Pro soustružení vzorku byl zvolen soustružnický nůž stranový ubírací, který je konstruován pro použití vyměnitelných břitových destiček od firmy PrametTools, s.r.o. (viz obrázek 13). Rozměry soustružnického nože jsou zobrazeny v tabulce 8.



Obr. 13 Ubírací stranový soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou.

Tab. 8 Parametry soustružnického nože.

Rozměr	Hodnota	Jednotky
b	20,00	[mm]
h	20,00	[mm]
h ₁	20,00	[mm]
f	20,50	[mm]
l ₁	125,00	[mm]
l _{2max}	32,00	[mm]
Úhel nastavení χ	90,00	[°]

Pro provedení experimentu byly použity vyměnitelné břitové destičky od firmy Pramet - TPUN 160308 z materiálu H15 – 25 (kde H značí druh materiálu, ze kterého je břitová destička vyrobena). Jednalo se o břitové destičky z materiálu bez kubických karbidů s nízkým obsahem kobaltu, které se vyznačují geometrií s nulovým úhlem čela. Tyto destičky jsou prioritně určeny pro soustružení. Dodávají se ve velikostech 1103, 1603, 2204. Pro experiment se zvolila velikost 1603. Parametry břitové destičky jsou uvedeny na obrázku 14.

Velikost Velkosť	(l)	d	s	r_e	
1103	11,0	6,35	3,18	0,4	
1603	16,5	9,53	3,18	0,4	
2204	22,0	12,70	4,76	0,8	

Obr. 14 Vyměnitelná břitová destička TPUN 160308 [10].

Piezelektrický dynamometr KISTLER, typ 9265B

Pro měření složek řezných sil F_c , F_f a F_p byl použit piezelektrický dynamometr.

Dynamometr KISTLER (viz. obrázek 16) má vysokou vlastní frekvenci a je schopen měřit staticky i dynamicky. Je složen ze čtyř piezelektrických snímačů, z toho každý je složen z piezelektrických destiček, které jsou umístěny tak, že každá zachycuje sílu v jiném směru. Konstrukce dynamometru je zvolena tak, aby se náboje z jednotlivých snímačů sčítaly. Náboje z piezelektrických snímačů jsou zesilovány nábojovým zesilovačem 5019 B (viz. obrázek 15).



Obr. 15 Nábojový zesilovač, typ 5019B.

Dynamometr KISTLER se převážně používá pro měření složek sil při broušení, frézování a soustružení. Při soustružení se měřící zařízení upne na soustruh pomocí šroubů.

Správná funkce dynamometru je závislá na dodržení těchto podmínek:

- Teplota vzduchu $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,
- Vlhkost vzduchu $42\% \pm 5\%$.



Obr. 16 Piezoelektrický dynamometr KISTLER 9265B.

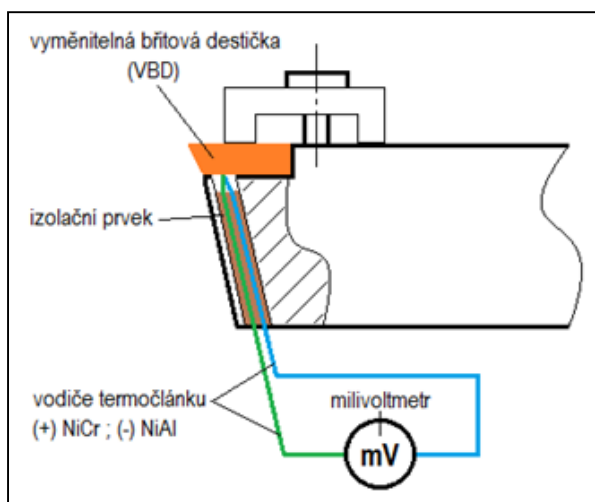
Umělý termočlánek typu K

Pro technologii soustružení bylo z důvodu rotace obrobku použito měření teploty v místě řezu prostřednictvím vyměnitelné břitové destičky. Termočlánek byl stabilně zabudovaný v nástroji a snímal tak teplotu na povrchu a na dolní ploše břitové destičky. Byl zvolen termočlánek typu K. Stabilně zabudovaný termočlánek je zobrazen na obrázku 17.



Obr. 17 Termočlánek stabilně zabudovaný na vyměnitelné břitové destičce.

Podstatou umělého termočláňku je přímé umístění termočláňku do místa řezu (měření teploty). S pomocí těchto dvou vodičů lze měřit teplotu v různých místech nástroje. Nejčastěji se používá k měření teploty na břit nástroje. Schéma zapojení umělého termočláňku je zobrazeno na obrázku 18



Obr. 18 Umělý termočláňek pro soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou.

Tabulka 9 Obvykle používané kombinace umělých termočláňků a jejich vlastnosti.

Označení	+ přívod	- přívod	Teplotní rozsah [°C]	Rozsah [mV]
J	Fe	Cu – Ni	-210°C – 1200°C	-8,10 – 69,50
K	Ni – Cr	Ni – Al	-270°C – 1372°C	-6,40 – 54,90
T	Cu	Cu – Ni	-270°C – 400°C	-6,20 – 20,80
R	Pt (13%) – Rh (13%)	Pt	-210°C – 1200°C	-0,20 – 210
G	W	W (26%) – Re (26%)	-50°C – 1768°C	0 – 38,50
D	W (3%) – Re (3%)	W (25%) – Re (25%)	0°C – 2320°C	0 – 39,50
E	Ni – Cr	Cu – Ni	0°C – 2320°C	-9,80 – 76,40

Jednotlivé upravené a izolované termočláňky byly svařovány kondenzátorovou svářečkou k břitové destičce (viz. obrázek 19). Termočláňky

byly ve správném pořadí a polaritě zapojeny do svorkovnic a následně do sběrnice dat propojené s provozní jednotkou PP65 od firmy B&R.

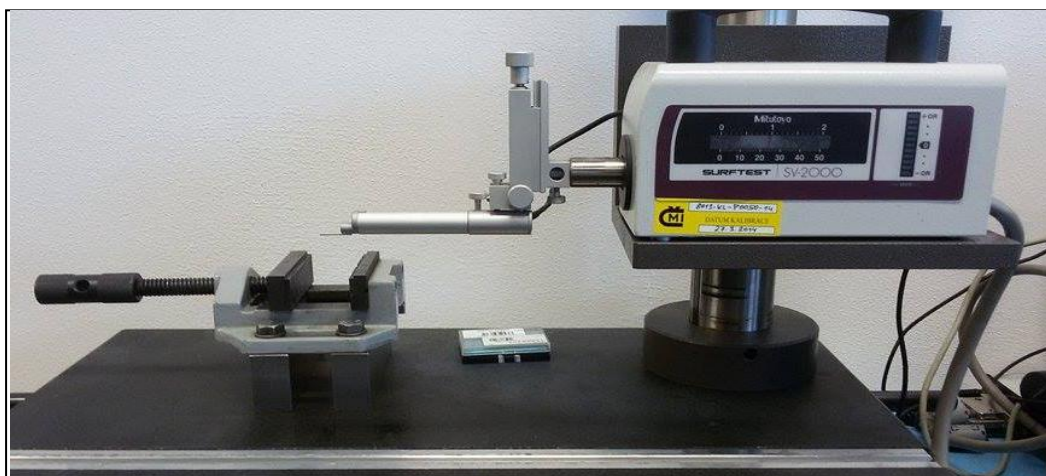


Obr. 19 Kondenzátorová svářečka.

Laboratorní profiloměr MITUTOYO

Kvalita povrchu obrobeného vzorku je reprezentovaná parametry drsnosti povrchu měřenými pomocí profiloměru Mitutoyo SurfTestSV-2000N2 (viz. obrázek 20). Z velkého počtu parametrů drsnosti povrchu, které umožňuje software SurfPak vypočítat, byly pro vyhodnocení zvoleny parametry R_a (průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu), R_z (největší výška profilu), R_t (celková výška profilu).

Snímač ujede po povrchu vzdálenost 4,8 mm, z každé strany se 0,4 mm ořízne a vyhodnocování proběhne na dráze 4 mm. Hodnoty zvolených parametrů se vypočítají pomocí ovládacího softwaru.



Obr. 20 Laboratorní profiloměr MITUTOYO SurfTest SV2000N2.

Dílenský mikroskop ZEISS

Mikroskop (viz. obrázek 21) byl použit při měření opotřebení břitových destiček. VBD se demontovaly z nástroje po jednotlivých typech chlazení při soustružení, potom bylo možné změřit jejich opotřebení.

Mikroskop je osazen dvěma mikrometrickými šrouby s přesností na 0,01 mm ve dvou osách. Okulár je vybaven nitkovitým křížem, který slouží pro správné umístění VBD a odečtení hodnoty opotřebení.



Obr. 21 Mikroskop ZEISS.

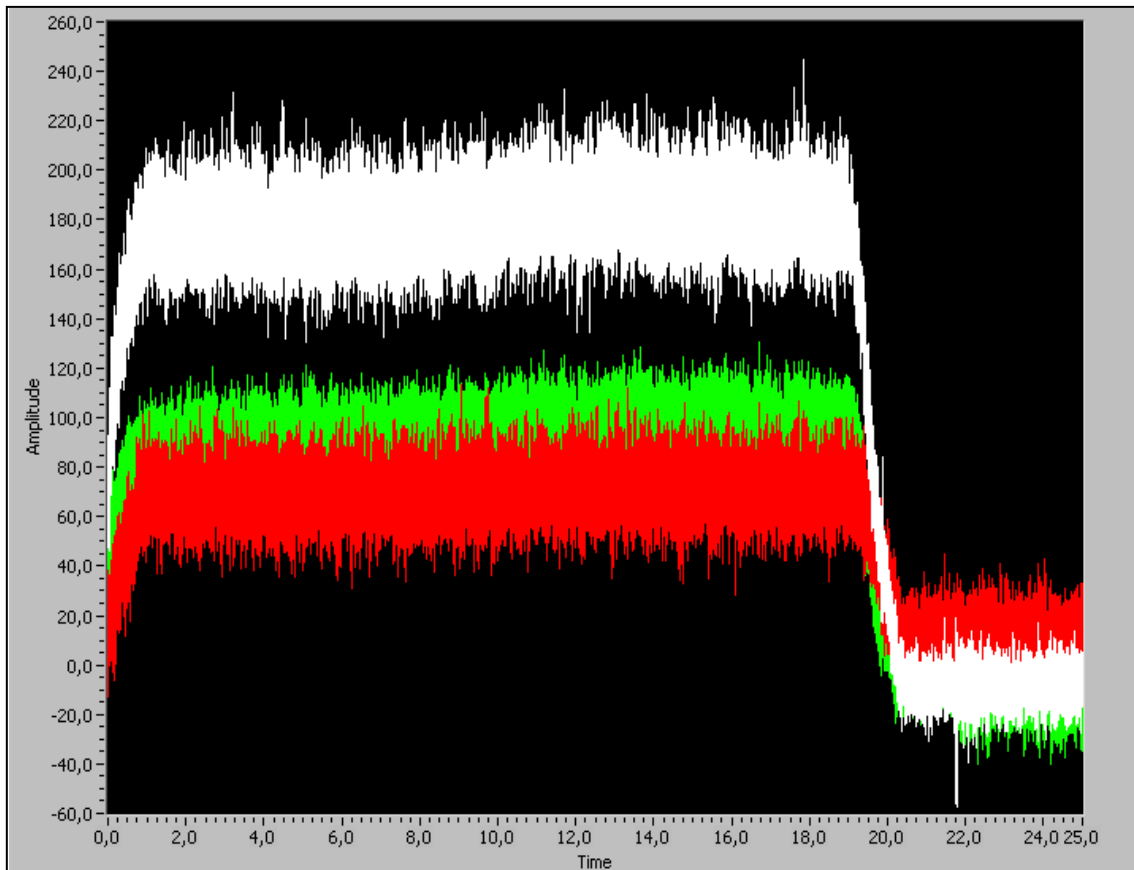
4.3 Měřené parametry

Řezná síla

K měření řezných sil byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER, typ 9265B. Tento dynamometr využívá pro snímání deformace piezoelektrického jevu, který je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Velikost tohoto náboje je přímo úměrná velikosti působící síly a s poklesem zatížení se lineárně snižuje, až zcela vymizí při nulovém zatížení. Vzorové naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10 a obrázku 22.

Tabulka 10 Vzorové naměřené hodnoty řezných sil při technologii soustružení.

Vzorové hodnoty sil při technologii soustružení						
Měření č.	1	2	3	4	5	Celkový průměr
F_x [N]	110,00	105,00	107,50	97,00	94,00	102,70
F_y [N]	56,50	51,00	55,0	58,50	49,00	54,00
F_z [N]	202,00	194,00	201,50	202,00	191,00	198,10



Obr. 22 Vzorový průběh řezných sil při technologii soustružení.

Teplota obrobku

Pro technologii soustružení bylo z důvodu rotace obrobku použito měření teploty v místě řezu prostřednictvím vyměnitelné břitové destičky. Byly použity tři termočlánky (T1, T2 a T3), které se stabilně zabudovaly do vyměnitelné břitové destičky a snímaly tak teplotu na povrchu a dolní ploše břitové destičky. Vzorové naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11 a obrázku 23.

Tabulka 11 Vzorové hodnoty teplot v místech jednotlivých termočlánků při technologii soustružení.

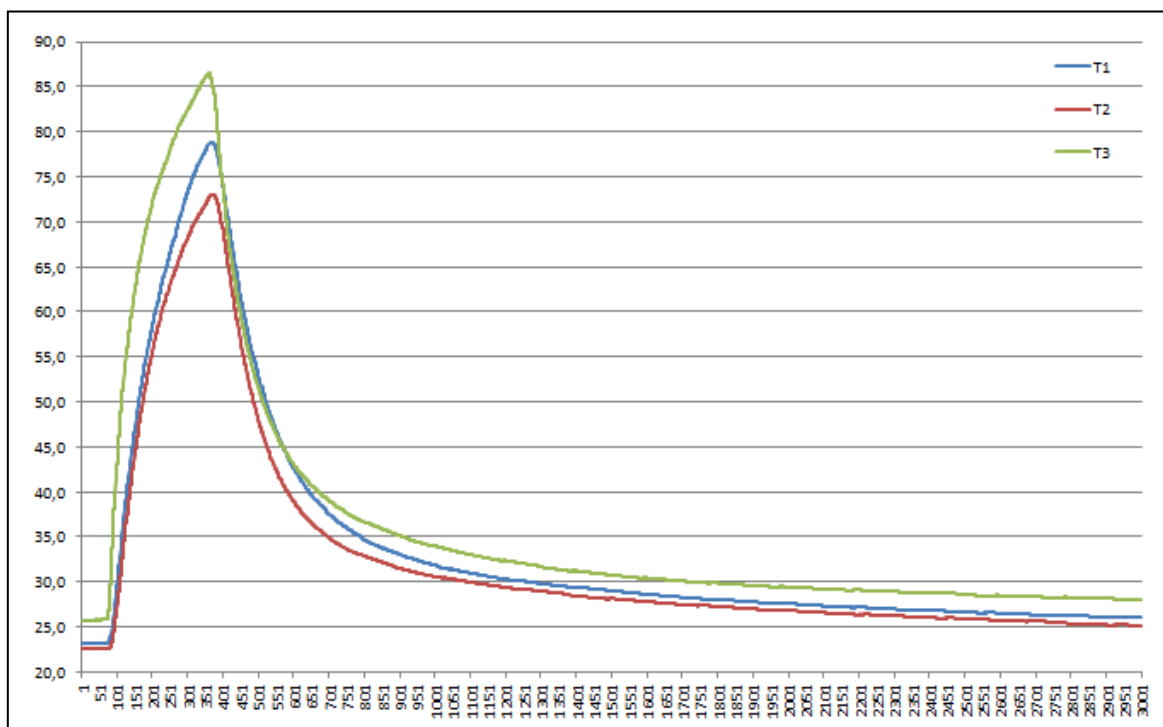
Vzorové hodnoty teplot při technologii soustružení						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	Celkový průměr
T1 [°C]	54,10	57,20	63,70	68,10	54,20	59,46
T2 [°C]	54,30	57,10	64,30	62,10	53,20	58,20
T3 [°C]	58,30	61,30	72,10	79,20	58,90	65,96

kde:

T1 – teploty termočlánku umístěného ve spodní části břitové destičky [°C],

T2 – teploty termočlánku umístěného ve spodní části břitové destičky [°C],

T3 – teploty termočlánku umístěného na povrchu břitové destičky [°C].



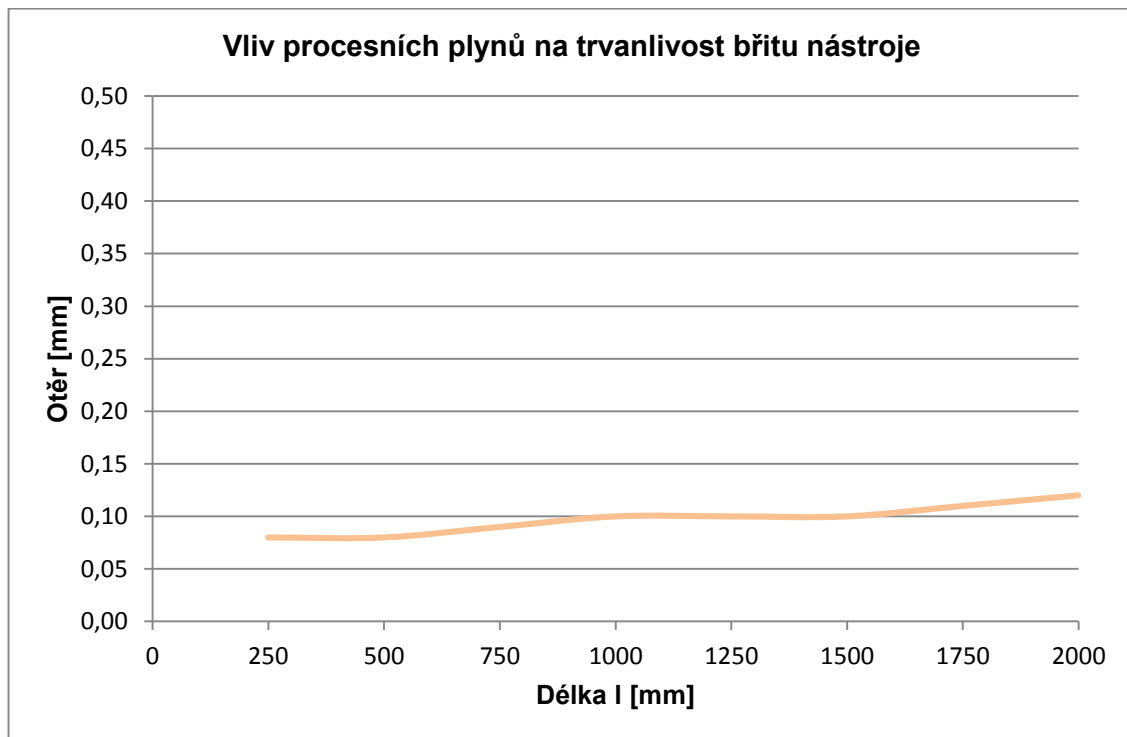
Obr. 23 Vzorový průběh měření teploty.

Trvanlivost břítu nástroje

Hodnocení trvanlivosti břítu soustružnického nástroje bylo provedeno sledováním opotřebení po jednotlivých krocích o délce 250 mm do celkové délky 2000 mm, aby bylo dosaženo dostatečné škály odměřených hodnot. Měření trvanlivosti pro každé procesní médium a každý měřený úsek se provádělo z důvodu minimalizace chyb 3x. Z naměřených hodnot se vypočítal aritmetický průměr. Měření opotřebení vyměnitelných břitových destiček se provádělo na dílenském mikroskopu ZEISS. Vzorové naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 12 a obrázku 24.

Tabulka 12 Vzorové hodnoty opotřebení břitové destičky při technologii soustružení.

Vzorové hodnoty trvanlivosti břitu nástroje při technologii soustružení				
l [mm]	Otěr 7 [mm]	Otěr 8 [mm]	Otěr 9 [mm]	Průměr [mm]
250	0,09	0,08	0,07	0,08
500	0,10	0,08	0,07	0,08
750	0,10	0,09	0,08	0,09
1000	0,11	0,10	0,08	0,10
1250	0,11	0,10	0,10	0,10
1500	0,12	0,10	0,10	0,10
1750	0,12	0,11	0,11	0,11
2000	0,13	0,12	0,12	0,12

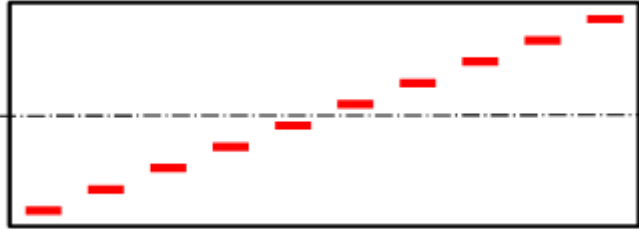


Obr. 24 Vzorový průběh opotřebení břitové destičky při technologii soustružení.

Drsnost povrchu

Kvalita povrchu obrobeneho vzorku je reprezentovaná parametry drsnosti povrchu měřenými pomocí profiloměru Mitutoyo SurfTestSV-2000N2. Z velkého počtu parametrů drsnosti povrchu, které umožňuje software SurfPak vypočítat, byly pro vyhodnocení experimentu zvoleny parametry Ra (průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu), Rz (největší výška profilu), Rt (celková výška profilu).

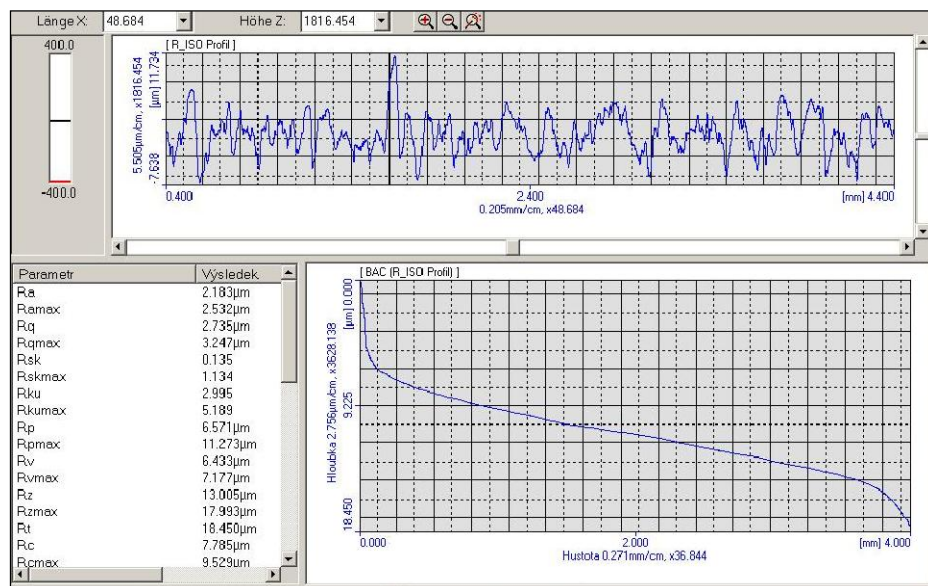
Snímač ujede po povrchu vzdálenost 4,8 mm, z každé strany se 0,4 mm ořízne a vyhodnocování proběhne na dráze 4 mm. Hodnoty zvolených parametrů se vypočítají pomocí ovládacího softwaru Surfpack. Měření profilu povrchu bylo realizováno v místech podle obrázku 25.



Obr. 25 Místa měření drsnosti povrchu soustruženého vzorku.

Tabulka 13 Vzorové hodnoty parametrů drsnosti povrchu při technologii soustružení.

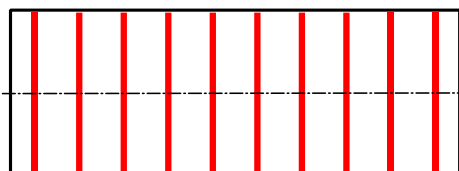
Vzorové hodnoty drsnosti povrchu při technologii soustružení						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	Průměrná hodnota
Ra	2,42	2,31	2,12	2,53	2,22	2,32
Rz	14,26	13,57	13,41	14,11	13,01	13,67
Rt	18,21	18,02	18,25	19,31	17,77	18,31



Obrázek 26 Vzorový výstup z programu Surfpack při technologii soustružení.

Rozměrová přesnost

V rámci hodnocení rozměrové přesnosti byl pomocí ručního mikrometru (viz. obrázek 27) změřen průměr vysoustružené plochy. Každý úsek byl přeměřován 10x z důvodu minimalizace chyb. Z naměřených hodnot se vypočítal aritmetický průměr. Měření bylo realizováno podle následujícího obrázku (viz. obrázek 28).



Obr. 27 Místa měření průměru vysoustruženého obrobku.



Obrázek 28 Měření rozměrové přesnosti pomocí ručního mikrometru.

5. Experimentální měření vlivu chlazení plynnou látkou při technologii soustružení

Experimentální část se zabývá samotným vyhodnocením výsledků dosažených během měření experimentu. U každého parametru jsou tabulky naměřených hodnot a graf výsledků, které byly zpracovány pomocí programu Microsoft Excel. Na konci každého měřeného parametru je vyhodnocení výsledků dosažených během měření.

Složky řezných sil

Naměřené hodnoty složek řezných sil byly zpracovány programem LabView 6.1, který je součástí měřící soustavy dynamometru KISTLER (viz kapitola 4.2). Výstupem programu jsou konkrétní velikosti složek řezných sil, které jsou znázorněny na obrázku 24. Bílou barvou je znázorněna řezná síla F_z , červenou barvou síla příusuvová F_y a zelenou barvou síla posuvová F_x . Z výstupních hodnot byly odečteny hodnoty znázorňující konkrétní velikosti řezných sil při soustružení. Odečtené hodnoty byly zaznamenány do tabulky 14 a následně sestaven graf za pomoci programu Microsoft Excel. Ukázky grafů z programu LabView jsou přiloženy v příloze B.

Tab. 14.1 Průměrné hodnoty jednotlivých složek působících sil s použitím CO_2 .

CO ₂						
Měření č.	1	2	3	4	5	Celkový průměr
F_x [N]	100,00	110,00	102,50	95,00	95,00	100,50
F_y [N]	57,50	50,00	57,50	57,50	45,00	53,50
F_z [N]	200,00	190,00	202,50	200,00	190,00	196,50

Tab. 14.2 Průměrné hodnoty jednotlivých složek působících sil s použitím vírové trubice.

VÍROVÁ TRUBICE						
Měření č.	1	2	3	4	5	Celkový průměr
F_x [N]	90,00	92,50	90,00	105,00	92,50	94,00
F_y [N]	75,00	72,50	72,50	60,00	70,00	70,00
F_z [N]	190,00	185,00	195,00	197,50	185,00	190,50

Tab. 14.3 Průměrné hodnoty jednotlivých složek působících sil bez chlazení.

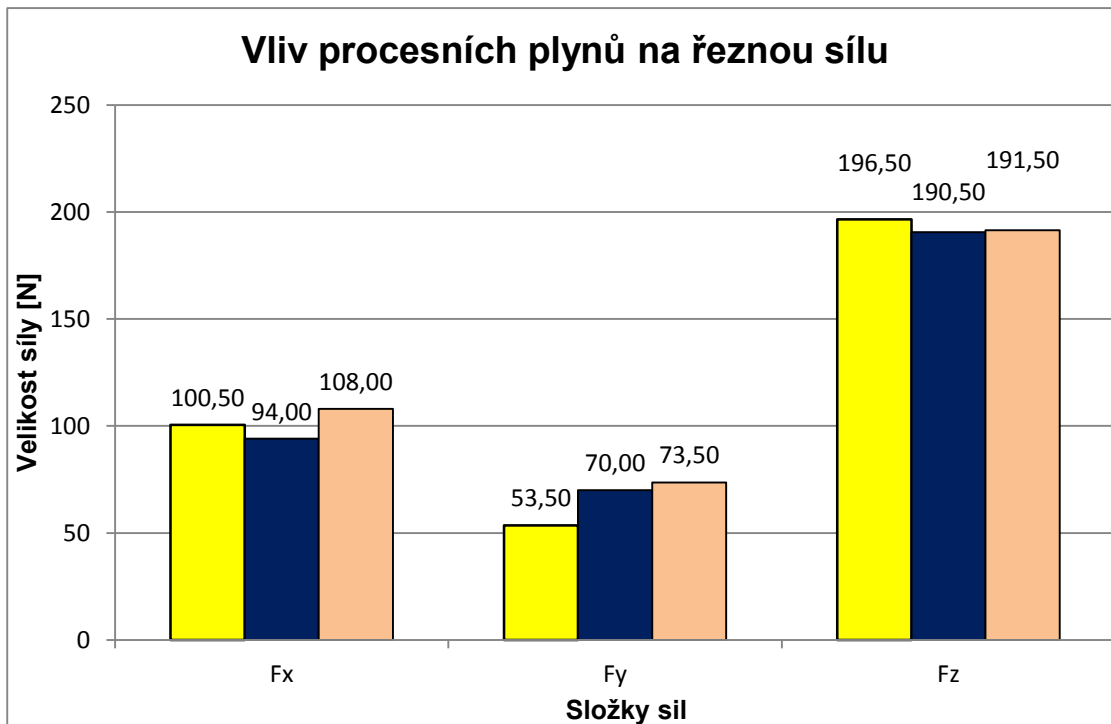
BEZ CHLAZENÍ						
Měření č.	1	2	3	4	5	Celkový průměr
F_x [N]	100,00	110,00	112,50	120,00	97,50	108,00
F_y [N]	70,00	70,00	77,50	65,00	85,00	73,50
F_z [N]	195,00	192,50	190,00	190,00	190,00	191,50

kde:

F_x – posuvová síla [N],

F_y – příusuvová síla [N],

F_z – řezná síla [N].



Graf 1 Vliv procesních plynů na složky působících sil při technologii soustružení.

Z naměřených hodnot můžeme určit, že ani jedno z použitých řezných prostředí nemá výrazný vliv na řezné síly. U všech třech druhů procesních plynů se dosahovalo podobných velikostí řezných sil.

Vliv procesního média na teplotu obrobku při soustružení

V první fázi tohoto experimentu bylo nutné vhodně zabudovat termočlánky do oblasti vyměnitelné břitové destičky. Na břitovou destičku byly umístěny tři termočlánky T1, T2 a T3. Jeden termočlánek (T3) se umístil na povrch destičky a zbylé dva termočlánky (T1 a T2) do spodní části destičky. Termočlánky se umístily co nejbližší k řezné části, aby se dala co nejpřesněji měřit teplota v místě řezu. Jednotlivé termočlánky byly svařeny k destičce pomocí kondenzátorové svářečky (viz kapitola 4.2).

Naměřená data vyhodnotila provozní jednotka PP 65. Data jsou znázorněna na obrázku 25, kde zelenou barvou je označen průběh teploty termočlánku T3, který byl umístěn na povrch břitové destičky. Červeně a modře jsou označeny průběhy teplot termočlánků T1 a T2 umístěných ve spodní části destičky. Ukázky grafů s průběhy teplot jsou přiloženy v příloze C.

Odečtené hodnoty byly zaznamenány do tabulky 15 a následně sestrojen graf za pomoci programu Microsoft Excel.

Tab. 15.1 Průměrné hodnoty teplot jednotlivých termočlánků s použitím CO₂.

CO ₂						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	Celkový průměr
T1 [°C]	53,20	58,80	67,70	68,60	57,60	61,18
T2 [°C]	52,60	58,00	67,50	66,10	51,40	59,12
T3 [°C]	59,40	62,40	73,40	80,30	57,40	66,58

Tab. 15.2 Průměrné hodnoty teplot jednotlivých termočlánků s použitím vírové trubice.

VÍROVÁ TRUBICE						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	Celkový průměr
T1 [°C]	54,60	59,80	56,10	69,80	54,90	59,04
T2 [°C]	53,90	58,90	55,20	67,70	53,60	57,86
T3 [°C]	22,80	23,70	24,70	26,40	26,60	24,84

Tab. 15.3 Průměrné hodnoty teplot jednotlivých termočlánků bez chlazení.

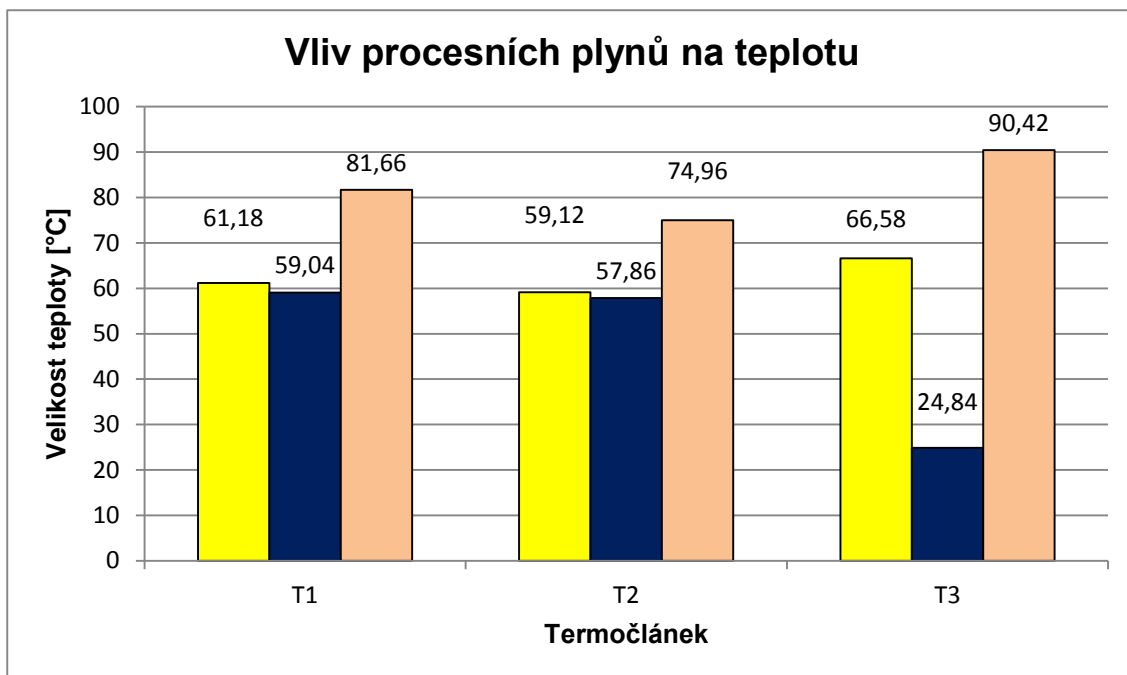
BEZ CHLAZENÍ						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	Celkový průměr
T1 [°C]	78,8	82,3	82,3	82,5	82,4	81,66
T2 [°C]	73	76,3	75,2	75,1	75,2	74,96
T3 [°C]	86,5	90,5	90,4	92,8	91,9	90,42

kde:

T1 – teploty termočlánku umístěného ve spodní části břitové destičky [°C],

T2 – teploty termočlánku umístěného ve spodní části břitové destičky [°C],

T3 – teploty termočlánku umístěného na povrchu břitové destičky [°C].



Graf 2 Vliv procesních plynů na teplotu při technologii soustružení.

Dle tabulky (viz. tabulka 15) a grafu 2 můžeme určit, že největších teplot se dosahuje při obrábění za sucha, kdy bylo dosaženo nejvyšší teploty 90 °C. U vírové trubice se teplota na povrchu destičky pohybovala kolem 25 °C a uvnitř břitové destičky kolem 60 °C. Vyšších hodnot teploty bylo dosaženo při obrábění pomocí CO₂. Teplota u termočlánu T3 se pohybovala kolem 67 °C a teplota uvnitř břitové destičky kolem 60 °C. Je tedy zřejmé, že po obrábění bez procesního média se nejvyšších teplot dosahuje při obrábění pomocí oxidu uhličitého.

Trvanlivost břítu nástroje

Pro tento experiment byla zvolena dlouhodobá zkouška trvanlivosti, kdy se průběžně při soustružení délky 2000 mm měřilo opotřebení břitové destičky na dílenském mikroskopu ZEISS (viz kapitola 4.2).

Měření probíhalo při konstantní řezné rychlosti na soustruhu SU 50. Tento stroj nemá plynulou změnu otáček se změnou průměru obrobku, tedy řezná rychlost není konstantní. Bylo tedy nutné měřit skutečné otáčky vřetene stroje a řeznou rychlost dopočítat.

Experiment probíhal postupně pro každé procesní prostředí, pro minimalizaci chyb se provedlo měření třikrát. Z naměřených hodnot se vypočítaly průměrné hodnoty.

Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulky 16 a následně sestrojen graf za pomoci programu Microsoft Excel.

Tab. 16.1 Průměrné hodnoty opotřebení břitu nástroje s použitím CO₂.

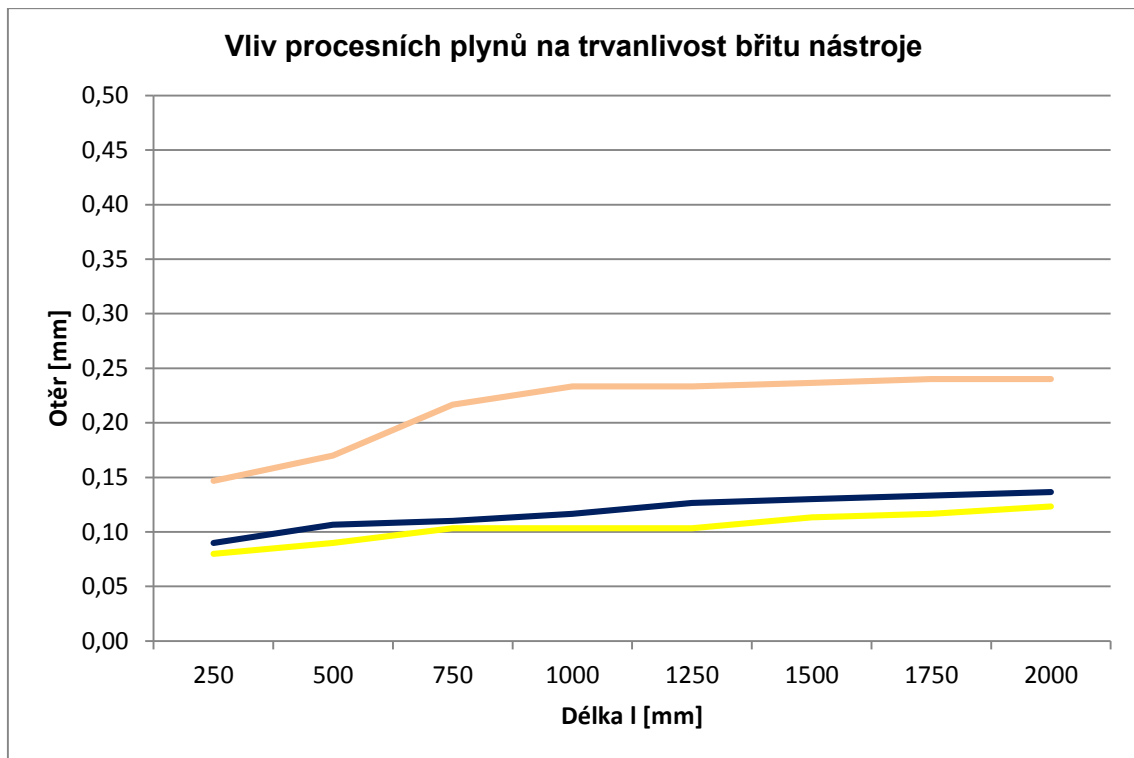
CO₂				
l [mm]	Otěr 7 [mm]	Otěr 8 [mm]	Otěr 9 [mm]	Průměr [mm]
250	0,10	0,07	0,07	0,08
500	0,10	0,09	0,08	0,09
750	0,11	0,10	0,10	0,10
1000	0,11	0,10	0,10	0,10
1250	0,11	0,10	0,10	0,10
1500	0,11	0,12	0,11	0,11
1750	0,11	0,12	0,12	0,12
2000	0,12	0,12	0,13	0,12

Tab. 16.2 Průměrné hodnoty opotřebení břitu nástroje s použitím vírové trubice.

VÍROVÁ TRUBICE				
l [mm]	Otěr 4 [mm]	Otěr 5 [mm]	Otěr 6 [mm]	Průměr [mm]
250	0,11	0,08	0,08	0,09
500	0,11	0,10	0,11	0,11
750	0,12	0,10	0,11	0,11
1000	0,12	0,11	0,12	0,12
1250	0,13	0,13	0,12	0,13
1500	0,13	0,13	0,13	0,13
1750	0,14	0,13	0,13	0,13
2000	0,14	0,14	0,13	0,14

Tab. 16.3 Průměrné hodnoty opotřebení břitu nástroje bez chlazení.

BEZ CHLAZENÍ				
l [mm]	Otěr 1 [mm]	Otěr 2 [mm]	Otěr 3 [mm]	Průměr [mm]
250	0,14	0,14	0,16	0,15
500	0,14	0,18	0,19	0,17
750	0,18	0,23	0,24	0,22
1000	0,22	0,23	0,25	0,23
1250	0,22	0,23	0,25	0,23
1500	0,22	0,24	0,25	0,24
1750	0,23	0,24	0,25	0,24
2000	0,23	0,24	0,25	0,24



Graf 3 Vliv procesních plynů na trvanlivost břítu nástroje při technologii soustružení.

Dle Taylorova vztahu a grafu můžeme zjistit, že ze začátku dojde k velkému nárůstu opotřebení břítu nástroje, poté se hodnoty opotřebení ustálí a poté dojde opět k většímu nárůstu opotřebení břítu nástroje. Z výše uvedených údajů (viz. tabulka 16) a sestrojeného grafu 3 vyplývá, že nejvyššího nárůstu opotřebení břitové destičky bylo dosaženo bez procesního plynu. Dále je zřetelný pozitivní vliv chlazení procesními plyny na trvanlivost rezného nástroje při soustružení, protože dochází k podstatnému snížení opotřebení břitové destičky. Dále je zřejmé, že čím větší podchlazení se provede, tím menší opotřebení destička vykazuje.

Parametry drsnosti povrchu

Procesní plyny byly dále hodnoceny podle vlivu na výslednou drsnost povrchu obrobeného vzorku. Hodnoceny byly tyto parametry: Ra (průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu), Rz (největší výška profilu), Rt (celková výška profilu).

Na každém obrobeném vzorku bylo provedeno deset měření, z důvodu minimalizace případných odchylek. Parametry drsnosti povrchu byly měřeny pomocí profiloměru Mitutoyo SurfTestSV-2000N2 (viz kapitola 4.2). Vyhodnocení dat proběhlo v programu SurfPak a dále zpracovány do tabulek a grafů v programu Microsoft Excel. Naměřené hodnoty parametrů drsnosti

povrchu jsou přiloženy v příloze D. Průměrné hodnoty parametrů drsnosti povrchu byly zaznamenány do tabulky 17 a následně sestaven graf za pomoci programu Microsoft Excel.

Tab. 17.1 Průměrné hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti soustruženého vzorku s použitím CO₂.

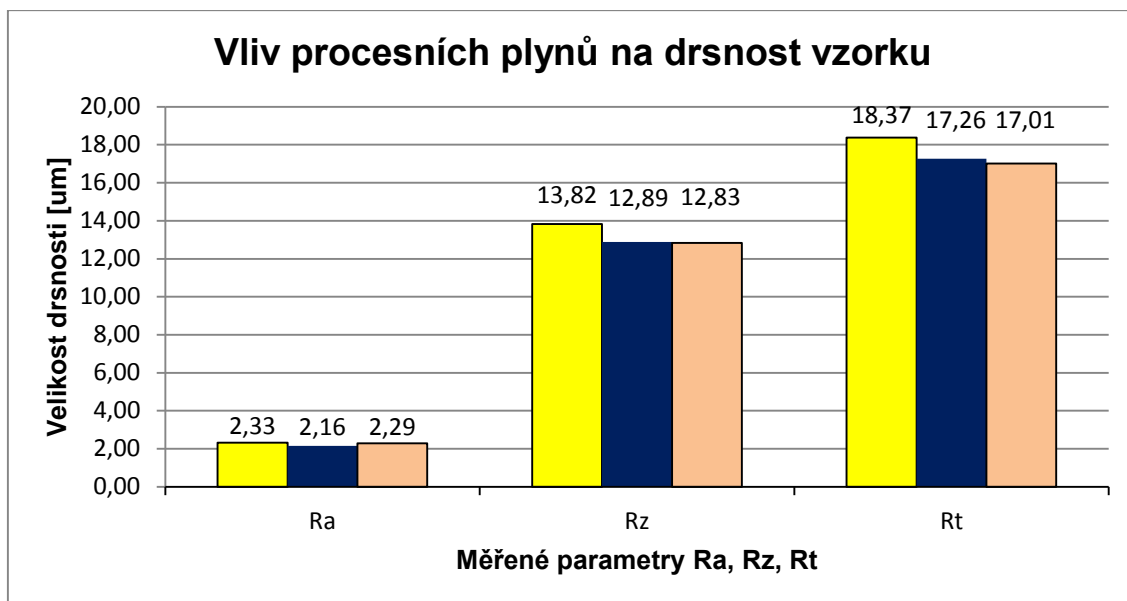
CO₂						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	Průměrná hodnota
Ra	2,47	2,25	2,29	2,44	2,18	2,33
Rz	14,56	13,28	13,79	14,49	13,00	13,82
Rt	18,34	18,02	18,69	19,18	17,63	18,37

Tab. 17.2 Průměrné hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti soustruženého vzorku s použitím vírové trubice.

VÍROVÁ TRUBICE						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	Průměrná hodnota
Ra	2,21	2,31	2,26	2,01	2,01	2,16
Rz	13,45	14,01	14,04	11,41	11,53	12,89
Rt	18,26	19,71	18,53	15,04	14,78	17,26

Tab. 17.3 Průměrné hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti soustruženého vzorku bez chlazení.

BEZ CHLAZENÍ						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	Průměrná hodnota
Ra	2,30	2,26	2,16	2,38	2,36	2,29
Rz	13,50	12,66	12,33	13,01	12,63	12,83
Rt	19,78	16,58	16,47	16,94	15,28	17,01



Graf 4 Vliv procesních plynů na parametry drsnosti povrchu při technologii soustružení.

Z výše uvedených údajů (viz. tabulka 17) a sestrojeného grafu 4 vyplývá, že nejhorší drsnost povrchu je dosažena při použití oxidu uhličitého. Obrábění za sucha a s použitím vírové trubice bylo dosaženo podobných hodnot drsnosti povrchu. Z naměřených hodnot je zřetelné, že procesní plyny mají negativní vliv na drsnost povrchu.

Rozměrová přesnost

V rámci hodnocení rozměrové přesnosti byl pomocí dostupných měřidel změřen průměr vysoustružené plochy zkušební vzorku, postupně pro jednotlivá procesní média.

Měření bylo realizováno pomocí ručního mikrometru (viz kapitola 4.2), kdy každý úsek byl přeměřován 10x, z důvodu minimalizace chyb. Z naměřených hodnot se vypočítal aritmetický průměr. Hodnoty z měření rozměrové přesnosti jsou přiloženy v příloze E. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulky 19 a následně sestrojen graf za pomoci programu Microsoft Excel.

Tab. 18.1 Průměrné hodnoty průměru soustruženého vzorku s použitím CO₂.

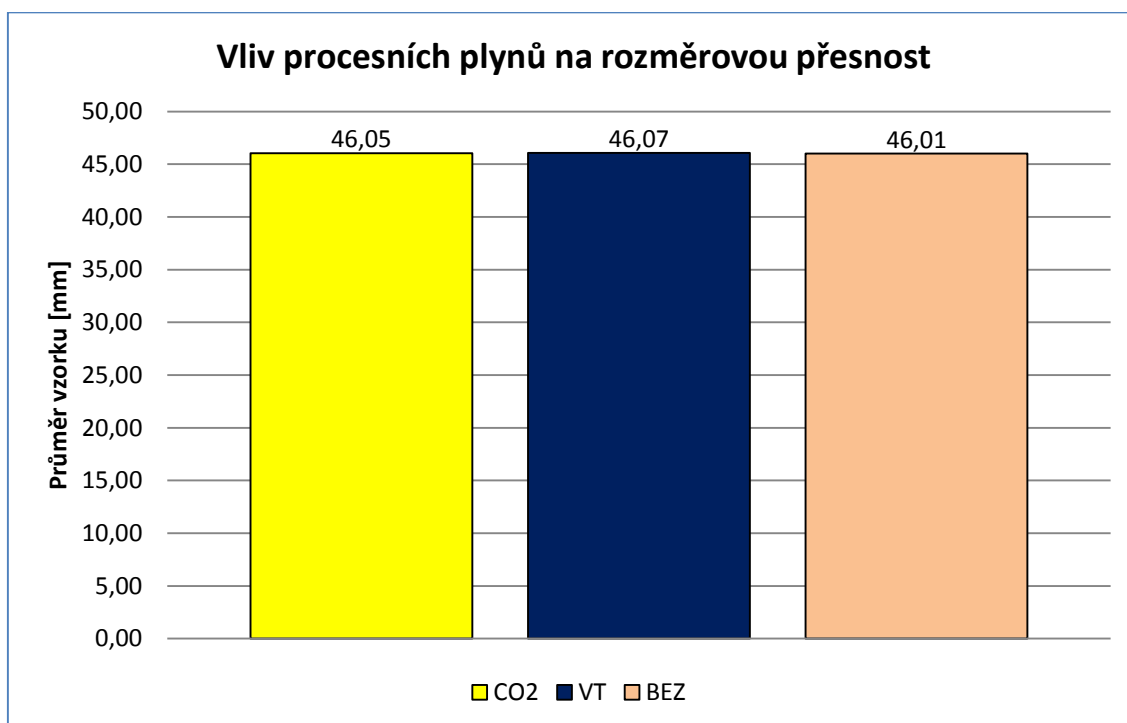
CO ₂						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	Průměrná hodnota
	46,05	46,05	46,04	46,03	46,06	46,05

Tab. 18.2 Průměrné hodnoty průměru soustruženého vzorku s použitím vírové trubice.

VÍROVÁ TRUBICE						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	Průměrná hodnota
	46,08	46,07	46,07	46,06	46,05	46,07

Tab. 18.3 Průměrné hodnoty průměru soustruženého vzorku bez chlazení.

BEZ CHLAZENÍ						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	Průměrná hodnota
	46,00	46,03	46,02	46,01	45,99	46,01



Graf 5 Vliv procesních plynů na rozměrovou přesnost při technologii soustružení.

Z výše uvedených údajů (viz. tabulka 18) a sestrojeného grafu 5 vyplývá, že nejnižších hodnot rozměrové přesnosti bylo dosaženo při obrábění bez procesního média. Horších výsledků se dosáhlo při použití plynného média. Z toho vyplývá, že ochlazování místa řezu má negativní vliv na rozměr výsledného obrobku po soustružení.

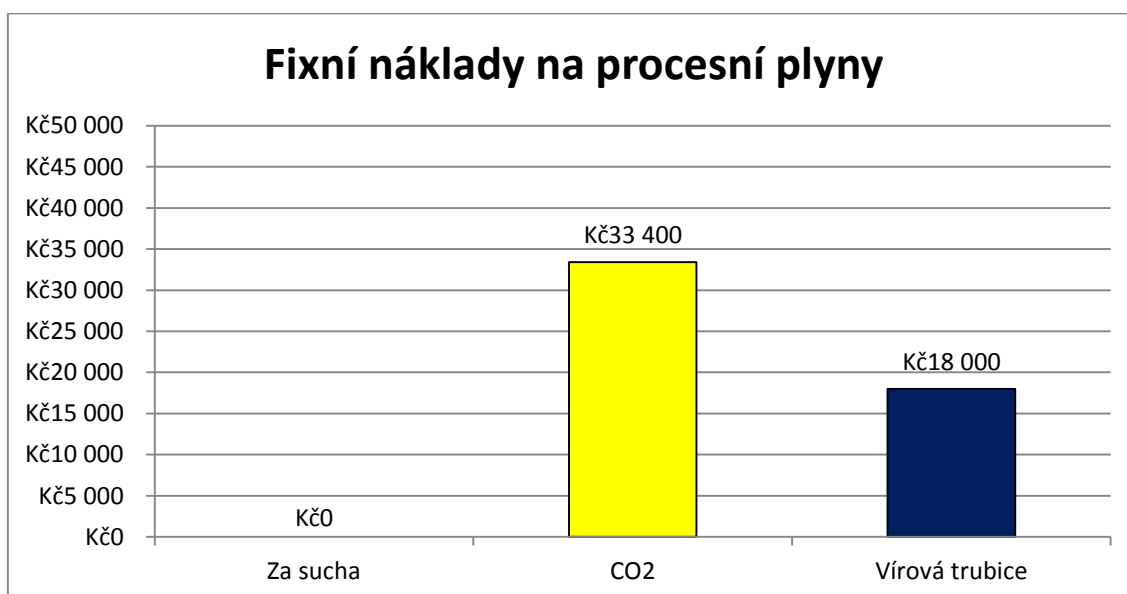
6. Ekonomické vyhodnocení účinnosti procesních plynů

Fixní náklady pro jednotlivá procesní prostředí

Pro CO₂ volíme dvě lahve, protože předpokládáme, že vždy jedna láhev se nechá doplnit a druhá láhev bude připravená k použití.

Tabulka 19 Fixní náklady pro jednotlivá procesní média.

Plynné prostředí	Fixní náklady pro plynná prostředí	
Bez chlazení	U tohoto procesního prostředí nejsou žádné fixní náklady.	
CO₂	Příslušenství	Cena
	Řídící aparatura + škrťací ventil + hadice držáku + odsávání	23 000 Kč
	2 x tlaková láhev 20 kg CO ₂	2 x 5 200 Kč = 10 400 Kč
	Celkové fixní náklady pro CO₂: 33 400 Kč	
Vírová trubice	Příslušenství	Cena
	Vírová trubice	11 000 Kč
	Kompresor	6 000 Kč
	Příslušenství (hadice, držáky)	1 000 Kč
	Celkové fixní náklady pro vírovou trubici: 18 000 Kč	



Graf 6 Porovnání fixních nákladů na jednotlivé procesní plyny.

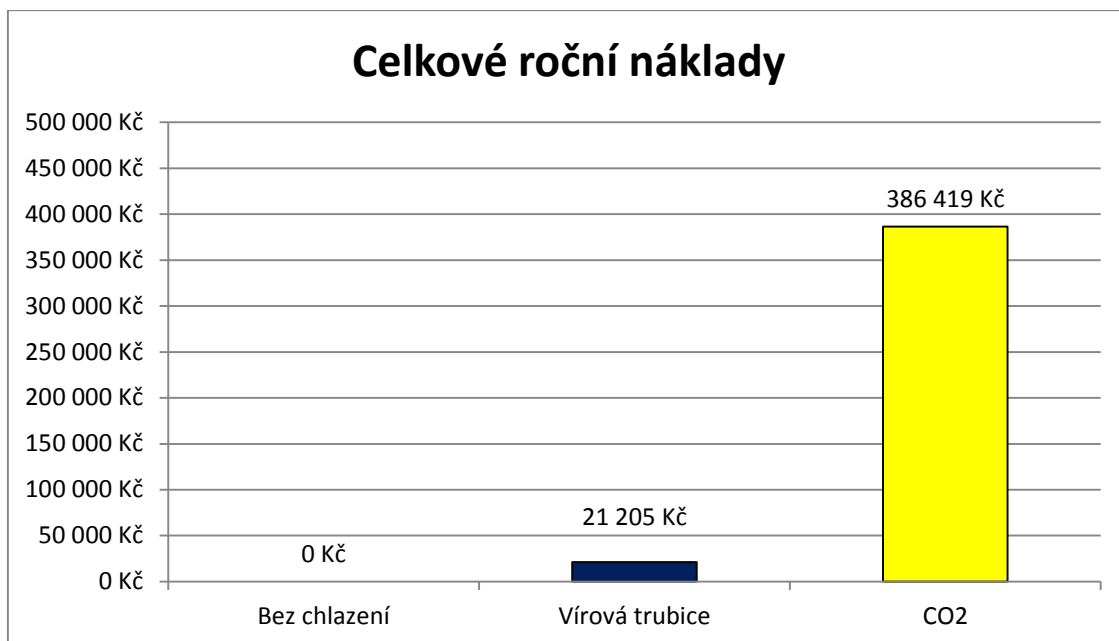
Celkové roční náklady pro jednotlivá procesní prostředí

Celkové roční náklady byly stanoveny za těchto podmínek:

- rok 2015 má 251 pracovních dnů a 2008 pracovních hodin (8. hod. směna),
- celková roční obrobená délka je stanovena z experimentu na 4381metru,
- průměrné množství CO₂ = 2,20 g/s,
- spotřeba CO₂ za rok je 15,80 T = 795 doplnění láhve za rok,
- doplnění láhve CO₂ pro 20kg = 480 Kč,
- elektřina – cena 1 kWh = 4,80 Kč,

Tabulka 20 Celkové roční náklady.

Plynné prostředí	Celkové roční náklady	
Bez chlazení	Toto procesní médium nevyžaduje roční náklady na provoz.	
Vírová trubice	Roční spotřeba	Cena
	Elektřina 2,2 kWh x 2008 pracovních hodin	21 205 Kč
	Celkové roční náklady pro vírovou trubici: 21 205 Kč	
CO₂	Roční spotřeba	Cena
	Elektřina 500 W x 2008 pracovních hodin	4 819 Kč
	Doplnění 20 kg láhve CO ₂ 795 x za rok	795 x 480 = 381 600 Kč
	Celkové roční náklady pro CO₂: 386 419 Kč	

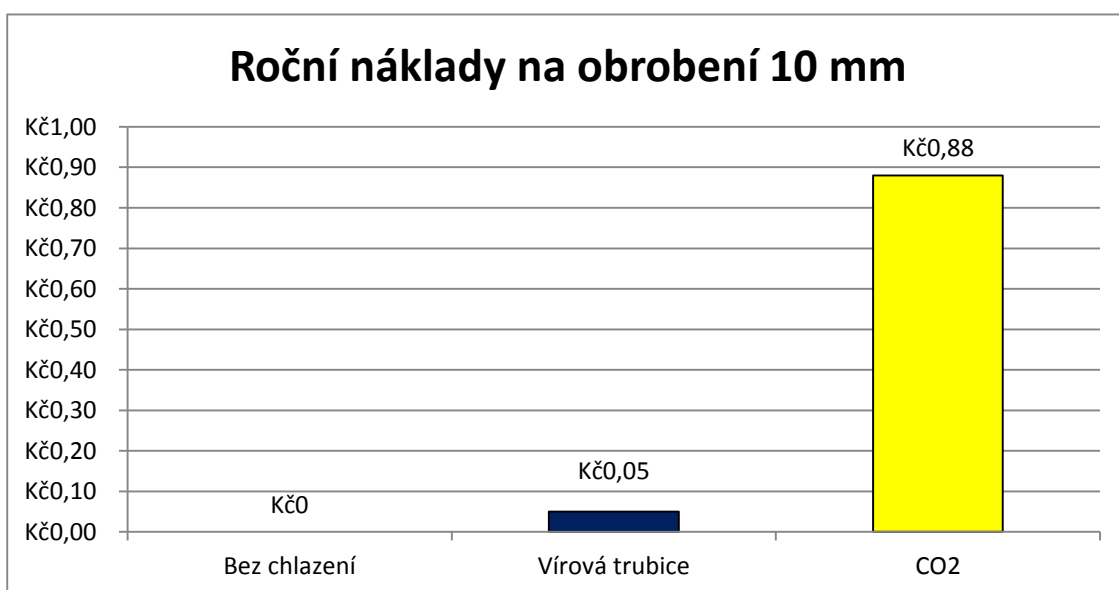


Graf 7 Celkové roční náklady na jednotlivé procesní plyny.

Roční náklady na obrobení délky 10 mm pro jednotlivá procesní média

Tabulka 21 Roční náklady na obrobení délky 10 mm.

Procesní prostředí	Roční náklady	Roční náklady na obrobení 10 mm
Bez chlazení		Bez nákladů
Vírová trubice	21 205 Kč	0,05 Kč na 10 mm
CO₂	386 419 Kč	0,88 Kč na 10 mm



Graf 8 Celkové roční náklady na jednotlivé procesní plyny.

Roční náklady na obrobení délky 10 mm pro sériovou výrobu

Pro sériovou výrobu předpokládáme 80 % celkové roční náklady, kde 20% připadá na technologické časy při zvoleném procesu obrábění (seřízení stroje, přeostření nástroje, výměny nástrojů a obrobků apod.). Celková obrobená délka za rok pro sériovou výrobu je 3504,80 m.

Tabulka 22 Roční náklady pro sériovou výrobu.

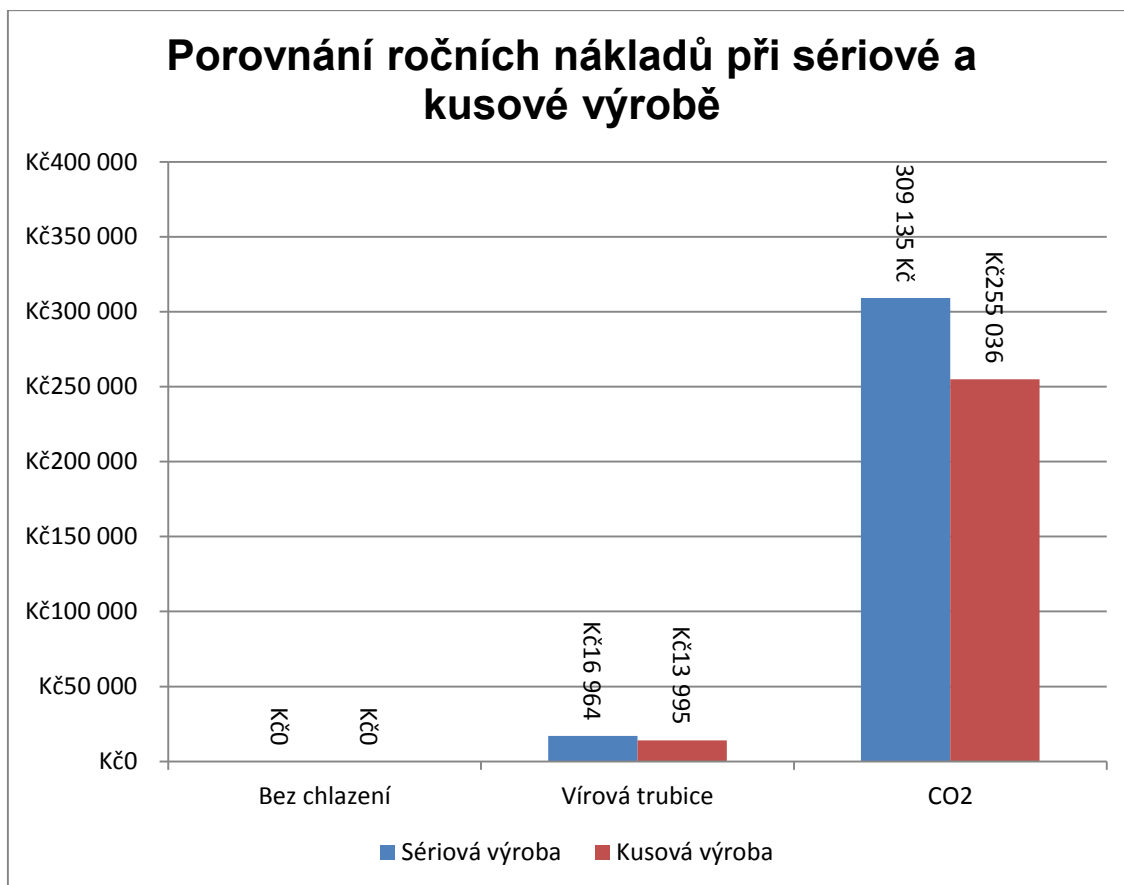
Náklady pro sériovou výrobu, předpoklad 20% ztrát		
Procesní prostředí	Roční náklady	Roční náklady na obrobení 10 mm
Bez chlazení	Bez nákladů	
Vírová trubice	16 964 Kč	0,04 Kč na 10 mm
CO₂	309 135 Kč	0,71 Kč na 10 mm

Roční náklady na obrobení délky 10 mm pro kusovou výrobu

Pro kusovou výrobu předpokládáme 66 % celkové roční náklady, kde 34 % připadá na technologické časy při zvoleném procesu obrábění (seřízení stroje, přeostření nástroje, výměny nástrojů a obrobků apod.). Celková obrobená délka za rok pro kusovou výrobu je 2891,46 m.

Tabulka 23 Roční náklady pro kusovou výrobu.

Náklady pro kusovou výrobu, předpoklad 34% ztrát		
Procesní prostředí	Roční náklady	Roční náklady na obrobení 10 mm
Bez chlazení	Bez nákladů	
Vírová trubice	13 995 Kč	0,03 Kč na 10 mm
CO₂	255 036 Kč	0,58 Kč na 10 mm



Graf 9 Porovnání ročních nákladů při sériové a kusové výrobě.

7. Diskuze dosažených výsledků chlazení plynou látkou na technologii soustružení

Hlavním cílem této bakalářské práce je výzkum využití technických plynů, jako procesního média, při technologii soustružení z hlediska strojního, fyzikálně-chemického, energetického, ekologického a ekonomického.

Pro tento účel byly zvoleny tři plynná média. Jednotlivá procesní média se mezi sebou porovnávala z hlediska působení sil, teplot, trvanlivosti, drsnosti povrchu a rozměrové přesnosti. Celý experiment probíhal za konstantních řezných podmínek, jak je uvedeno v předcházející kapitole této bakalářské práce (viz kapitola 4.1.2).

Jako plynné médium byl zvolen okolní vzduch (za sucha), vírová trubice a CO₂.

Hodnotícím kritériem pro porovnání procesních médií byly zvoleny tyto veličiny:

- velikosti složek řezných sil F_x , F_y , F_z ,
- teploty termočlánků T1, T2, T3,
- trvanlivost nástroje,
- parametry drsnosti povrchu R_a , R_z , R_t ,
- rozměrová přesnost.

V první fázi experimentu byl zkoumán vliv procesního média na velikosti složek sil F_x , F_y a F_z , současně byly při tomto experimentu měřeny velikosti teplot jednotlivých termočlánků T1, T2 a T3. Po vyhodnocení měření a zpracování dílčích výsledků v této etapě došlo k následujícím závěrům:

1) Při soustružení posuvem 0,05 mm/min., hloubce záběru 1,5 mm a otáčkách $n = 900$ ot/min nemá chlazení vírovou trubicí, CO₂ a bez použití plynu (za sucha) výrazný vliv na síly působící při tomto druhu obrábění.

2) Dále lze z naměřených výsledků usoudit, že při soustružení posuvem 0,05 mm/min., hloubce záběru 1,5 mm a otáčkách $n = 900$ ot/min chlazení procesními plyny má velmi pozitivní vliv na teplotu v místě kontaktu nástroje s obráběným materiálem. Z procesních plynů dosahuje největších změn teploty vírová trubice, u které dochází k plošnému chlazení, naopak u použití CO₂ dochází pouze k bodovému chlazení.

V druhé fázi experimentu byl zkoumán vliv procesního média na trvanlivost řezného nástroje. Po obrobení celkové dráhy 2000 mm, vyhodnocení měření a zpracování dílčích výsledků v této etapě došlo k následujícím závěrům:

- 1) Při soustružení posuvem 0,05 mm/min., hloubce záběru 1,5 mm a otáčkách $n = 900$ ot/min mají procesní plyny pozitivní vliv na trvanlivost řezného nástroje, protože dochází k podstatnému snížení opotřebení břitové destičky.
- 2) Dále je zřejmé, že čím je větší podchlazení, tím dochází k menšímu opotřebení destičky. Nejhorších výsledků trvanlivosti vykazuje obrábění za sucha, při kterém je až 50% nárůst opotřebení břitové destičky v porovnání s ostatními médii.

V následující třetí fázi experimentu byl zkoumán vliv procesního média na parametry drsnosti povrchu Ra, Rz a Rt. Po vyhodnocení měření a zpracování dílčích výsledků v této etapě došlo k následujícím závěrům:

- 1) Při soustružení posuvem 0,05 mm/min., hloubce záběru 1,5 mm a otáčkách $n = 900$ ot/min ochlazování místa řezu pomocí vírové trubice, CO₂ a bez použití plynu (za sucha) má sice minimální, ale negativní vliv na konečnou kvalitu obrobku.

V poslední fázi měření byl zkoumán vliv procesního média na rozměrovou přesnost. Po vyhodnocení měření a zpracování dílčích výsledků v této etapě došlo k následujícím závěrům:

- 1) Při soustružení posuvem 0,05 mm/min., hloubce záběru 1,5 mm a otáčkách $n = 900$ ot/min ochlazování místa řezu pomocí procesních plynů má negativní vliv na rozměr výsledného obrobku.
- 2) Při porovnání procesních plynů žádný procesní plyn nevykazuje vysoké zvýšení, nebo snížení hodnot rozměrové přesnosti. Z celkového porovnání jednotlivých procesních plynů vykazují takřka srovnatelné hodnoty, nedá se tedy určit, při kterém způsobu chlazení bylo dosaženo lepších či horších výsledků rozměrové přesnosti.

Z celkového hodnocení procesních médií lze usoudit, že procesní plyny postrádají některé účinky. Zejména procesním plynům chybí lepší mazací účinek. Dále při použití CO₂ dochází pouze k bodovému chlazení, tedy nedochází k ochlazování v celé ploše nástroje, což může vést ke zhoršení některých posuzovaných parametrů, zejména teploty. Při použití vírové trubice

oproti CO₂ dochází k plošnému chlazení, kdy je nástroj ochlazován v celé ploše. Dále je nutné brát v úvahu to, že při použití vírové trubice dochází k částečnému mazacímu účinku v důsledku přívodu vzduchu kompresorem, kde na sebe vzduch váže malé množství oleje, který je potřebný ke správné funkci kompresoru.

V další části experimentu bylo nutné porovnat procení plyny z hlediska ekonomického a ekologického. V této části byly porovnány vstupní investice na pořízení potřebného vybavení a provoz zařízení vztažený na jeden pracovní rok, dále byly porovnány náklady na roční provoz pro sériovou a kusovou výrobu. Z ekologického hlediska se porovnávala spotřeba plynů, dopad na životní prostředí a likvidace použitých plynů.

Z ekonomického hlediska byly hodnoceny tyto parametry:

- fixní náklady na aparaturu a příslušenství,
- celkové roční náklady,
- roční náklady vztažené na obrobení délky 10 mm,
- porovnání nákladů pro sériovou a kusovou výrobu.

Po vyhodnocení a zpracování ekonomického hlediska, se v této etapě došlo k následujícím závěrům:

- 1) Jako nejdražší a ekonomicky nevýhodné plynné médium se jeví CO₂. Především cena média a nemožnost zachycení.
- 2) Obrábění za sucha je ekonomicky nejvýhodnější, protože není potřeba žádná aparatura a plyn. Obrábění probíhá pouze při okolním prostředí.
- 3) Obrábění za pomoci vírové trubice je po okolním vzduchu ekonomicky nejméně náročné, protože pro tento proces postačí kompresor a aparatura pro přívod, tedy odpadají náklady spojené s doplňováním plynu.

Z celkového ekonomického vyhodnocení je obrábění s použitím procesních plynů poměrně drahá operace, např. při použití CO₂, kdy jsou sumy velmi vysoké, musí se tedy vhodně zvážit, zda je tato technologie potřebná a nedá se nahradit jinou levnější metodou.

8. Závěr

Bakalářská práce se zabývá problematikou účinku procesních plynů na technologii soustružení a kvalitou obrobených součástí. Jako procesní plyny byly použity oxid uhličitý, podchlazený vzduch a obrábění za sucha.

Hlavním cílem této práce je výzkum využití technických plynů jako procesního média při technologii soustružení z hlediska strojního, fyzikálně-chemického, energetického, ekologického a ekonomického.

Bakalářská práce je součástí výzkumu realizovaného v rámci projektu TA03010492 - Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů (2013-2015, TA0/TA), jehož poskytovatelem je Technologická agentura České republiky.

Samotná problematika řeší vliv procesních plynů na velikosti sil, vliv na teplotu, trvanlivost, kvalitu povrchové vrstvy a rozměrovou přesnost při technologii soustružení.

Bakalářská práce je rozdělena do několika částí. Jako první je úvod, dále následuje teoretická část, vlastní metodika experimentu, experimentální část, ekonomické vyhodnocení, diskuze a závěr.

V rámci teoretické části této bakalářské práce je popsána problematika soustružení, ve které jsou popsány nástroje, jejich rozdělení a konstrukce, síly a řezné podmínky při soustružení. Teoretická část dále popisuje tepelnou bilanci a teplotu při obrábění, použité procesní plyny - oxid uhličitý, vírová trubice, obrábění bez chlazení.

Metodika experimentu popisuje použité procesní prostředí, řezné podmínky pro experimentální měření, vlastní metodiku experimentu a měřené parametry. Dále jsou v této kapitole popsány použité stroje, nástroje a měřicí přístroje.

Při výzkumu bylo zjištěno následující:

Řezná síla

Použité plyny jako procesní média při technologii soustružení nemají žádný vliv na pokles řezné síly. Velikost řezných sil je poměrně velká, protože procesní plyny nemají žádný mazací účinek, který dokáže velikost řezných sil snížit.

Teplota

Při použití oxidu uhličitého dochází pouze k bodovému chlazení, a tudíž dochází ke zvýšení teplot. Na rozdíl od chlazení pomocí vírové trubice, kde dochází k plošnému chlazení, což vede k celkovému snížení teplot jednotlivých termočlánků. Při soustružení bez chlazení se dosahuje velkých teplot, protože k chlazení dochází pouze okolním vzduchem s malým chladícím účinkem.

Trvanlivost

Procesní plyny mají pozitivní vliv na trvanlivost řezného nástroje při soustružení, protože dochází k podstatnému snížení opotřebení břitové destičky. Dále je zřejmé, že čím větší chladící účinek, tím dojde ke zvýšení trvanlivosti řezného nástroje. Při obrábění za sucha dochází k velkému opotřebení řezného nástroje. V porovnání s procesními plyny je nárůst opotřebení břitové destičky až o 50 %.

Drsnost povrchu

Procesní plyny nemají téměř žádný mazací účinek, proto mají negativní vliv na konečnou kvalitu obrobene plochy. Při použití vírové trubice dochází k částečnému mazacímu účinku a tím ke snížení drsnosti povrchu, v důsledku průchodu vzduchu kompresorem, kde na sebe vzduch váže malé množství oleje, který je potřebný ke správné funkci kompresoru.

Rozměrová přesnost

Nejlepších hodnot u rozměrové přesnosti se dosahovalo při obrábění za sucha. Při ochlazování místa řezu pomocí oxidu uhličitého a vírové trubice se dosáhlo mírně horších výsledků. Z toho vyplývá, že ochlazování místa řezu má negativní vliv na rozměr výsledného obrobku po soustružení.

Tabulka 24 Celkové porovnání měřených parametrů pro jednotlivá procesní média.

	Řezná síla Fz [N]	Termočlánek T1 [°C]	Opotřebení [mm]	Ra	Rozměrová přesnost [mm]
CO₂	196,50	61,18	0,12	2,33	46,05
Vírová trubice	190,50	59,04	0,14	2,16	46,07
Bez chlazení	191,50	81,66	0,24	2,29	46,01

Z ekonomického hlediska byly vyvozeny následující závěry:

Fixní náklady

Pro obrábění za sucha nejsou stanoveny žádné fixní náklady, protože pro toto médium není potřeba žádná aparatura. Při použití CO₂ se fixní náklady pohybují kolem 33 400 Kč za aparaturu a příslušenství. Vírová trubice má náklady na aparaturu a příslušenství 18 000 Kč.

Roční náklady

Největší roční náklady vykazuje CO₂, u kterého byly roční náklady stanoveny na 386 419 Kč, což je 0,88 Kč za 10 mm obrobené délky. Při použití vírové trubice celkové roční náklady byly stanoveny na 21 205 Kč, což je 0,05 Kč za 10 mm obrobené délky. Jako ekonomicky nejvýhodnější médium je opět obrábění za sucha, kdy byly stanoveny nulové roční náklady. V tabulce 25 jsou uvedeny pro zřehlednění fixní a roční náklady pro jednotlivá procesní média.

Tabulka 25 Porovnání nákladů pro jednotlivá plynná prostředí.

Procesní prostředí	Fixní náklady	Celkové roční náklady	Roční náklady na obrobení délky 10 mm
Bez chlazení	Bez nákladů	Bez nákladů	Bez nákladů
Vírová trubice	18 000 Kč	21 205 Kč	0,05 Kč / 10 mm
CO₂	33 400 Kč	386 419 Kč	0,88 Kč / 10 mm

V tabulce 26 jsou uvedeny hodnoty pro porovnání sériové a kusové výroby.

Tabulka 26 Porovnání nákladů pro sériovou a kusovou výrobu.

Procesní prostředí	Sériová výroba		Kusová výroba	
	Roční náklady	Roční náklady na obrobení délky 10 mm	Roční náklady	Roční náklady na obrobení délky 10 mm
Bez chlazení	Bez nákladů	Bez nákladů	Bez nákladů	Bez nákladů
Vírová trubice	16 964 Kč	0,04 Kč / 10 mm	13 995 Kč	0,03 Kč / 10 mm
CO₂	309 135 Kč	0,71 Kč / 10 mm	255 036 Kč	0,58 Kč / 10 mm

Seznam použité literatury:

- [1] DRÁB, V. Technologie I.: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1985. 295 s. ISBN-
- [2] MÁDL, J., BARCAL, J., Základy technologie II, České vysoké učení technické v Praze, 2008. 55 s.
- [3] Podklady pro výuku předmětu TECHNOLOGIE III - OBRÁBĚNÍ [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, katedra obrábění a montáže, březen 2001. [cit. 28. listopadu 2009]. Dostupné na: <http://www.kom.tul.cz>
- [4] BUMBÁLEK, B., OŠTÁDAL, B., ŠAFR, E. *Řezné kapaliny*. 1. vyd. Praha: SNTL- Nakladatelství technické literatury, 1963. 136 s. ISBN-
- [5] PRÁŠIL, T. *Přimazávání olejovou mlhou* . [online]. Praha: MM Publishing, s. r. o., červenec 2008. Dostupné na: <http://www.mmspektrum.com/clanek/primazavani-olejovou-mlhou>.
- [6] KOČMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. Technologie obrábění. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s. r. o. Brno, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0
- [7] KOČMAN, Karel. Speciální technologie. Obrábění. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s. r. o. Brno, 2004. 227 s. ISBN 80-214-2562-8
- [8] BUMBÁLEK, Bohumil. Obrábění s chlazením nebo za sucha?. Ekologie obrábění. Brno : 2000. 91 s. ISBN 80-7044-232-88. SOUKUP, Milan. Využití technické tribodiagnostiky v praxi
- [9] MUSIALIK, J.: The easurement of temperature at the tool - workpiece interface during electromechanical working. In: 2. Medzinárodná konferencia Rozvoj technológie obrábania RTO 98, TU Košice 1. a 2. Júl 1998, s. PL103-PL108.
- [10] DVOŘÁČKOVÁ, Š., J. KARÁSEK a M. LEDVINA. *Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů. Etapa 1 – „Výzkum chlazení u technologických procesů“*. Liberec: TAČR - TA03010492, Tu v Liberci, 2013, 35 s.

[11] DVOŘÁČKOVÁ, Š., J. KARÁSEK a M. LEDVINA. *Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů. Etapa 2 – „Aplikovaný výzkum vlivů inovativního chlazení na technologické procesy“*. Liberec: TAČR - TA03010492, Tu v Liberci, 2014, 41 s.

SEZNAM OBRÁZKU

Obrázek 1.1 Monolitní nůž [2]	12
Obrázek 1.2 Nůž s pájenou destičkou [2].....	12
Obrázek 1.3 Nůž s výměnnou břitovou destičkou [2]	12
Obrázek 2 Rozdělení soustružnických nožů dle druhu práce pro kterou jsou určeny [3]	13
Obrázek 3 Části soustružnického nože [3].....	14
Obrázek 4 Geometrie soustružnického nože [3]	15
Obrázek 5 Rozklad sil na břitu soustružnického nože [3].....	16
Obrázek 6 Schéma pro výpočet strojního času [2].....	20
Obrázek 7 Vznik tepla a odvod tepla při soustružení [3]	23
Obrázek 8 Zařízení Cold Air Gun	26
Obrázek 9 Příprava vzorku	30
Obrázek 10 Izolace pro upnutí do sklíčidla	31
Obrázek 11 Izolace pro upnutí pomocí koníka	31
Obrázek 12 Soustruh SU50	32
Obrázek 13 Ubírací stranový soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou.....	33
Obrázek 14 Vyměnitelná břitová destička TPUN 160308 [10]	34
Obrázek 15 Nábojový zesilovač, typ 5019B	34
Obrázek 16 Piezoelektrický dynamometr KISTLER 9265B	34
Obrázek 17 Termočlánek stabilně zabudovaný na vyměnitelné břitové destičce.....	34
Obrázek 18 Umělý termočlánek pro soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou.....	36
Obrázek 19 Kondenzátorová svářečka	37
Obrázek 20 Laboratorní profiloměr MITUTOYO Surfrest SV2000N2	38
Obrázek 21 Mikroskop ZEISS	39
Obrázek 22 Vzorový průběh řezných sil při technologii soustružení	39
Obrázek 23 Vzorový průběh měření teploty	39
Obrázek 24 Vzorový průběh opotřebení břitové destičky při technologii soustružení	41
Obrázek 25 Místa měření drsnosti povrchu soustruženého vzorku	42
Obrázek 26 Vzorový výstup z programu Surfpak při technologii soustružení	42
Obrázek 27 Místa měření průměru vysoustruženého obrobku.....	43
Obrázek 28 Měření rozměrové přesnosti pomocí ručního mikrometru.....	43

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Hloubka záběru při různých operacích	18
Tabulka 2	Velikost posuvu při různých operacích	19
Tabulka 3	Řezná rychlost při různých operacích a různých materiálech	19
Tabulka 4	Orientační hodnoty drsnosti povrchu a přesnosti rozměrů	23
Tabulka 5	Řezné podmínky pro soustružení	29
Tabulka 6	Základní parametry experimentu	30
Tabulka 7	Základní parametry soustruhu SU50	32
Tabulka 8	Parametry soustružnického nože.	33
Tabulka 9	Obvykle používané kombinace umělých termočlánků a jejich vlastností	36
Tabulka 30	Vzorové naměřené hodnoty řezných sil při technologii soustružení	39
Tabulka 11	Vzorové hodnoty teplot v místech jednotlivých termočlánků při technologii soustružení	40
Tabulka 12	Vzorové hodnoty opotřebení břitové destičky při technologii soustružení	41
Tabulka 13	Vzorové hodnoty parametrů drsnosti povrchu při technologii soustružení	42
Tabulka 14.1	Průměrné hodnoty jednotlivých složek působících sil s použitím CO ₂ trubice	44
Tabulka 14.2	Průměrné hodnoty jednotlivých složek působících sil s použitím vírové.	45
Tabulka 14.3	Průměrné hodnoty jednotlivých složek působících sil bez chlazení.....	45
Tabulka 15.1	Průměrné hodnoty teplot jednotlivých termočlánků s použitím CO ₂	46
Tabulka 15.2	Průměrné hodnoty teplot jednotlivých termočlánků s použitím vírové trubice	46
Tabulka 15.3	Průměrné hodnoty teplot jednotlivých termočlánků bez chlazení	46
Tabulka 16.1	Průměrné hodnoty opotřebení břitu nástroje s použitím CO ₂	48
Tabulka 16.2	Průměrné hodnoty opotřebení břitu nástroje s použitím vírové trubice	48
Tabulka 16.3	Průměrné hodnoty opotřebení břitu nástroje bez chlazení	48
Tabulka 17.1	Průměrné hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti soustruženého vzorku s použitím CO ₂	50
Tabulka 17.2	Průměrné hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti soustruženého vzorku s použitím vírové trubice.....	50
Tabulka 17.3	Průměrné hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti soustruženého vzorku bez chlazení	50

Tabulka 18.1 Průměrné hodnoty průměru soustruženého vzorku s použitím CO ₂	51
Tabulka 18.2 Průměrné hodnoty průměru soustruženého vzorku s použitím vírové trubice	52
Tabulka 18.3 Průměrné hodnoty průměru soustruženého vzorku bez chlazení	52
Tabulka 19 Fixní náklady pro jednotlivá procesní média.....	53
Tabulka 20 Celkové roční náklady	54
Tabulka 21 Roční náklady na obrobení délky 10 mm	55
Tabulka 22 Roční náklady pro sériovou výrobu	56
Tabulka 23 Roční náklady pro kusovou výrobu.....	57
Tabulka 44 Celkové porovnání měřených parametrů pro jednotlivá procesní média	62
Tabulka 25 Porovnání nákladů pro jednotlivá plynná prostředí.....	63
Tabulka 26 Porovnání nákladů pro sériovou a kusovou výrobu	63

SEZNAM GRAFU

Graf 1 Vliv procesních plynů na složky působících sil při technologii soustružení	45
Graf 2 Vliv procesních plynů na teplotu při technologii soustružení	47
Graf 3 Vliv procesních plynů na trvanlivost břítu nástroje při technologii soustružení	49
Graf 4 Vliv procesních plynů na parametry drsnosti povrchu při technologii soustružení	51
Graf 5 Vliv procesních plynů na rozměrovou přesnost při technologii soustružení	52
Graf 6 Porovnání fixních nákladů na jednotlivé procesní plyny	53
Graf 7 Celkové roční náklady na jednotlivé procesní plyny	55
Graf 8 Celkové roční náklady na jednotlivé procesní plyny	55
Graf 9 Porovnání ročních nákladů při sériové a kusové výrobě	57

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A - Použitý materiál.....	1
Příloha B - Grafy průběhů složek sil pro jednotlivá procesní prostředí.....	2
Příloha C - Grafy průběhů teplot termočlánků pro jednotlivá procesní prostředí	7
Příloha D - Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu pro jednotlivá procesní prostředí	15
Příloha E - Naměřené hodnoty rozměrové přesnosti pro jednotlivá procesní prostředí.....	17

PŘÍLOHY

Příloha A - Použitý materiál

Použitý materiál:

Pro provedení experimentu byla zvolena konstrukční ocel třídy 12 050.1. Vlastnosti a použití této oceli jsou uvedeny v následujícím textu této bakalářské práce.

Vlastnosti:

Ocel 12 050.1 patří mezi ocel nelegovanou k zušlechťování a povrchovému kalení. Doplnkové číslo značí stav oceli v závislosti na tepelném zpracování, kde konkrétně číslice 1 - normalizační žíhání. Pevnost v tahu $R_m = \text{min. } 540 \text{ [MPa]}$. Mez kluzu $R_{p0,2} = \text{min. } 325 \text{ [MPa]}$. Chemické složení této oceli zobrazuje tabulka 1.

Přílohy - Tab. 1 Chemické složení oceli 12 050.1 v %.

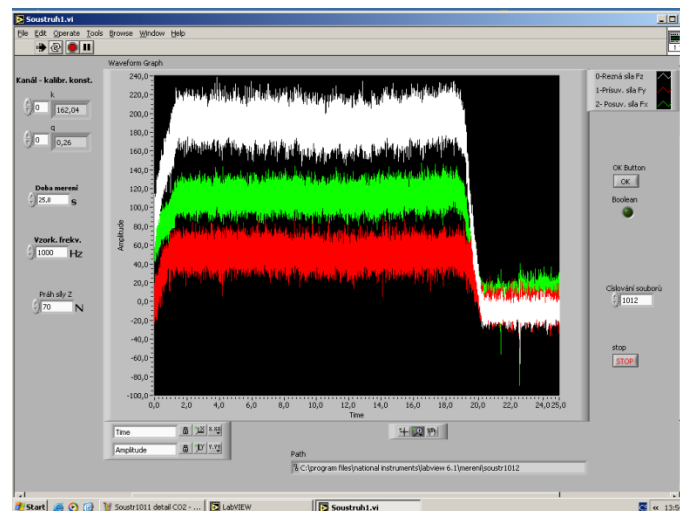
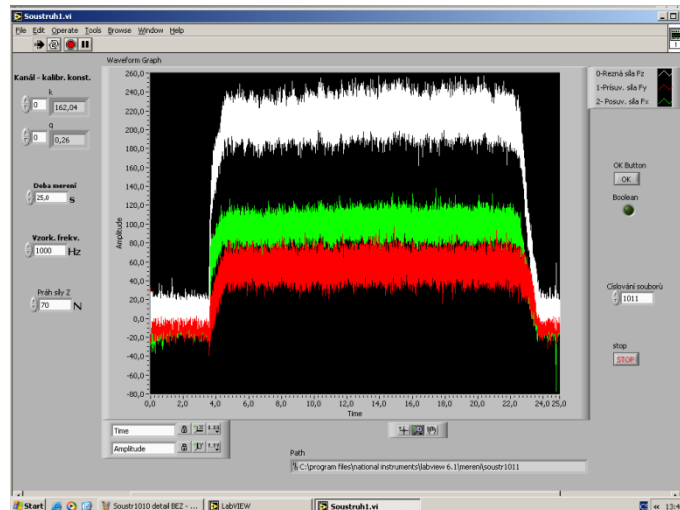
Značka	Chemické složení							
	C	Mn	Si	Cr _{max.}	Cu _{max.}	Ni _{max.}	P _{max.}	S _{max.}
12 050	0,42-0,50	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	0,30	0,30	0,04	0,04

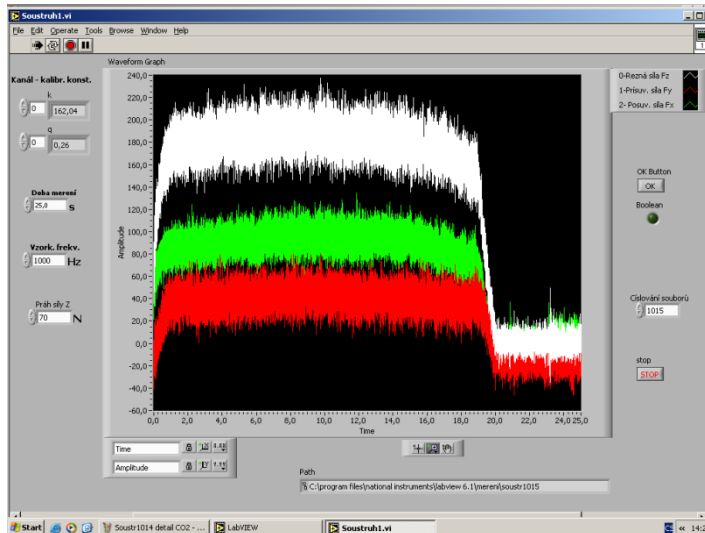
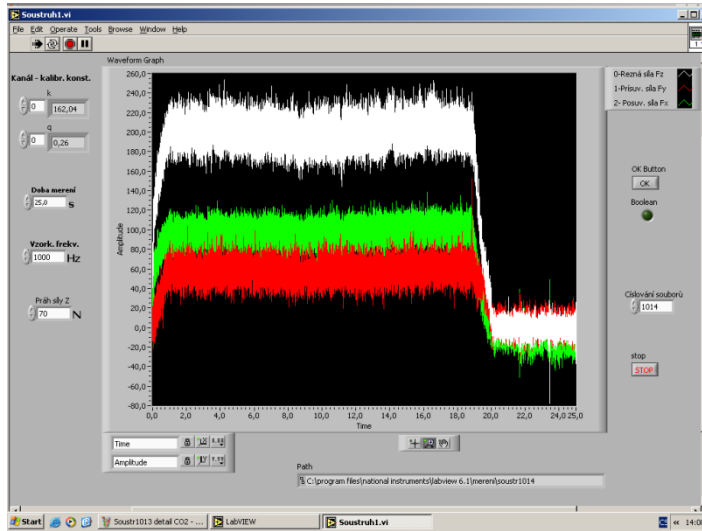
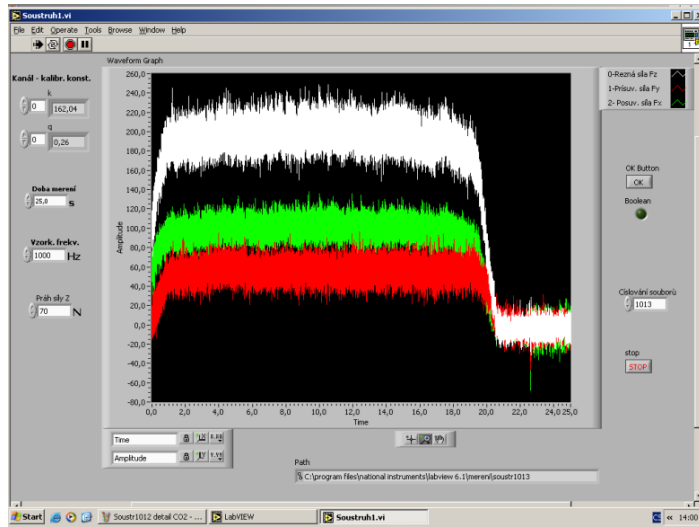
Použití:

Ocel třídy 12 050.1 je vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení. Používá se na hřídele turbokompresorů, čerpadel, těžních strojů, elektromotorů a dynam. Pro výrobu větších ozubených kol a šneků. Dále se používá v automobilovém průmyslu pro výrobu klikových hřídelí, ojnic, závěsů pružin a čepů.

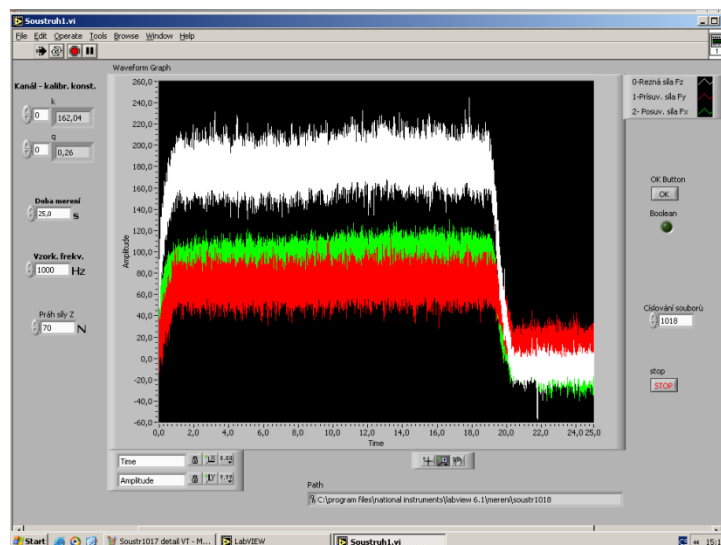
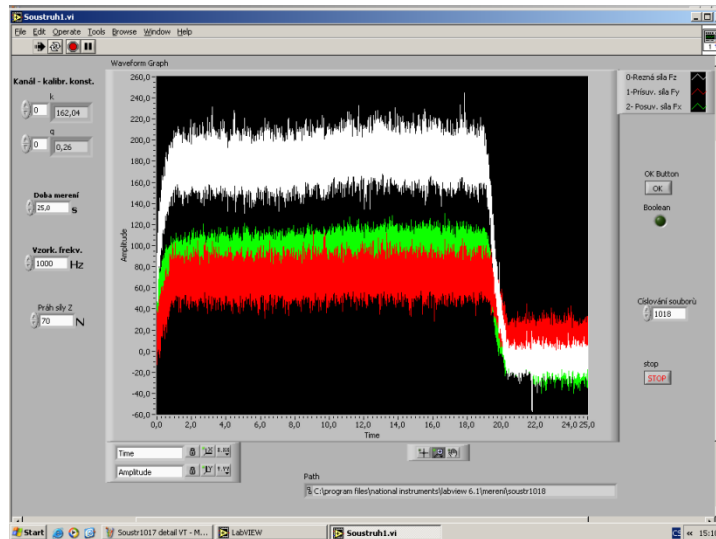
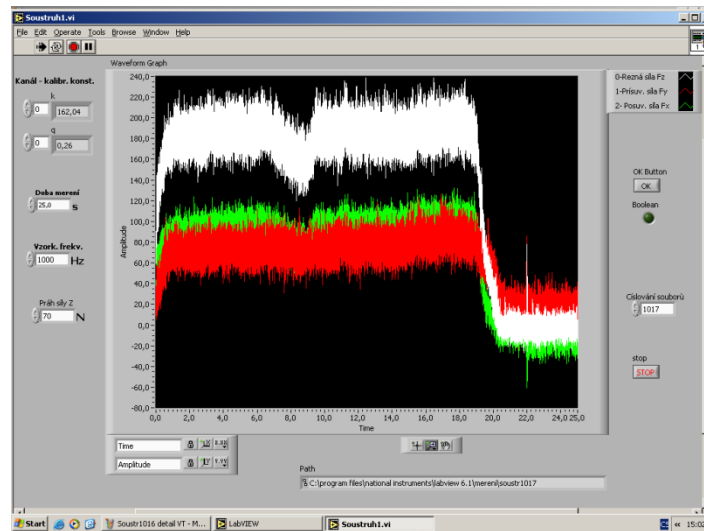
Příloha B - Grafy průběhů složek sil pro jednotlivá procesní prostředí

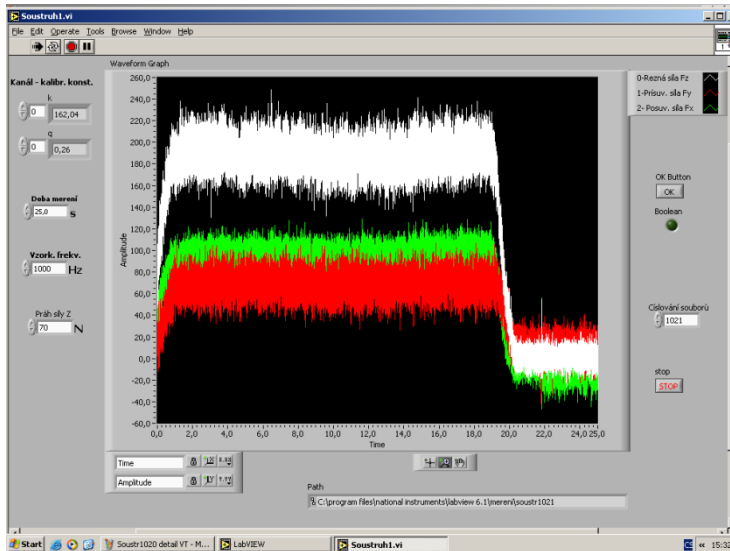
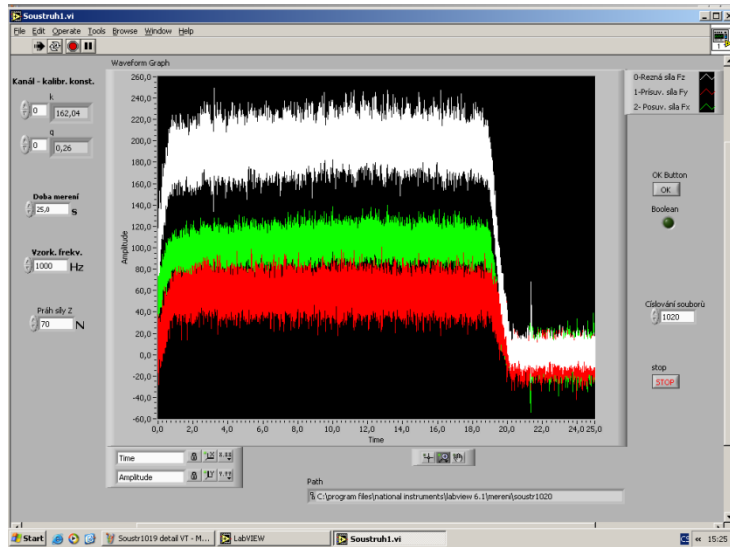
Naměřené průběhy složek sil pro oxid uhličitý



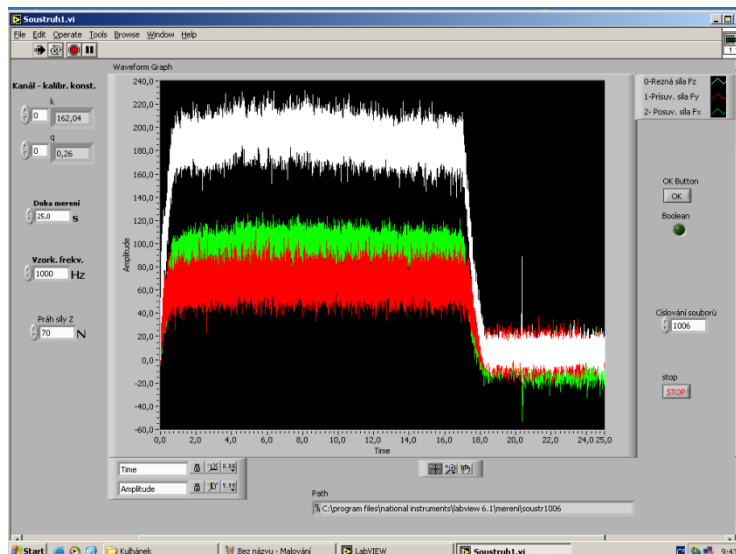


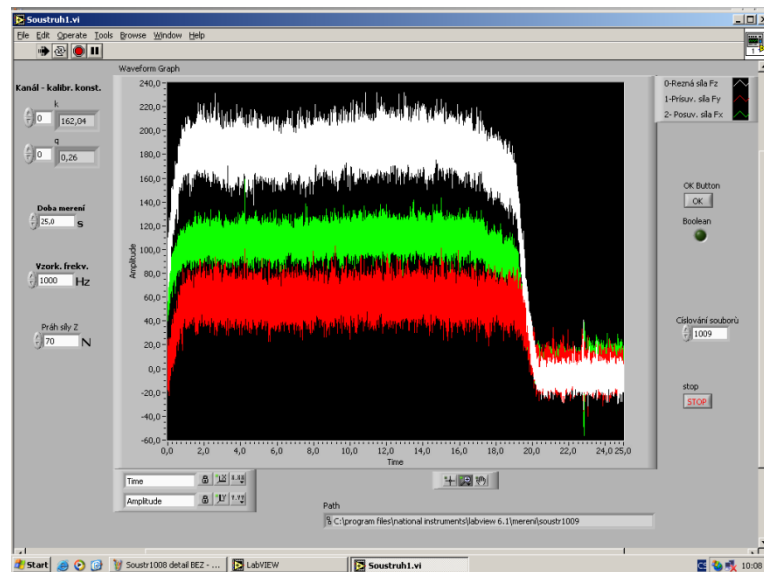
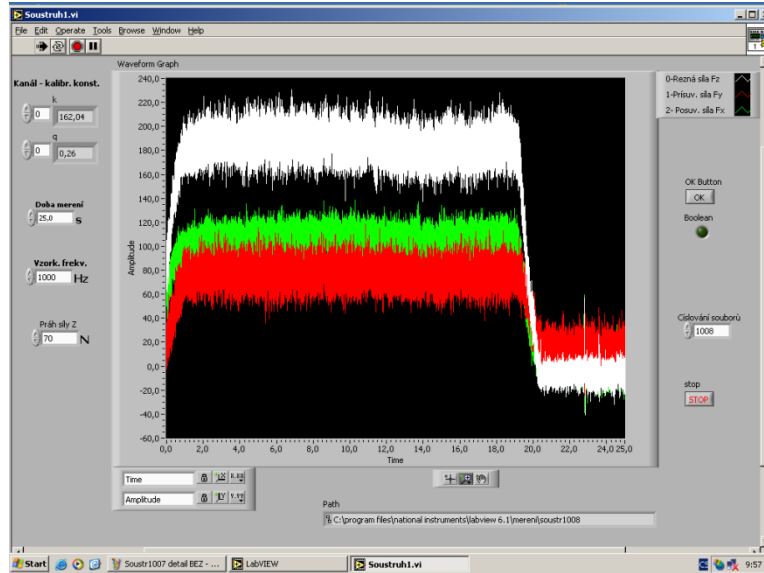
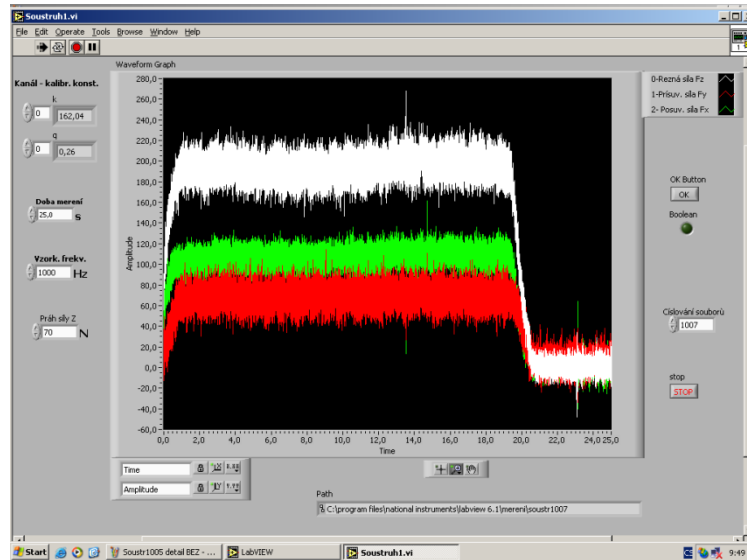
Naměřené průběhy složek sil pro vírovou trubici

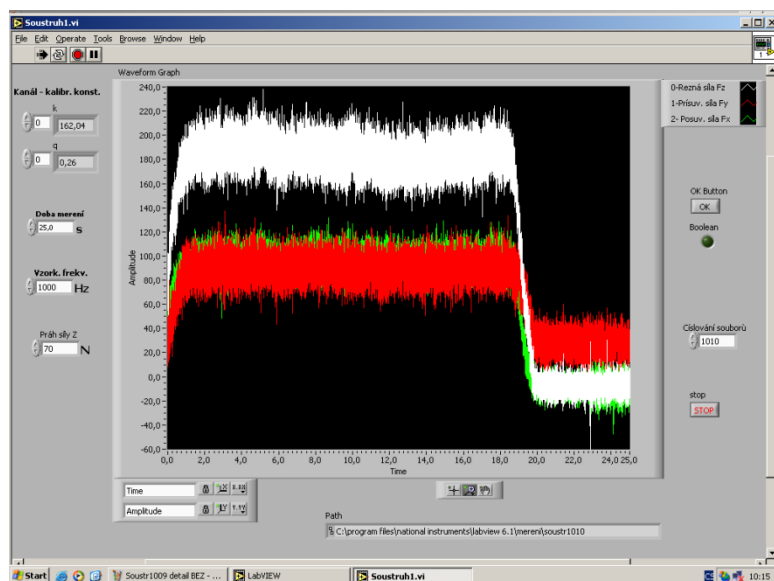




Naměřené průběhy složek sil pro obrábění bez chlazení

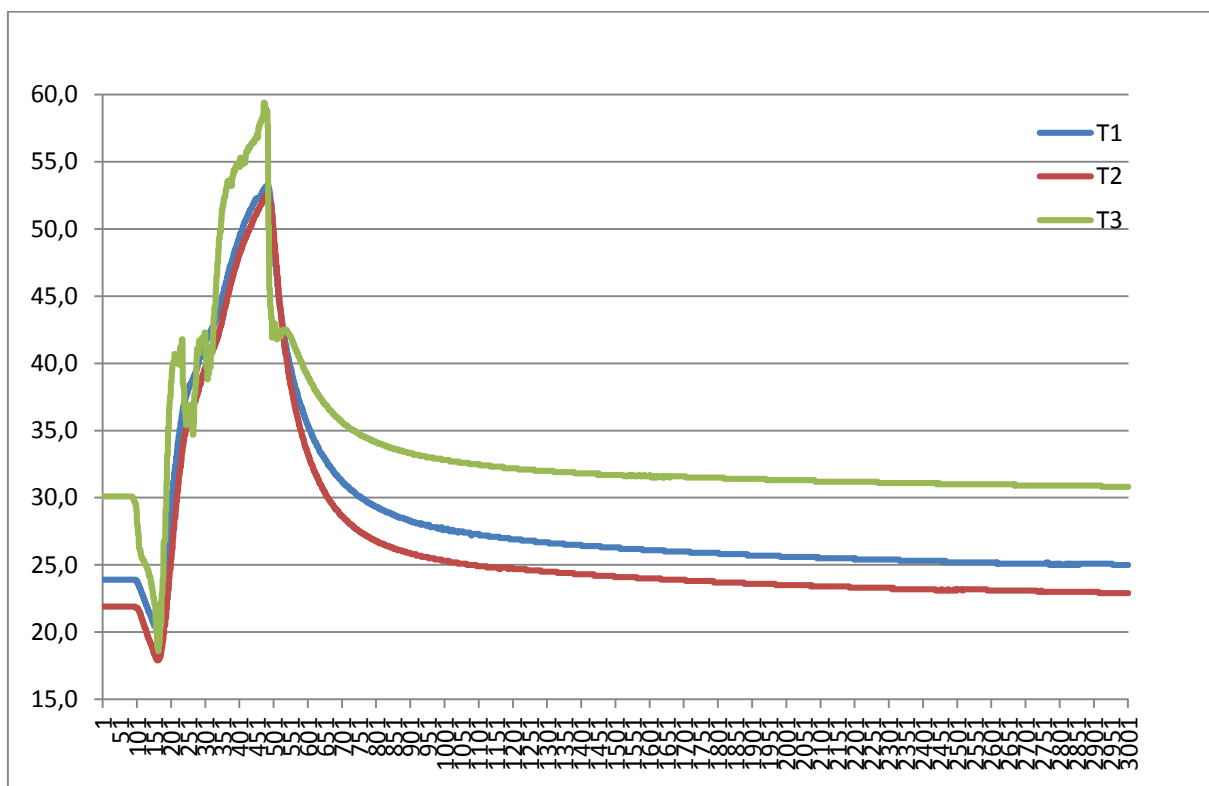


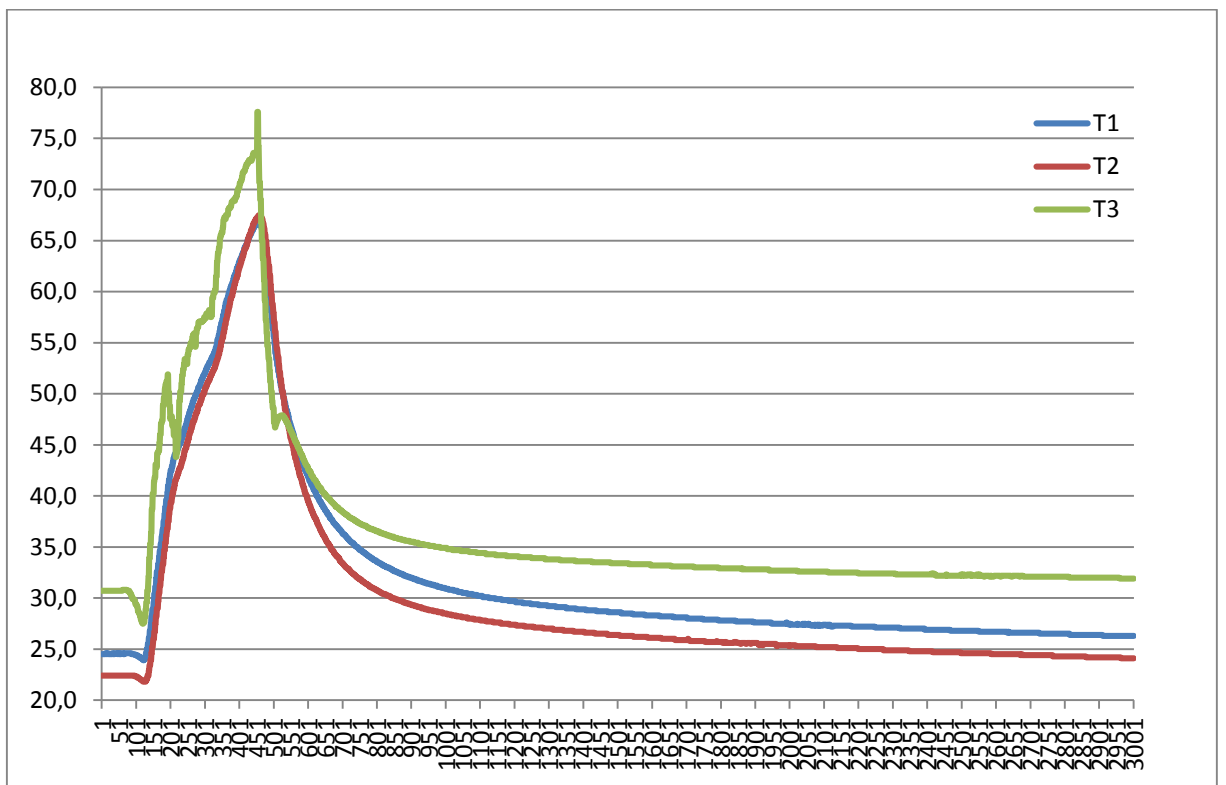
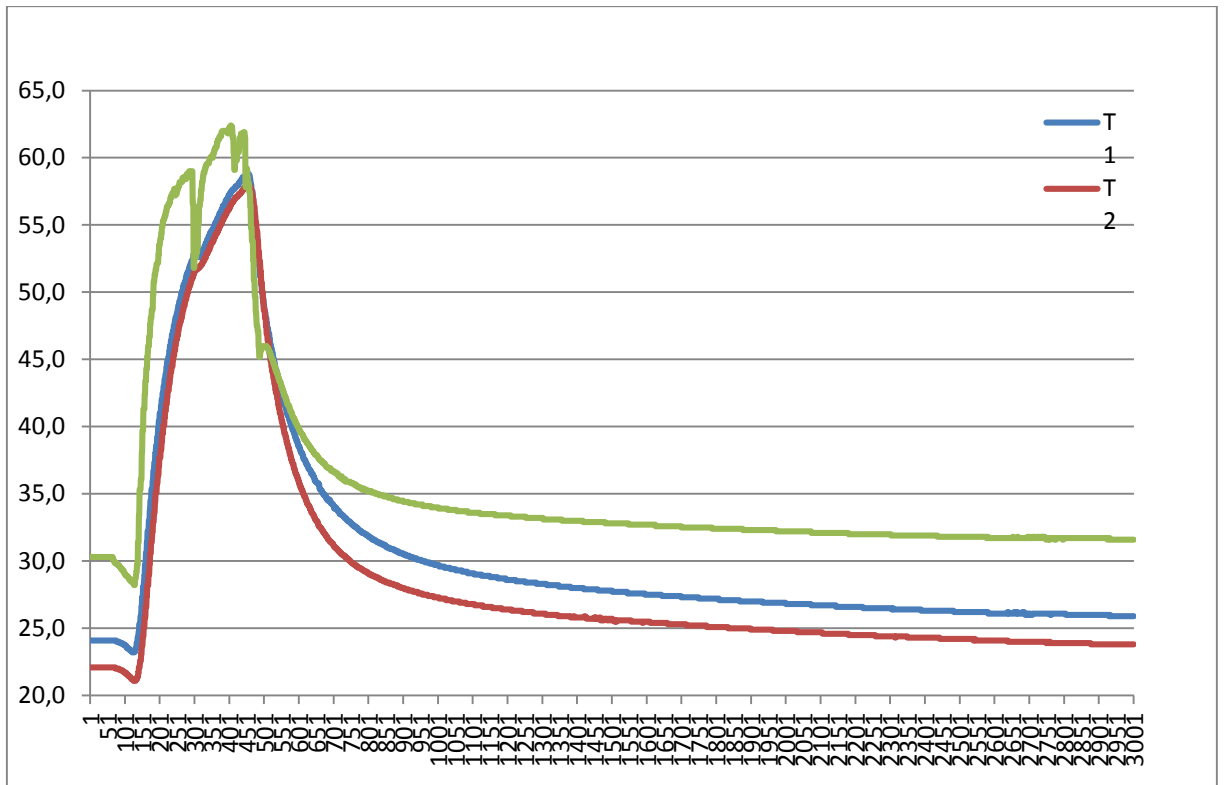


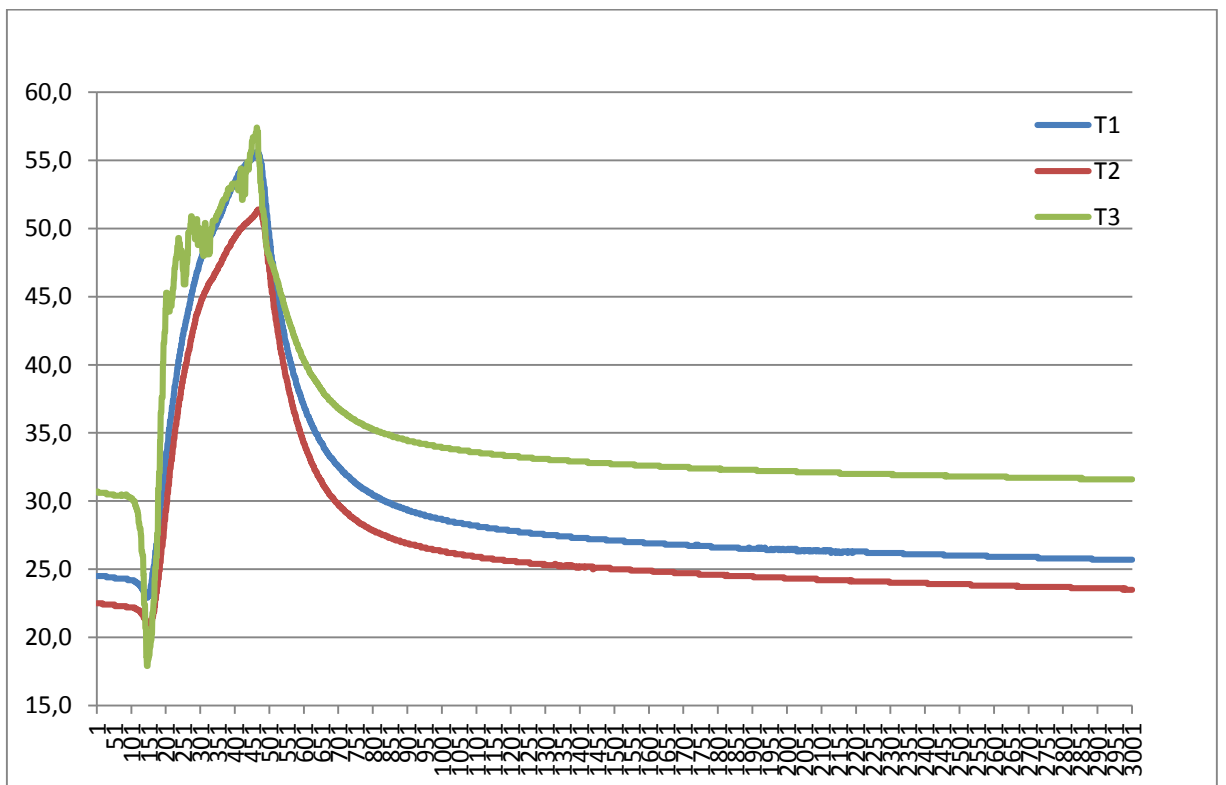
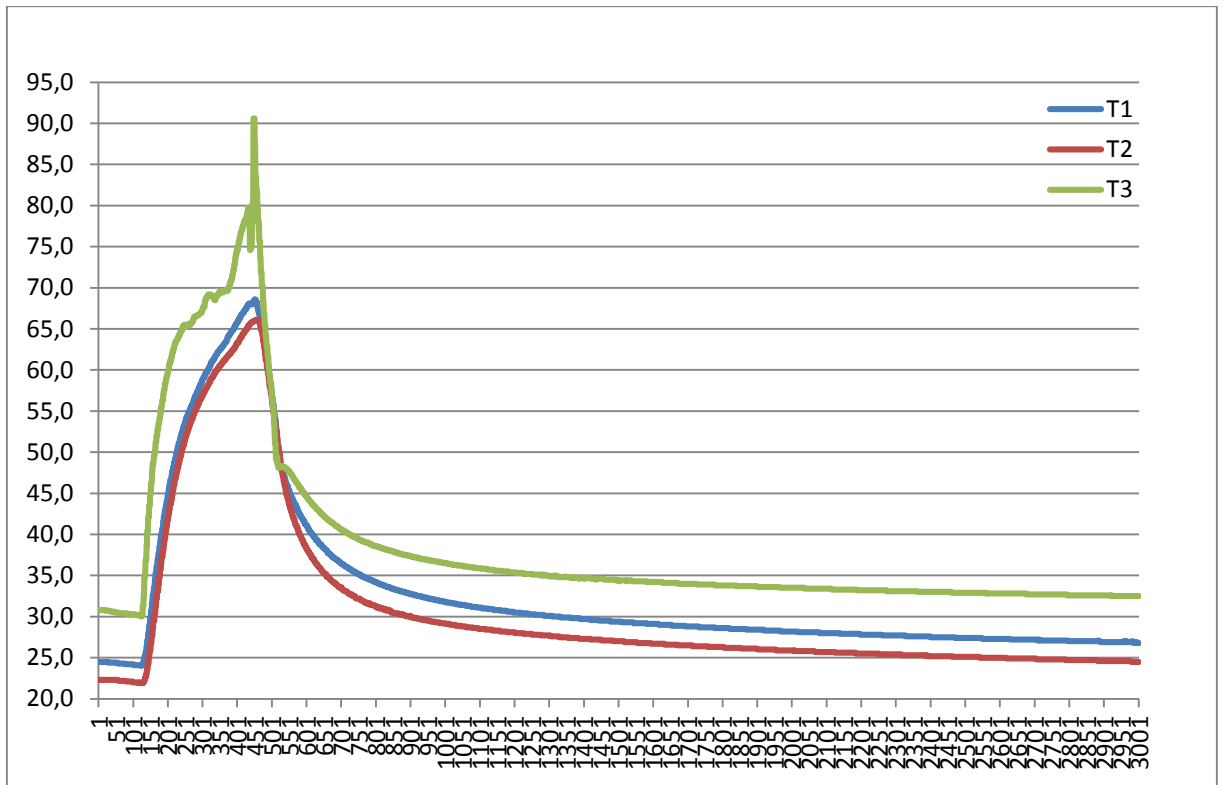


Příloha C - Grafy průběhů teplot termočlánků pro jednotlivá procesní prostředí

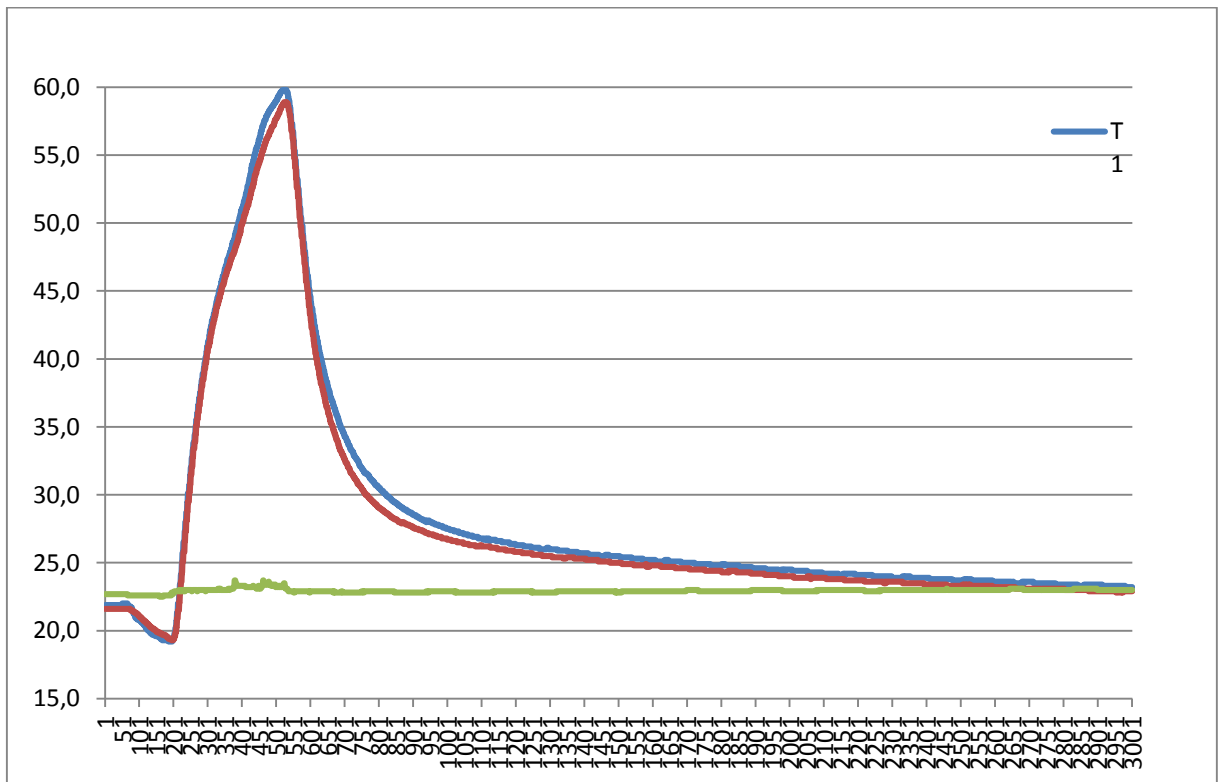
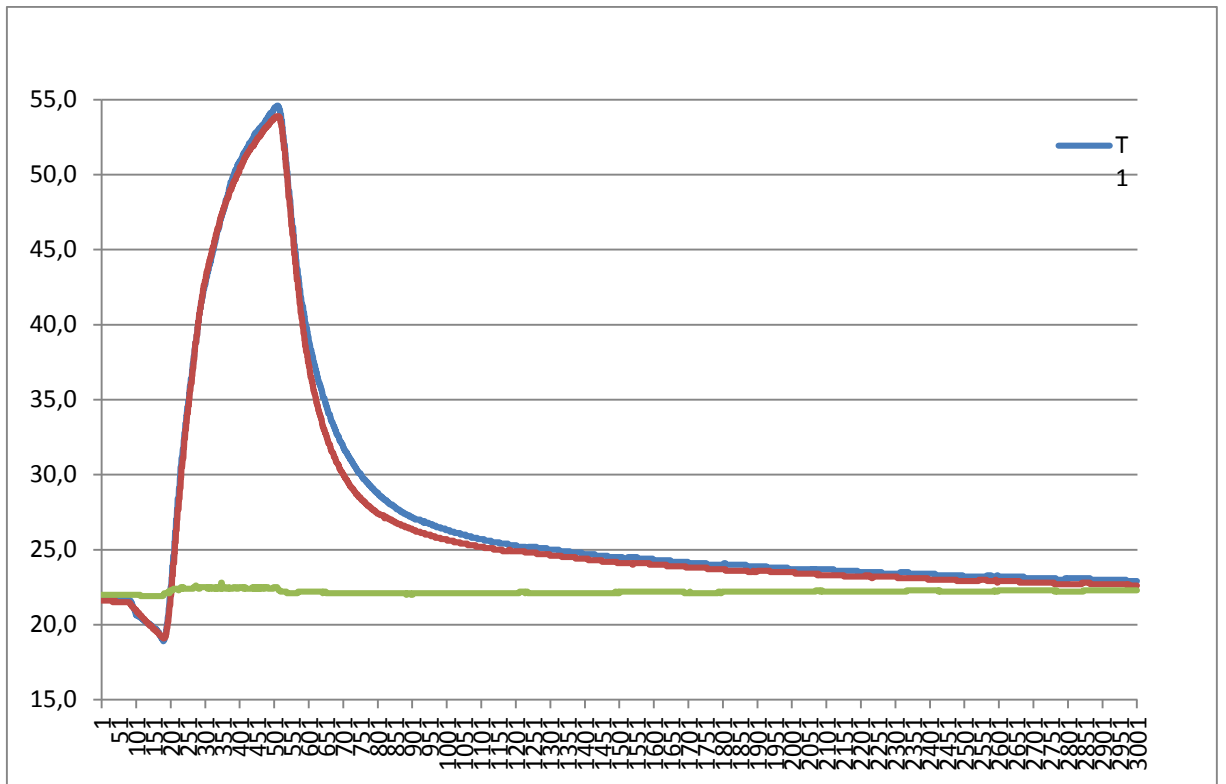
Grafy průběhů teplot termočlánků pro oxid uhlíčitý

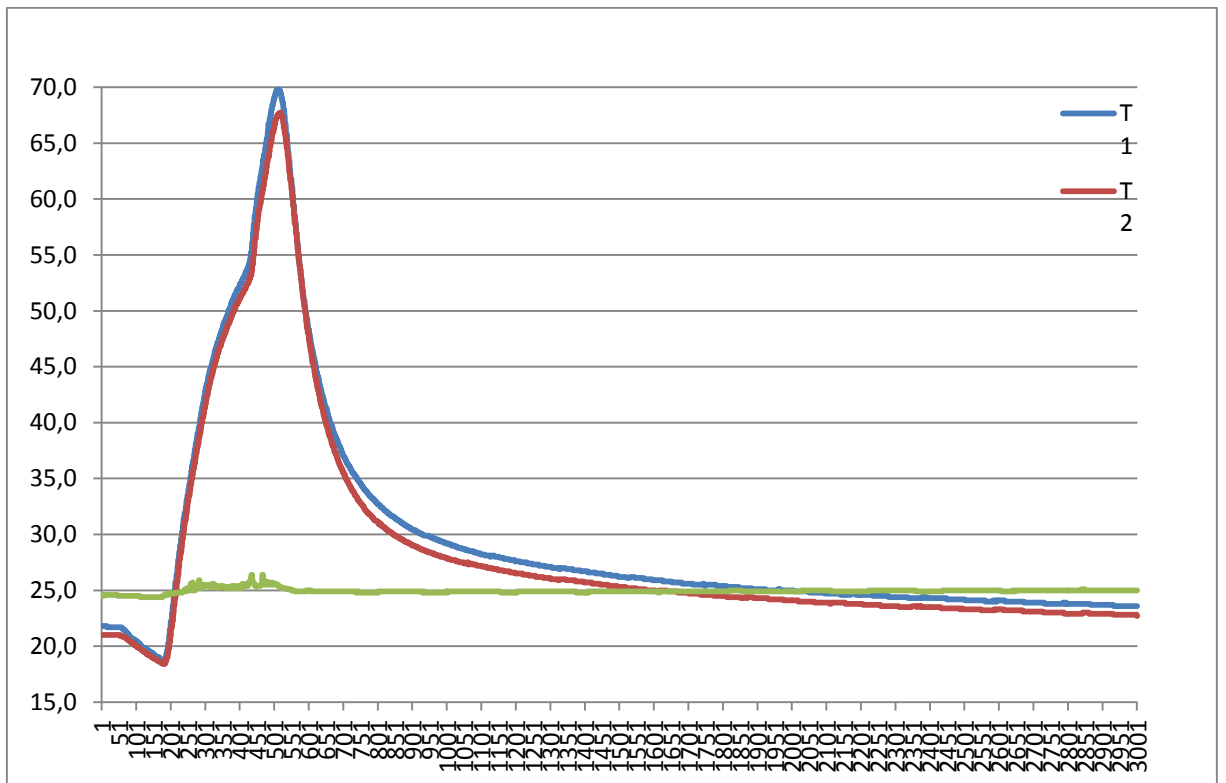
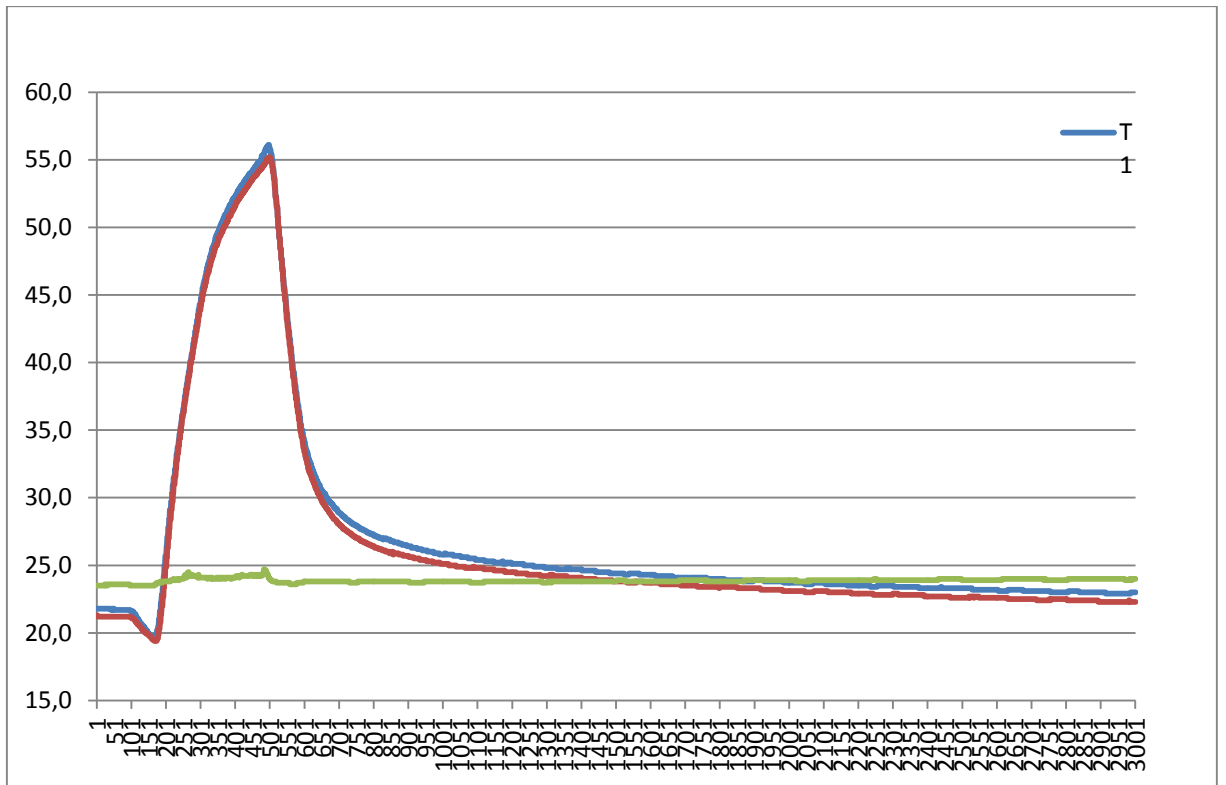


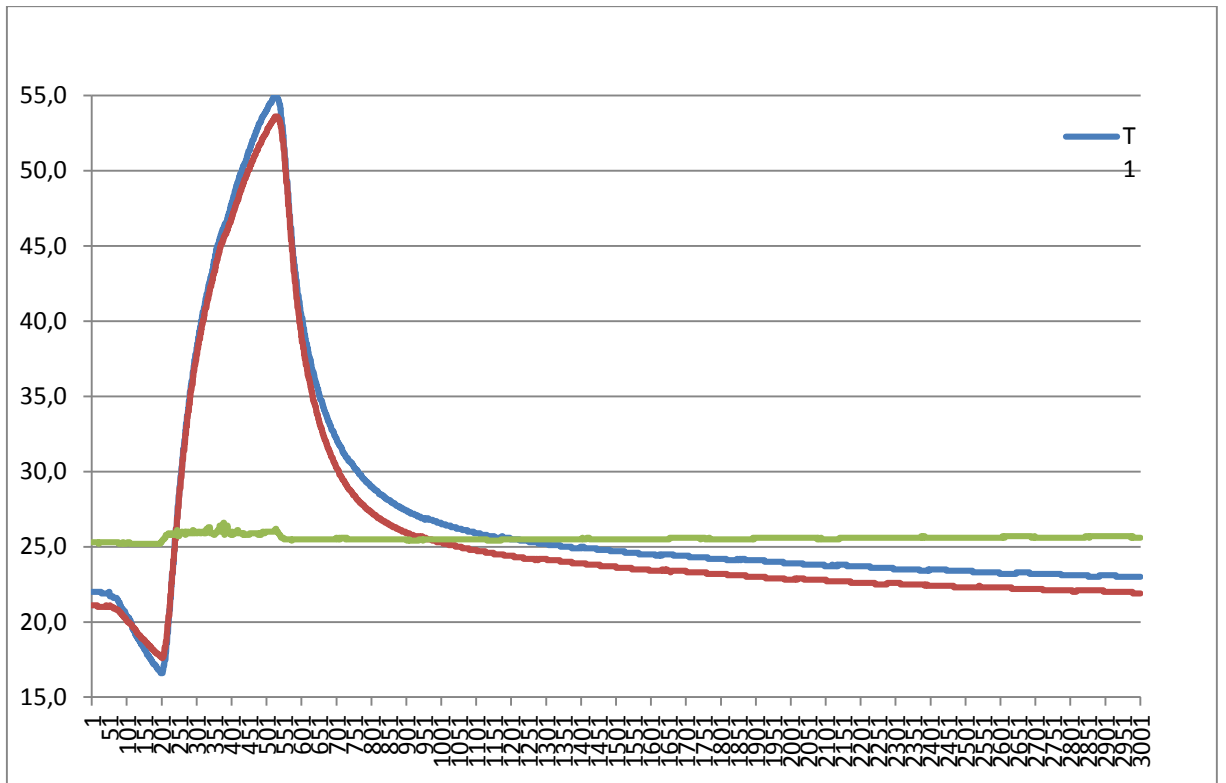




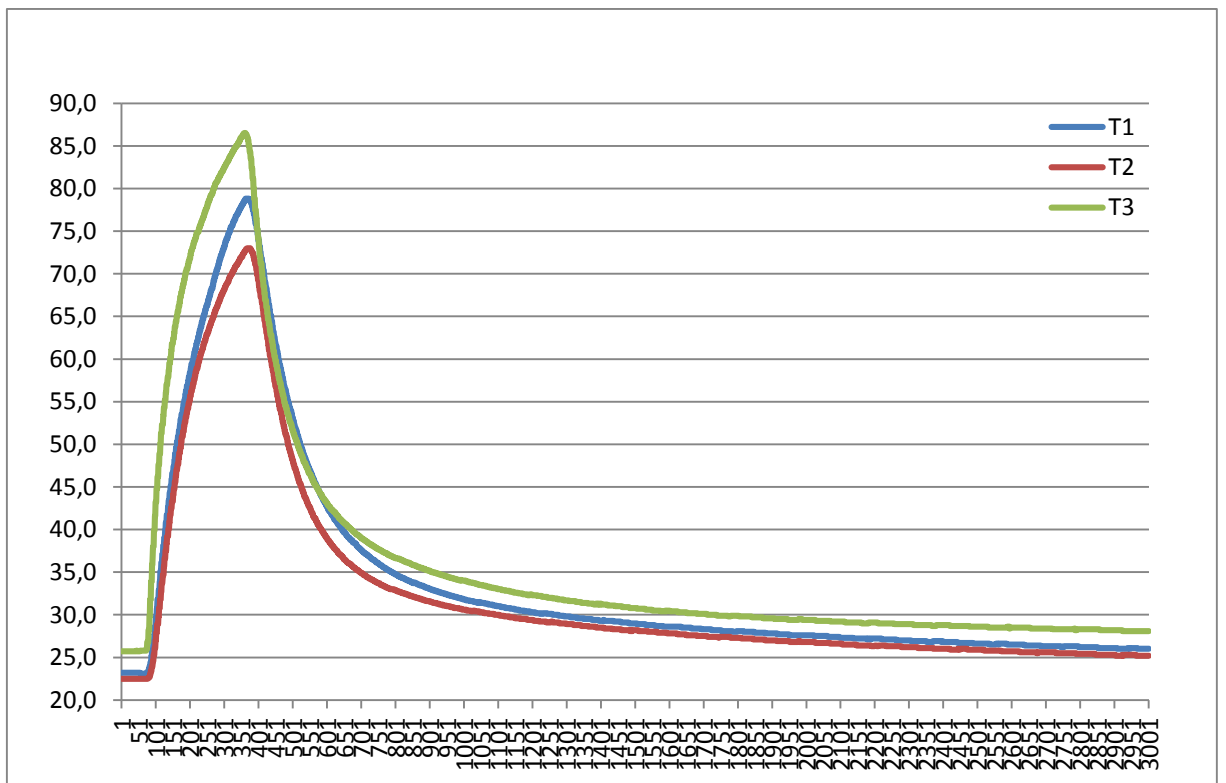
Grafy průběhů teplot termočlánků pro vírovou trubici

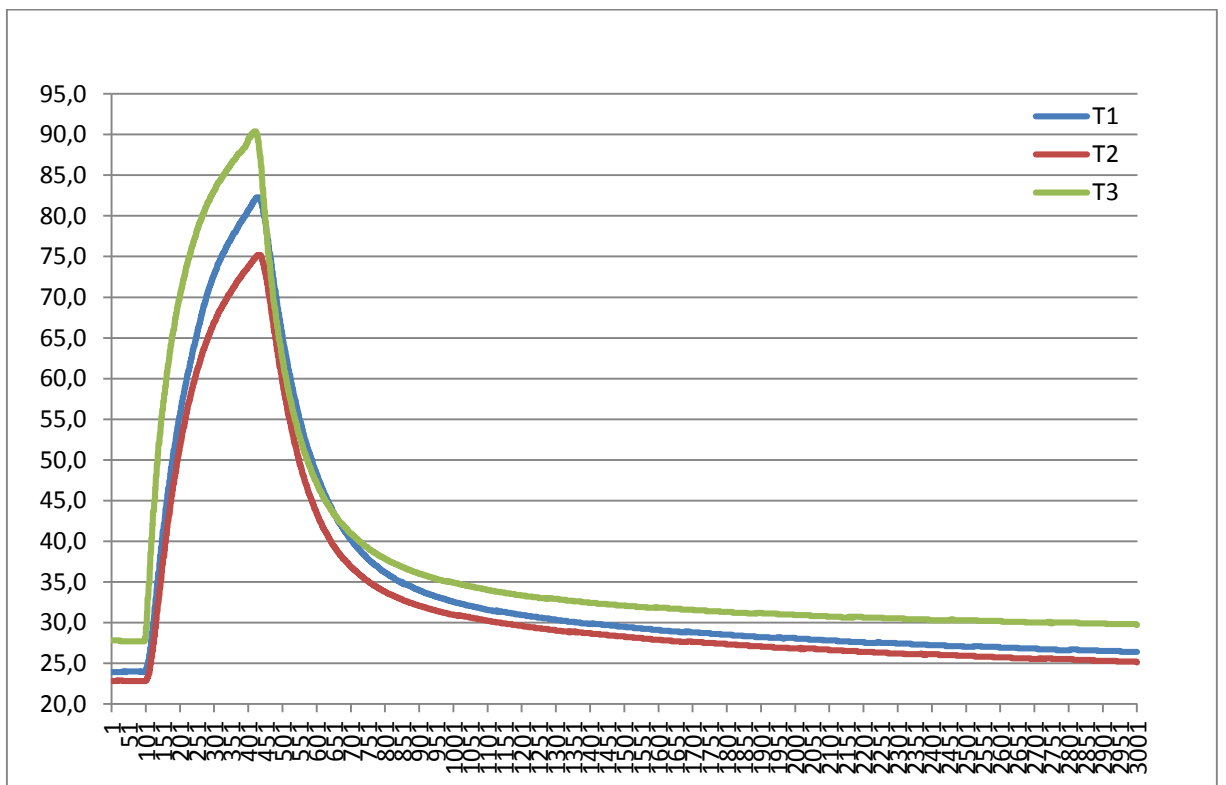
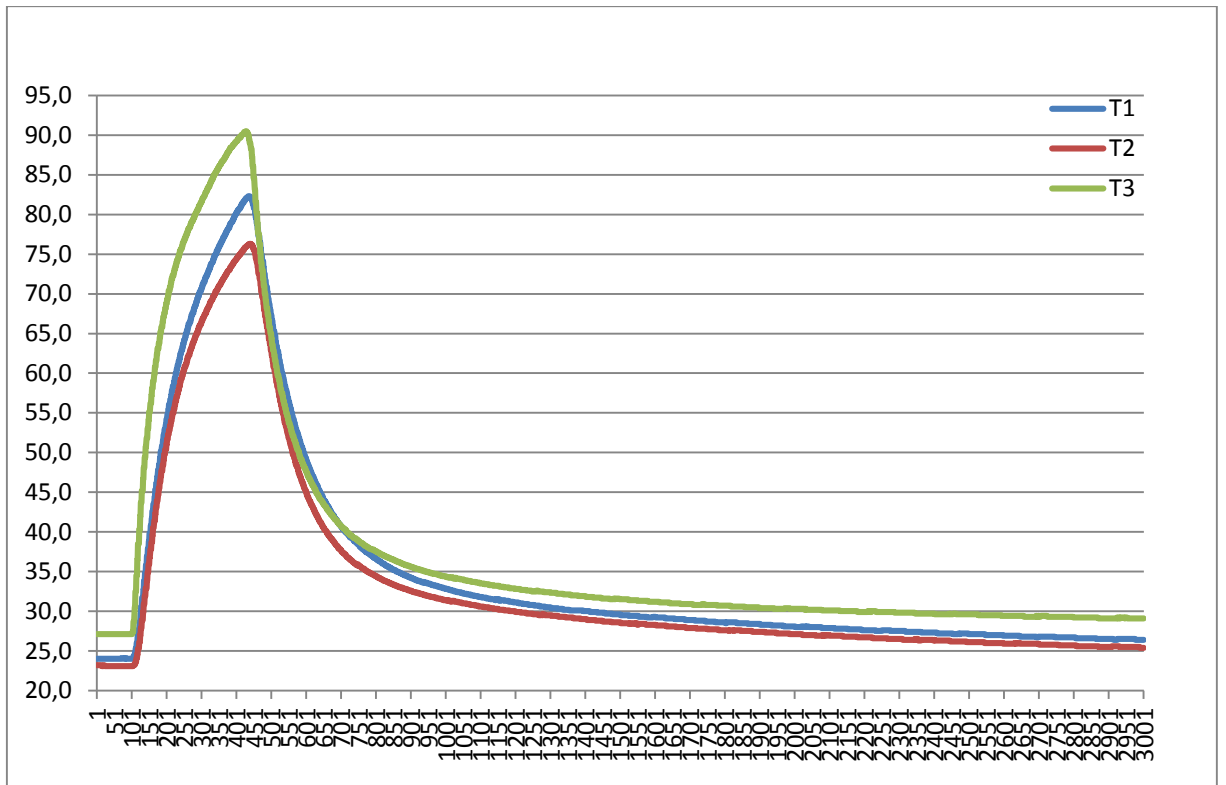


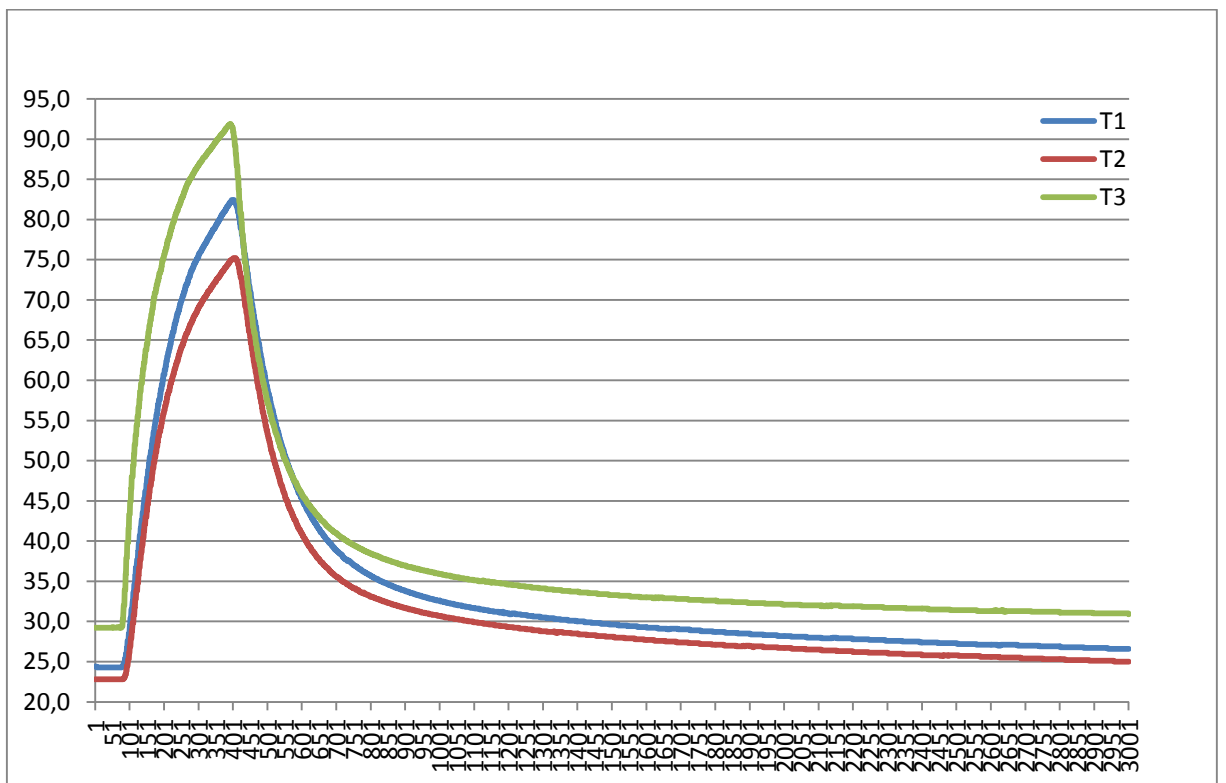
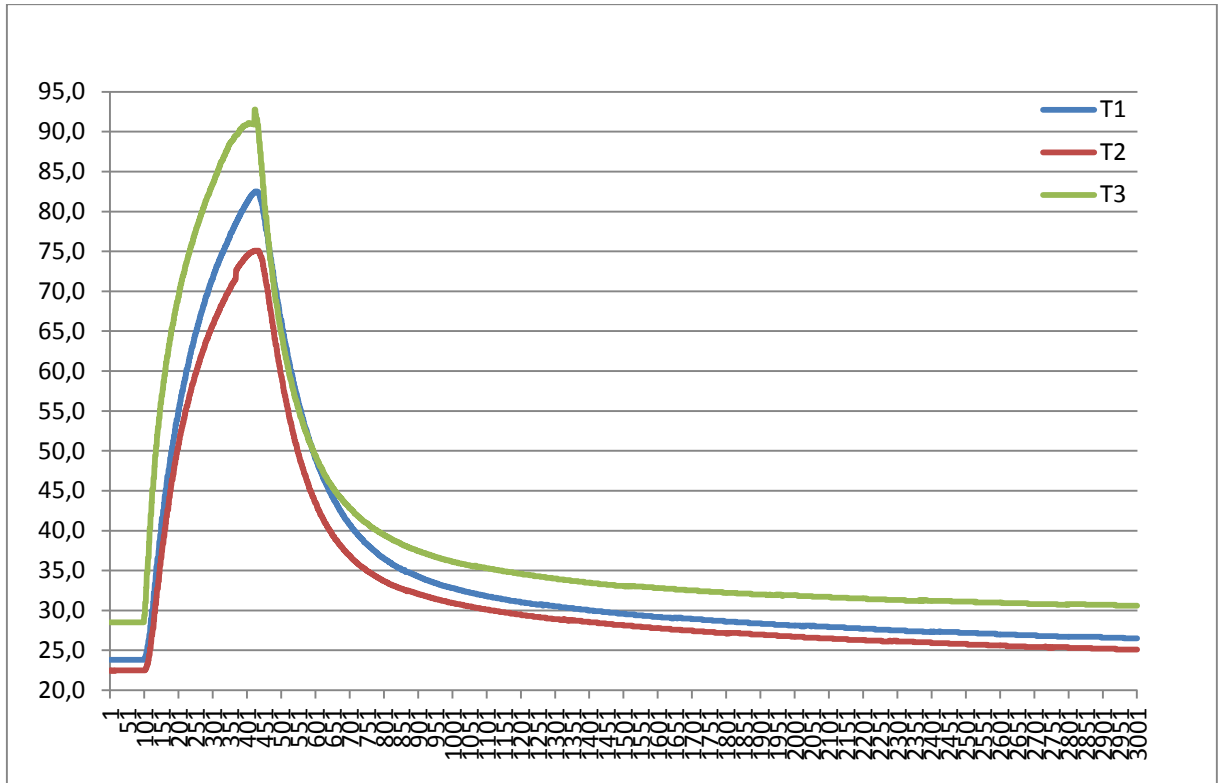




Grafy průběhů teplot termočlánků pro obrábění bez chlazení







Příloha D - Naměřené hodnoty parametrů drsnosti povrchu pro jednotlivá procesní prostředí

Naměřené hodnoty drsnosti povrchu oxidu uhličitého

VZ03A - CO2	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,63	2,26	2,50	2,25	2,61	2,58	2,29	2,43	2,61	2,58
Rz [μm]	14,56	18,08	14,43	13,81	14,19	14,20	13,40	14,15	13,43	15,33
Rt [μm]	17,34	17,75	19,05	17,10	17,50	20,43	19,36	16,86	16,19	21,87

VZ03B - CO2	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,88	2,08	1,99	2,31	2,28	2,25	2,23	2,05	2,30	2,15
Rz [μm]	17,26	13,04	11,78	12,82	12,78	13,82	13,02	12,11	13,33	12,82
Rt [μm]	25,70	18,42	16,47	17,80	15,32	22,05	16,54	14,71	16,52	16,71

VZ03C - CO2	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,15	2,42	2,11	2,19	2,35	2,54	2,40	1,91	2,44	2,35
Rz [μm]	12,19	15,50	12,44	13,14	13,37	15,37	12,42	12,51	15,94	15,05
Rt [μm]	15,78	21,58	15,55	16,00	20,52	22,32	14,80	17,72	23,98	18,64

VZ03D - CO2	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,59	2,32	3,01	2,09	2,52	2,37	2,30	2,16	2,25	2,79
Rz [μm]	14,21	13,74	17,35	13,62	12,86	14,42	13,89	12,06	14,25	18,53
Rt [μm]	16,90	17,81	27,85	19,08	16,32	19,59	19,06	13,10	16,21	25,94

VZ02E - CO2	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,10	2,33	2,22	2,12	1,90	1,97	2,38	2,30	2,33	2,17
Rz [μm]	13,49	14,16	12,55	12,58	11,03	11,65	12,80	13,77	13,76	14,20
Rt [μm]	19,60	19,15	15,82	17,04	15,41	14,76	16,27	21,84	18,16	18,23

Naměřené hodnoty drsnosti povrchu vírovou trubicí

VZ02A - VT	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,31	2,22	2,11	2,39	2,01	2,26	2,52	2,31	2,08	1,83
Rz [μm]	13,27	14,96	12,60	13,97	12,81	14,09	14,44	14,04	13,47	10,86
Rt [μm]	17,08	21,61	15,63	19,53	17,31	20,60	19,45	21,24	16,89	13,28

VZ02B - VT	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,11	2,43	2,34	2,61	1,94	2,33	2,58	2,37	2,23	2,21
Rz [μm]	12,62	15,60	14,32	20,23	11,53	13,31	14,96	13,12	12,03	12,33
Rt [μm]	17,29	24,79	19,17	30,85	14,94	18,05	25,30	15,65	14,22	16,82

VZ02C - VT	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,34	2,18	2,38	2,21	2,05	2,19	2,05	2,45	2,47	2,32
Rz [μm]	13,67	12,74	13,37	12,39	14,38	14,83	11,61	13,94	18,86	14,64
Rt [μm]	16,84	17,69	17,53	15,53	18,17	19,97	14,13	20,60	27,19	17,64

VZ03D - VT	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,28	2,12	2,20	1,97	1,93	1,75	1,80	2,20	1,91	1,99
Rz [μm]	11,28	13,01	12,55	11,07	11,10	10,14	10,84	13,17	11,31	9,63
Rt [μm]	13,90	18,22	19,86	13,48	14,81	13,48	13,58	17,00	14,22	11,90

VZ01E - VT	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,10	1,89	2,22	2,29	1,86	1,95	2,01	1,95	1,75	2,12
Rz [μm]	12,60	11,18	11,88	12,87	10,86	10,66	11,03	11,85	9,64	12,71
Rt [μm]	15,92	15,18	13,77	15,13	16,34	14,78	13,58	14,76	11,78	16,57

Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro obrábění bez chlazení

VZ01A - BEZ	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	1,95	2,44	2,58	2,12	2,19	2,45	2,43	2,34	2,32	2,16
Rz [μm]	11,28	13,87	14,77	14,31	12,68	14,50	12,81	14,27	12,86	13,67
Rt [μm]	16,40	21,85	20,47	18,56	17,64	21,29	19,34	21,70	17,91	22,60

VZ01B - BEZ	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,45	2,14	2,35	1,88	2,21	2,70	2,29	2,01	2,33	2,19
Rz [μm]	13,74	12,49	12,68	11,65	12,51	13,95	12,70	10,75	13,73	12,40
Rt [μm]	18,75	14,56	16,22	14,60	15,56	18,28	20,41	14,22	18,74	14,43

VZ01C - BEZ	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,43	2,11	2,11	1,83	2,16	2,41	2,25	1,97	2,10	2,22
Rz [μm]	13,62	12,60	13,20	10,09	12,50	13,10	13,04	11,20	11,48	12,48
Rt [μm]	16,59	17,80	15,90	13,04	15,58	20,89	18,36	15,29	15,10	16,17

VZ01D - BEZ	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,18	2,73	2,29	2,46	1,95	2,32	2,37	2,38	2,49	2,66
Rz [μm]	12,84	13,56	12,44	12,18	11,93	14,33	12,62	12,19	13,99	14,04
Rt [μm]	15,64	17,08	15,14	16,90	19,27	17,59	14,09	13,10	19,52	21,09

VZ01E - BEZ	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ra [μm]	2,25	2,54	2,19	2,16	2,26	2,65	2,26	2,40	2,25	2,65
Rz [μm]	12,91	13,51	12,32	12,37	11,69	12,62	11,60	13,52	11,73	14,06
Rt [μm]	14,95	17,52	14,37	15,01	14,76	14,73	14,33	15,07	14,60	17,48

Příloha E - Naměřené hodnoty rozměrové přesnosti pro jednotlivá procesní prostředí

Naměřené hodnoty rozměrové přesnosti oxidu uhličitého

Šířka drážky [mm]	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	CHLAZENÍ POMOCÍ CO₂									
VZ03A-CO2	34,05	34,06	34,05	34,05	34,06	34,06	34,05	34,06	34,06	34,06
VZ03B-CO2	34,05	34,05	34,05	34,05	34,05	34,05	34,05	34,05	34,05	34,05
VZ03CCO2	34,05	34,05	34,05	34,04	34,04	34,05	34,05	34,04	34,04	34,04
VZ03D-CO2	34,04	34,04	34,04	34,04	34,04	34,04	34,04	34,04	34,04	34,04
VZ02E-CO2	34,03	34,03	34,03	34,03	34,03	34,03	34,03	34,03	34,03	34,03

Naměřené hodnoty rozměrové přesnosti vírové trubice

Šířka drážky [mm]	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	CHLAZENÍ POMOCÍ VT									
VZ02A-VT	34,08	34,08	34,08	34,08	34,08	34,08	34,08	34,09	34,08	34,08
VZ02B-VT	34,07	34,07	34,08	34,07	34,07	34,08	34,07	34,07	34,07	34,07
VZ02C-VT	34,07	34,06	34,07	34,07	34,07	34,07	34,07	34,07	34,06	34,06
VZ03D-VT	34,06	34,06	34,06	34,06	34,06	34,06	34,05	34,06	34,06	34,05
VZ01E-VT	34,05	34,05	34,05	34,05	34,05	34,05	34,05	34,05	34,05	34,05

Naměřené hodnoty rozměrové přesnosti obrábění bez chlazení

Šířka drážky [mm]	Měření číslo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	BEZ CHLAZENÍ									
VZ01A-BEZ	34,03	34,03	34,03	34,03	34,03	34,03	34,03	34,03	34,03	34,03
VZ01B-BEZ	34,02	34,02	34,02	34,02	34,02	34,02	34,01	34,01	34,02	34,02
VZ01C-BEZ	34,01	34,00	34,00	34,00	34,01	34,01	34,01	34,01	34,01	34,01
VZ01D-BEZ	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00
VZ01E-BEZ	33,99	33,99	33,99	33,99	34,00	33,99	33,99	33,99	33,99	33,99