



ÚČINEK PROCESNÍCH PLYNŮ A KAPALIN NA TECHNOLOGII FRÉZOVÁNÍ A KVALITU OBROBENÝCH SOUČÁSTÍ

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Pavel Dolanský**
Vedoucí práce: Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

THE EFFECT OF THE PROCESS GASES AND LIQUIDS TO MILLING TECHNOLOGY AND THE QUALITY OF THE MACHINED PART

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301T048 – Engineering Technology and Materials
Author: **Bc. Pavel Dolanský**
Supervisor: Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Dolanský**
Osobní číslo: **S13000806**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Účinek procesních plynů a kapalin na technologii frézování a kvalitu obroběných součástí**
Zadávací katedra: **Katedra obrábění a montáže**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

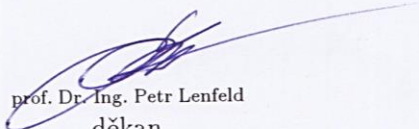
1. Shrnutí poznatků o vlivu procesních plynů a kapalin při obrábění. Shrnutí dosavadních poznatků o technologii frézování.
2. Rozbor metod použití procesních plynů (způsoby přívodu plynu, variantní média, atd.) a procesních kapalin (způsoby přívodu kapaliny, metoda MQL, variantní média, atd.).
3. Návrh metodiky experimentů pro zkoumání vlivu procesních plynů a kapalin na technologii frézování a kvalitu obroběných součástí.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení kvality obroběných součástí při zkoumání vlivu procesních plynů a kapalin na technologii frézování.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.




Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 60 - 70 stran textu**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- 1. KOČMAN, K., PROKOP, K.** *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
- 2. BILÍK, O.** *Obrábění II. (1.díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.
- 3. BUMBÁLEK, B., OŠTÁDAL, B., ŠAFR, E.** *Řezné kapaliny*. Praha: SNTL, 1963. 136 s. ISBN -.
- 4. VIGNER, M., PŘIKRYL, Z. a kol.** *Obrábění*. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, n. p., 1984. 808 s. ISBN -.
- 5. Firemní podklady.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.**
Katedra obrábění a montáže
Konzultant diplomové práce: **Ing. Miloslav Ledvina**
Katedra obrábění a montáže
Datum zadání diplomové práce: **11. března 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. června 2016**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jan Jersák, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 11. března 2015

Označení DP:

Řešitel: Bc. Pavel Dolanský

**Účinek procesních plynů a kapalin na technologii frézování a kvalitu
obrobených součástí**

ANOTACE:

Obsahem diplomové práce je výzkum vlivu chlazení plynnou látkou na obráběcí soustavu, resp. výsledek obráběcího procesu, při technologii frézování. Jako procesní plyny byly zvoleny: okolní vzduch (za sucha), CO₂, vírová trubice a zkapalněný dusík. Nedílnou součástí výzkumu je porovnání (zhodnocení) výsledků experimentálních měření sledovaných vlivů mezi procesními médii: kapalina a plynná látka.

Klíčová slova: OBRÁBĚNÍ, FRÉZOVÁNÍ, PROCESNÍ PLYNY, PROCESNÍ KAPALINY

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

ANNOTATION:

The content of this thesis is to research the effect of cooling the gaseous substance to the machining system, respectively – the result of the machining process by milling technology. The following process gases were selected: ambient air (dry), CO₂, vortex tube and liquefied nitrogen. An integral part of the research is a comparison (appreciation) of the results of experimental measurements of the effects observed between process media: liquid and gaseous substance.

Key words: MACHINING, MILLING TECHNOLOGY, PROCESS GASES, PROCESS LIQUIDS

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2015

Archivní označ. Zprávy:

Počet stran: 81 Počet tabulek: 26

Počet příloh: 3 Počet grafů: 14

Počet obrázků: 4

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou 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.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat zejména Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. a Ing. Miloslavu Ledvinovi za odborné vedení při zpracování diplomové práce a za velmi přínosné rady a připomínky.

Dále bych také poděkoval celé rodině za podporu v průběhu studia. Mgr. Věře Dolanské a Bc. Janě Vítové za pomoc se stylistickou formou práce.

V neposlední řadě patří dík celé Katedře obrábění a montáže za pomoc při realizaci experimentální části této práce.

Katedra obrábění a montáže

Evidenční číslo práce: **KOM 1275**

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Dolanský**

Vedoucí práce: Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
Konzultant: Ing. Miloslav Ledvina

Počet stran: 81
Počet příloh: 3
Počet tabulek: 26
Počet obrázků: 46
Počet diagramů: 14



Obsah

1.	Úvod	- 1 -
2.	Frézování.....	- 2 -
2.1.	Stroj-frézka	- 6 -
2.2.	Nástroj- fréza.....	- 6 -
2.2.1.	Geometrie břitu frézy	- 9 -
2.2.2.	Materiál fréz.....	- 11 -
2.2.3.	Upínání obrobků a fréz.....	- 11 -
2.3.	Kinematika a základní parametry frézování	- 12 -
2.3.1.	Řezné síly	- 13 -
2.3.2.	Jednotkový strojní čas	- 14 -
2.3.3.	Řezné podmínky	- 15 -
2.3.4.	Silové poměry	- 17 -
2.4.	Teplo a teplota řezání	- 18 -
2.5.	Tvorba třísky	- 19 -
2.6.	Opatřebení a hospodárná trvanlivost fréz.....	- 20 -
3.	Procesní média	- 21 -
3.1.	Chlazení procesními kapalinami	- 22 -
3.2.	Chlazení plyny	- 27 -
3.2.1.	Chlazení pomocí podchlazeného vzduchu.....	- 27 -
3.2.2.	Chlazení pomocí zkapalněného dusíku	- 29 -
3.2.3.	Chlazení pomocí zkapalněného oxidu uhličitého	- 30 -
3.3.	Obrábění bez chlazení.....	- 31 -
4.	Experimentální část	- 32 -
4.1.	Materiál 12 050.1	- 32 -
4.2.	Charakteristika použitých strojů	- 33 -



4.3. Procesní média pro experimenty	- 35 -
4.4. Příprava procesních médií pro experimenty	- 35 -
4.5. Řezné podmínky pro experimentální měření	- 36 -
4.6. Měřené parametry	- 36 -
4.6.1. Řezná síla	- 36 -
4.6.2. Teplota obrobku	- 38 -
4.6.3. Trvanlivost břitu nástroje	- 40 -
4.6.4. Drsnost povrchu	- 42 -
4.6.5. Rozměrová přesnost	- 45 -
5. Experimentální měření	- 46 -
5.1. Měření řezné síly	- 47 -
5.2. Měření drsnosti povrchu	- 50 -
5.3. Měření rozměrové přesnosti	- 53 -
5.4. Měření trvanlivosti nástroje	- 55 -
5.5. Měření teploty obrobku	- 58 -
6. Ekonomické zhodnocení použití procesních médií	- 60 -
6.1. Fixní náklady	- 60 -
6.2. Celkové náklady	- 63 -
6.3. Roční náklady na obrobení délky 10 mm	- 66 -
7. Diskuze výsledků	- 69 -
8. Závěr	- 74 -



Seznam použitých značek a zkratek:

Označení	Jednotka	Popis
α	[°]	úhel hřbetu
β	[°]	úhel břitu
γ	[°]	úhel čela
δ	[°]	úhel řezu
λ	[°]	úhel sklonu ostří
κ	[°]	úhel nastavení
ψ	[°]	úhel záběru frézy
χ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
φ_i	[°]	úhel posuvového pohybu
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
Si	[-]	křemík
Ni	[-]	nikl
Cr	[-]	chrom
V	[-]	vanad
Mn	[-]	mangan
Mo	[-]	molybden
CO ₂	[-]	oxid uhličitý
N ₂	[-]	dusík
W	[-]	wolfram
Cu	[-]	měď
P	[-]	fosfor
S	[-]	síra
C	[-]	uhlík
Al	[-]	hliník
v_c	[m·min ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[mm·min ⁻¹]	posuvová rychlost
n	[s ⁻¹]	otáčky
h, a_p	[mm]	hloubka řezu
f, s	[mm·min ⁻¹]	posuv
f_n	[mm]	posuv na zub
z	[-]	počet zubů (břitu) nástroje



h_i	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
b	[mm]	jmenovitá šířka třísky
A_{Di}	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky
A_{Dmax}	[mm ²]	maximální velikost jmenovitého průřezu třísky
D_w	[mm]	průměr výrobku
D_a	[mm]	průměr obrobku
F_c	[N]	tangenciální složka řezné síly
F_{cN}	[N]	radiální složka řezné síly
F_f	[N]	horizontální složka řezné síly
F_{fN}	[N]	vertikální složka řezné síly
F_{ci}	[N]	řezná síla
k_{ci}	[N]	měrná řezná síla
n_z	[N]	počet zubů v záběru
C_{Fc}	[N]	konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu
x	[-]	exponent vlivu tloušťky třísky
t_{AS}	[min]	jednotkový strojní čas
L	[mm]	dráha nástroje
R_a	[μm]	průměrná aritmetická úchylnost profilu
R_z	[μm]	největší výška profilu
R_t	[μm]	celková výška profilu
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti
A_5	[%]	tažnost
Z	[%]	kontrakce
E	[GPa]	modul pružnosti v tahu
G	[GPa]	modul pružnosti ve smyku
Q	[J]	celkové množství tepla
Q_{def}	[J]	teplo vzniklé z práce pružných a plastických deformací
$Q_{tř}$	[J]	teplo vzniklé z práce tření
Q_1	[J]	množství tepla odvedené v tříse
Q_2	[J]	množství tepla zůstávající v nástroji
Q_3	[J]	množství tepla zůstávající v obrobku
Q_4	[J]	množství tepla vysálané do okolí
VB	[mm]	opotrebení na hřbetu nástroje



VR	[mm]	rozměrové opotřebenění na hřbetu nástroje
KT	[mm]	velikost žlábků na opotřebeném hřbetu nástroje
pH	[-]	vodíkový exponent
CNC	[-]	obráběcí stroje číslicově řízené počítačem
NC	[-]	obráběcí stroje číslicově řízené
ČSN	[-]	česká státní norma
ISO	[-]	mezinárodní organizace pro normalizaci
DIN	[-]	německý ústav pro průmyslovou normalizaci
JIS	[-]	japonské průmyslové standardy

1. Úvod

Proces řezání probíhá vždy v určitém prostředí, buď přirozeném (vzduch) nebo umělém (kapaliny, plyny, mlha). Řezné prostředí ovlivňuje různou měrou podle svých fyzikálních vlastností a chemického složení ekologické, energetické a kvalitativní parametry řezného procesu. Je proto možnou volbou pro daný případ optimálního řezného prostředí zvýšit hospodárný úběr materiálu o 20% až 100%, v některých případech až o 200%, a současně také zvýšit kvalitu obrobené plochy [28].

Obsahem diplomové práce je výzkum vlivu chlazení plynnou látkou na obráběcí soustavu, resp. výsledek obráběcího procesu, při technologii frézování. Nedílnou součástí výzkumu je porovnání (zhodnocení) výsledků experimentálních měření sledovaných vlivů mezi procesními médii: kapalina a plynná látka.

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

Jako média pro řezné prostředí byly zvoleny: dvě řezné kapaliny a zkapalněný dusík.

Diplomová práce je rozdělena několika základních částí – a to část teoretickou, experimentální a část závěrečnou, která informuje o dosažených výsledcích práce.

V rámci teoretické části je popsána technologie frézování, vlastnosti procesních kapalin a technických plynů.

Část praktická pojednává o opotřebením bříty nástroje při obrábění, teplotnímu zatížení, řezných silách, drsnosti a rozměrové přesnosti povrchu vzniklého při procesu obrábění. Součástí je také popis měření jednotlivých parametrů.

Část závěrečná obsahuje dosažené výsledky aplikovaného výzkumu včetně diskuze k celkovému výsledku diplomové práce.

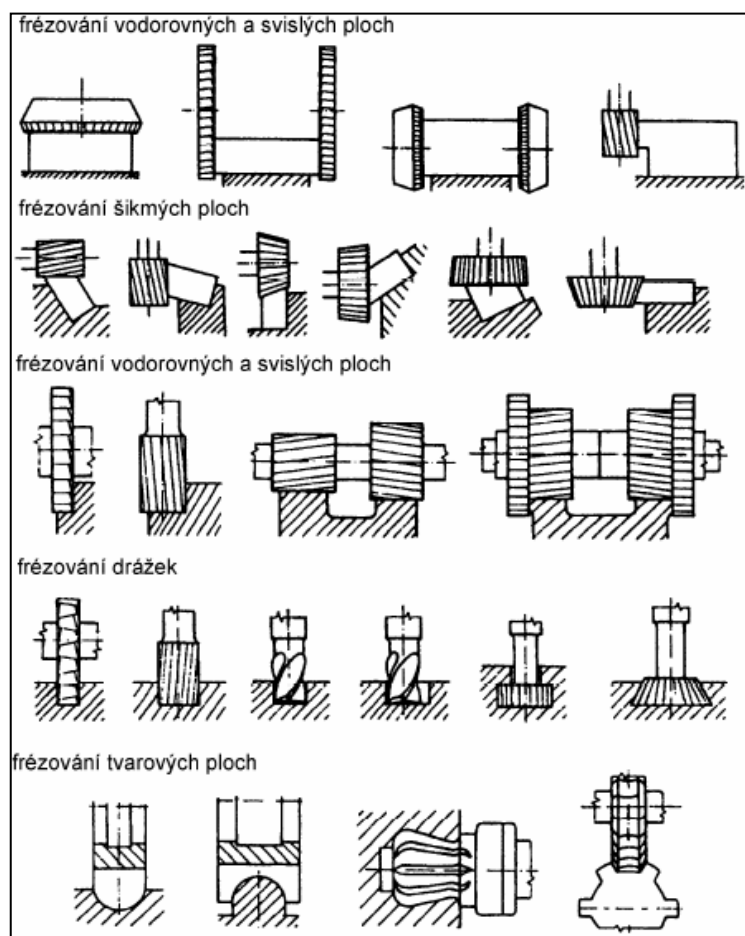
2. Frézování

Frézování je způsob obrábění, při kterém se materiál obrobku odebrává vícebřitým nástrojem-frézou. Hlavní řezný pohyb vykonává nástroj (rotační pohyb), vedlejší pohyby, posuv a přísuv, koná buď obrobek, nebo nástroj, podle typu stroje. Směr pohybu obrobku je ve většině případů kolmý na osu otáčení nástroje.

Fréza je několikabřítý nástroj válcového, kuželového nebo jiného tvaru s břity umístěnými po obvodu a na čele. Vzhledem k velkému množství použití technologie frézování se v současné době využívá mnoho rozličných typů a velikostí těchto nástrojů.

Stroje pro frézování se nazývají frézky. Frézky jsou vyráběny v mnoha variacích dle použití. Základní druhy frézek jsou: konzolové, stolové, rovinné, speciální a NC a CNC. Zvláštní kategorií jsou frézky na výrobu ozubení. [3][2][11][10].

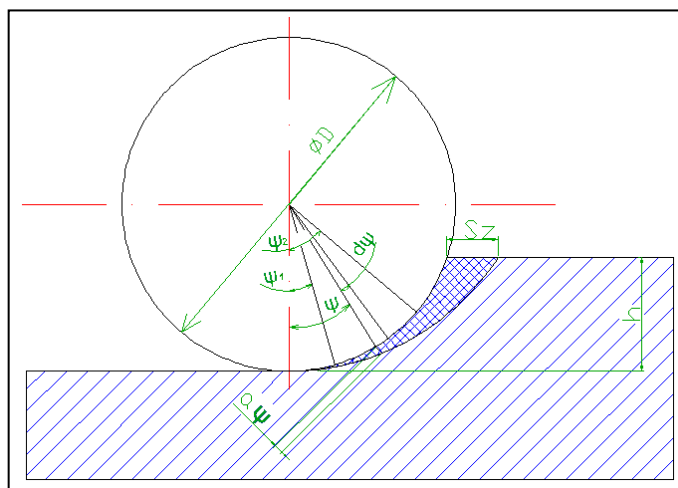
Technologií frézování lze vytvářet velká škála rovinných a tvarových ploch (Obr. 1).



Obr. 1 Příklady frézování různých ploch [14].

Základní druhy frézování dělíme dle způsobu záběru nástroje do materiálu obrobku. Jsou jimi frézování čelní, válcové, planetové a okružní. Od těchto druhů jsou odvozeny další způsoby [13].

Válcové frézování se používá k obrábění s válcovými (Obr. 2) a tvarovými frézami. Zuby nástroje jsou vytvořeny na obvodu nástroje. Hloubka obráběného materiálu se nastavuje kolmo na směr posuvu frézy. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou nástroje.



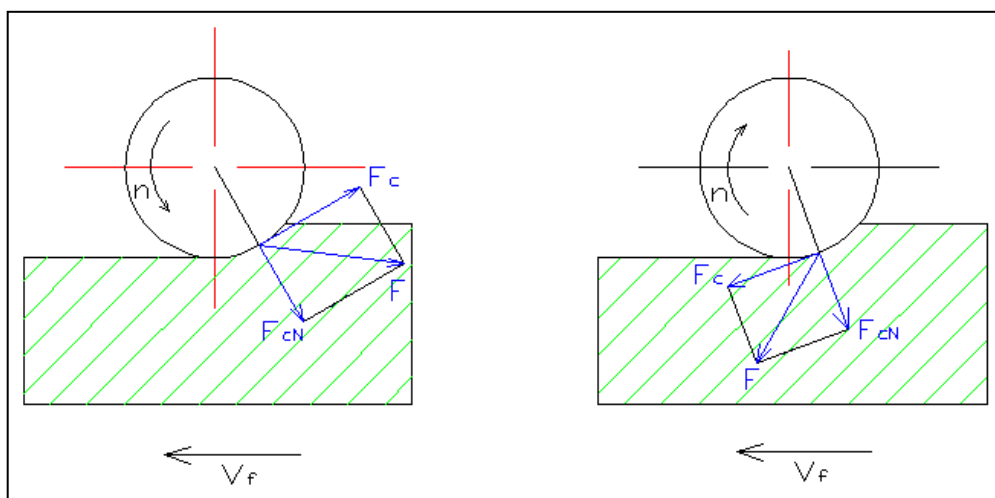
Obr. 2 Záběrové pole frézování válcovou frézou [5].

Podle směru posuvu a rotace frézy rozeznáváme dva základní typy válcového frézování, a to sousledné a nesousledné [6][7].

Technologie sousledného frézování (Obr. 3) se používá spíše při obrábění menších hloubek 2 až 4 mm. Výhoda tohoto způsobu je zvýšení trvanlivosti břitů o 30 až 50%, zlepšení jakosti povrchu a pokles spotřeby energie. Velikost odebrané třísky jde od maxima do minima. Materiál je při obrábění vtahován mezi nástroj a svěrák do místa řezu. Nevýhodou této technologie jsou rázy, které eliminujeme použitím frézy se šroubovitými zuby.

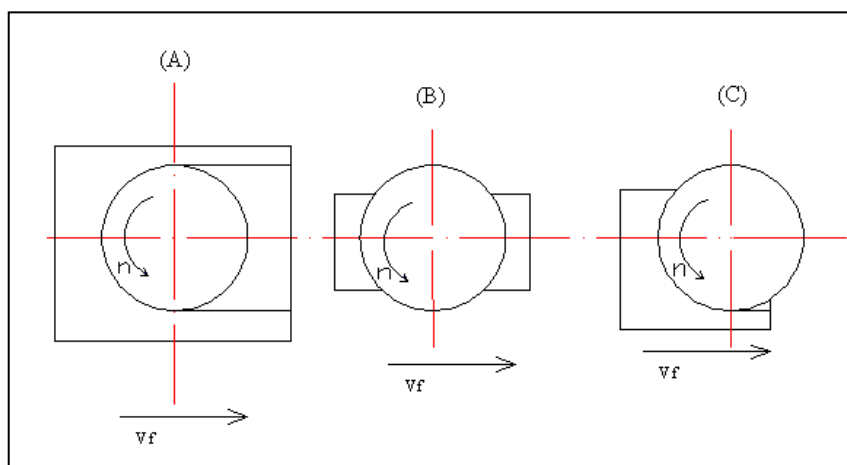
Pohyb nástroje při nesousledném frézování (Obr. 3) směřuje proti smyslu posuvu. Velikost odebrané třísky se mění od minima do maxima. Dochází k velkému namáhání břitu, které se projeví opotřebením a zahříváním nástroje. Obrobek je odtahován z místa řezu kvůli řezné síle, která vzniká v ose nástroje a působí nahoru. Tato technologie se používá pro velké úběry materiálu a při obrábění horšího povrchu.

Nesousledné frézování se tedy uplatňuje hlavně při hrubování, kde dosahuje mnohem větší produktivity díky pozitivnímu efektu menšího zařezávání síly na vstupu do drážky[6][7][2].



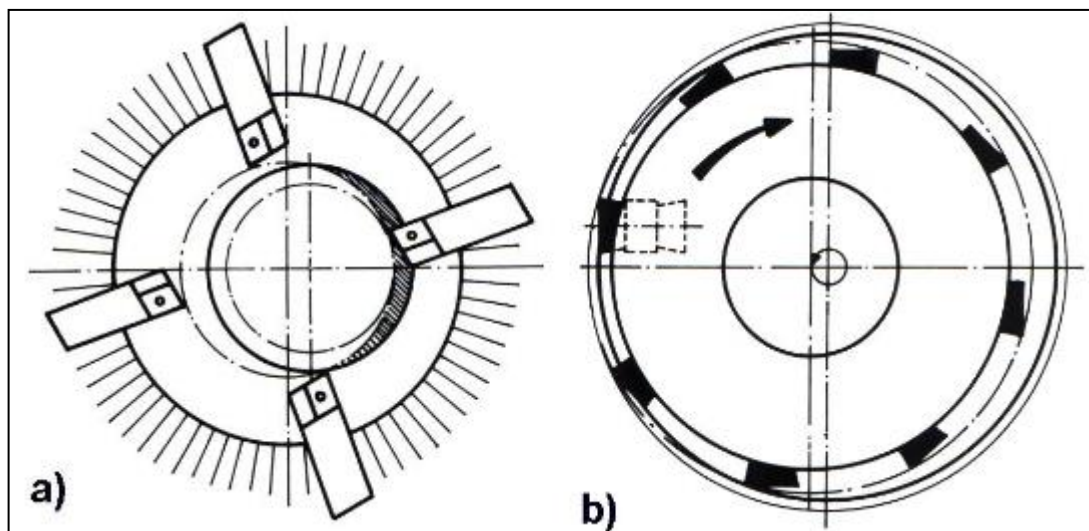
Obr. 3 Nesousledné frézování (vlevo), sousledné frézování (vpravo) [7].

Druhým základním způsobem frézování je čelní frézování. Osa nástroje je při čelním frézování kolmá na obráběnou plochu. V záběru jsou jak čelní, tak obvodové břity. Tloušťka třísky jde od minima do maxima, což je totožné s technologií válcového nesousledného frézování. Tato technologie je však mnohem produktivnější než technologie válcového frézování. Tato skutečnost je způsobená tím, že je v záběru více zubů najednou. Čelní frézování lze rozdělit dle symetričnosti do tří skupin, a to na úplné symetrické (Obr. 4A), neúplné symetrické (Obr. 4B) a neúplné nesymetrické (Obr. 4C) [6][7][2].



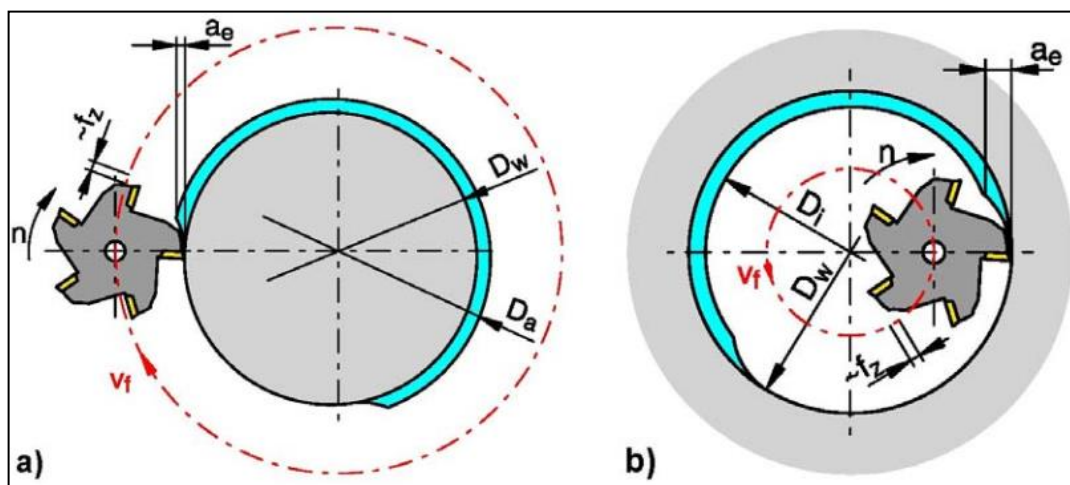
Obr. 4 Frézování úplné symetrické (A), neúplné symetrické (B), neúplné nesymetrické (C) [7].

Při okružním frézování se používá jako nástroj frézovací hlava osazená několika noži. Používá se k obrábění dlouhých válcových tyčí a k výrobě závitů. Při frézování závitů koná hlava jen rotační pohyb a u frézování válcových tyčí se frézovací hlava otáčí i posouvá. Rozlišujeme dva typy okružního frézování: vnější (Obr. 5a) a vnitřní (Obr. 5b) [13].



Obr. 5 Okružní frézování [23].

Planetové frézování se využívá u číslicově řízených strojů a obráběcích center, které mají naprogramovanou kruhovou interpolaci, kde je pohyb nástroje vykonáván po kružnici. Díky tomu je možné frézovat rotační plochy. Rozlišujeme dva druhy planetového frézování: vnější (Obr. 6a) a vnitřní (Obr. 6b) [13].



Obr. 6 Planetové frézování [23].

2.1. Stroj-frézka

Frézky jsou víceúčelové stroje, které lze rozdělit v první řadě podle polohy vřeten na svislé a vodorovné. Dále se dělí dle účelu na frézky konzolové, stolové, rovinné, speciální, NC a CNC. Charakteristický rozměr frézek je dán velikostí upínací plochy stolu [15].

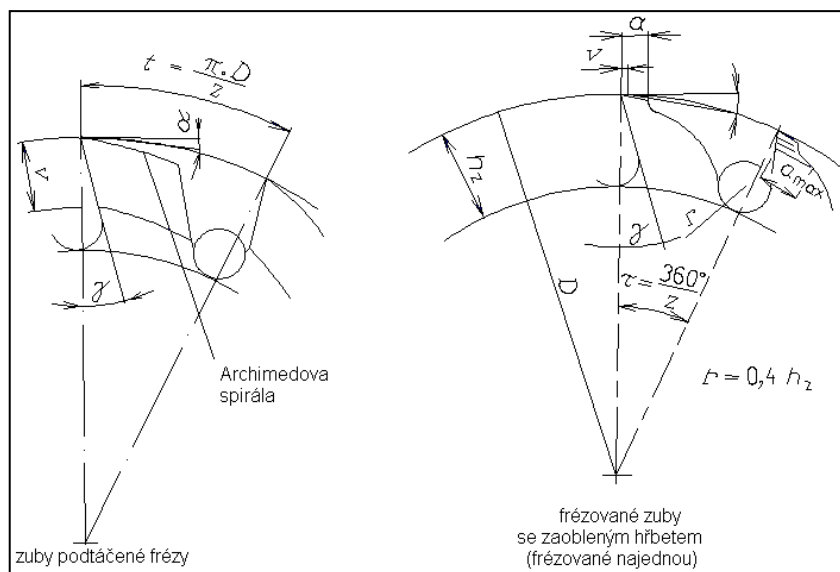
Konzolové frézky jsou ze všech frézek nejrozšířenější. Jsou vhodné pro obrábění menších a středních obrobků, zejména v kusové a malosériové výrobě. Pro svou univerzálnost se zvláště hodí do menších provozoven, nářadoven, opraven a údržbářských dílen. Jejich společným znakem je, že obrobek se upíná na vodorovnou pracovní plochu stolu, který je na konzole svisle přestavitelný po vodicích plochách stojanu.

Svislé frézky mají svislé vřetenno. Je uloženo buď v hlavě vřeteníku, upevněné na horní části stojanu a popřípadě natáčivé na obě strany v rovině kolmé k pracovní ploše stolu, nebo je uloženo přímo ve stojanu. Vřetenno je obvykle svisle přestavitelné posouváním vřetenové objímky (pinoly) působením pohybového šroubu. Pohybový šroub se otáčí ručním kolem s kuželovým převodem. U takového stroje lze nastavovat hloubku třísky přestavením vřetenno. Stůl má podélný, příčný a svislý posuv.

Vodorovné konzolové frézky mají vodorovné frézovací vřetenno, uložené v horní části stojanu rovnoběžně s upínací plochou stolu. Stůl je přestavitelný v podélném a příčném směru na stolové konzole. Spolu s konzolou je stůl přestavitelný i svisle [15].

2.2. Nástroj- fréza

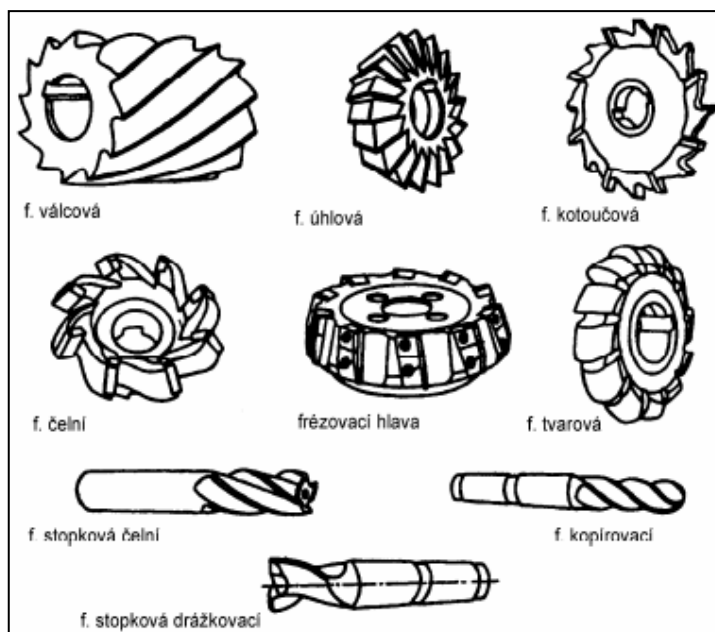
Fréza je vícebřítý nástroj, který má břity rozložené na povrchu válcové, kuželové nebo jiné rotační plochy. Břity jsou rozloženy mezi zuby frézy (Obr. 5). Fréza koná hlavní řezný pohyb a její osa je totožná s osou otáčení nástroje [13].



Obr. 5 Tvary zubů fréz [7].

Převážná část jsou frézy normalizované podle ČSN 22 2110 až 22 2199, ČSN (ON) 22 2210 až 22 2492. Vybrané frézy lze rozřadit do jednotlivých skupin (Obr. 6) [13] :

- dle nástrojového materiálu břitu – z rychlořezné oceli, slinutých karbidů, řezné keramiky, kubického nitridu bóru a diamantu,
- dle tvaru zubů – zuby frézované nebo podsoustružené,
- dle směru zubu vzhledem k ose rotace frézy – frézy se zuby přímými a se zuby ve šroubovici pravé nebo levé, popřípadě střídané,
- dle konstrukčního uspořádání – frézy celistvé, se vkládanými noži, dělené a sdružené,
- z hlediska geometrického tvaru – válcové nástrčné nebo se stopkou, čelní válcové frézy nástrčné nebo se stopkou, kotoučové frézy s přímými zuby nebo zuby ve šroubovici,
- z technologického hlediska – frézy na rovinné plochy a frézy na plochy tvarové,
- z hlediska způsobu upnutí frézy na stroj – frézy nástrčné a frézy se stopkou.



Obr. 6 Základní druhy fréz [14].

Čelní frézy mají zuby nejen na válcovém obvodu, ale i na jednom čele (Obr. 7). Čelní válcové frézy pracují zpravidla současně jak válcovou, tak i čelní plochou, a vytvářejí na obráběné součásti na jeden průchod frézy dvě nebo i tři vzájemně kolmé plochy. Čelní válcové frézy malých průměrů (do 20 mm) jsou vyráběny s válcovou stopkou, frézy středních průměrů (do 50 mm) s kuželovou stopkou s Morseovým kuželem.

Větší čelní válcové frézy jsou nástrčné na frézovací trn a mají proto ve svém těle díru. Stopkové frézy mají na konci stopky závit pro šroub, který prochází vřetenem a zajišťuje upnutí frézy. Nástrčné frézy mají na čele se zuby vybrání pro upínací šroub, který nesmí přečnivat přes čelní zuby, aby nedřel o obrobenou plochu. Při odbrušování čelních zubů se výška zahloubení pro upínací šroub zužuje, takže při větších odbřusech zubů je nutno zahloubení dále prohlubovat. Tato operace je zvláště velmi obtížná při opravách a údržbě kalených fréz.

Úhel čela a hřbetu na čelních zubech se měří v rovině kolmé k ostří. Úhel hřbetu se volí 5 až 12°, úhel čela je do značné míry určen stoupáním šroubovice obvodových zubů, bývá však zvláštní úpravou ostření odlišný. Čelo čelního zubu není pak částí šroubové plochy, nýbrž má úhel čela rozdílný a přechodovou částí přechází do šroubové plochy. Úhly čela se volí nejčastěji od 8 do 20° podle druhu obráběného materiálu, přičemž pro volbu sklonu čelního břitu platí uvedená zásada [15].



Obr. 7 čelní fréza [14].

2.2.1. Geometrie břitu frézy

Aby břit mohl odebírat třísky, musí k tomu být náležitě upraven. Každý zub má klínovité provedení zakončené břitem, tvořeným dvěma plochami (čelem a hřbetem), v jejichž průsečíku vznikne ostří, které má schopnost odřezávat třísky. Čím ostřejší klín břit má, tím snadněji vniká do materiálu.

Vzájemná poloha ploch břitu nástroje a obrobku vytváří soustavu úhlů, které říkáme geometrie břitu. Hodnoty jednotlivých úhlů jsou závislé na druhu obráběného materiálu a u normalizovaných fréz mají stanovenou hodnotu - příklady jsou uvedeny v následující tabulce [11]:

Tab. 1 Hodnoty úhlů závislé na materiálu.

Obrobený materiál	Úhel čela γ (°)	Úhel hřbetu α (°)
ocel do pevnosti 600 MPa	12-20	5-8
ocel do pevnosti 850 MPa	8-12	4-6
šedá litina do tvrdosti 120HB	6-10	5-6
šedá litina nad tvrdost 180HB	4-20	3-5
měď	12-20	5-6
mosaz, bronz	0-12	4-8
lehké slitiny	15-30	8-12
plasty	0-15	4-6

Mezi základní úhly na zubu nástroje patří:

a) Úhel hřbetu α – úhel svíraný mezi hřbetem zubu frézy a tečnou k obvodu nástroje (řeznou rovinou) (Obr. 8). Jeho úkolem je snižovat tření hřbetu zubu na obráběné ploše. Čím větší je jeho hodnota, tím je tření menší. Jeho velikost je však omezena (viz. Tabulka č. 1), aby nedocházelo k přílišnému zeslabování zubu a tím snižování jeho pevnosti.

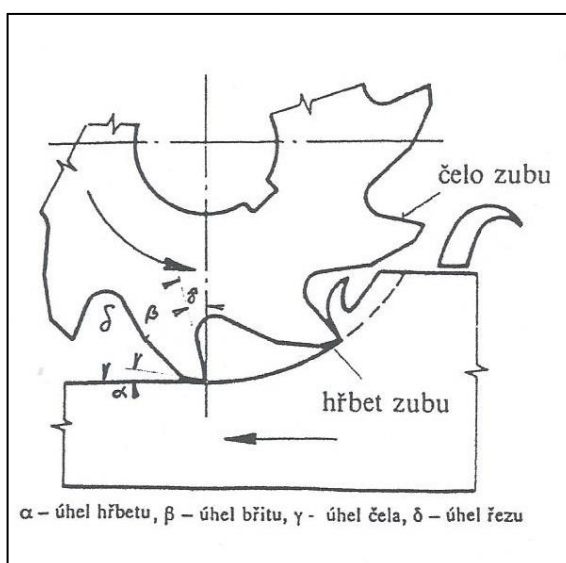
b) Úhel břitu β – úhel svíraný plochou hřbetu a plochou čela (Obr. 8). Čím menší tento úhel je, tím je snadnější jeho vnikání do materiálu. Jeho hodnota je omezena pevností břitu. Pro frézování měkkých a málo pevných materiálů mívá úhel β menší hodnotu, naopak pro tvrdé a pevné materiály musí mít hodnotu větší, aby snesl zatížení vyvolané velkým řezným odporem.

c) Úhel čela γ – úhel mezi plochou čela břitu a spojnicí špičky břitu se středem otáčení frézy (Obr. 8). Usnadňuje tvoření třísky a vnikání břitu do materiálu. Jeho rostoucí hodnota zeslabuje celý břit frézy, proto je také tabulkově omezena.

d) Úhel řezu δ – úhel, který svírá plocha čela a tečna k obvodu frézy (řezná rovina), je vlastně součtem úhlů břitu a hřbetu ($\delta = \alpha + \beta$) (Obr. 8).

e) Úhel sklonu ostří λ – úhel, který svírá osa otáčení frézy a tečna k šroubovici břitu. Vyskytuje se u nástrojů s břity šikmými, šroubovitými, střídavými a šípovými.

f) Úhel nastavení κ – úhel mezi ostřím frézy a rovinou kolmou na osu jejího otáčení [11].



Obr. 8 Geometrie břitu frézy [12].

2.2.2. Materiál fréz

Při frézování je nástroj značně mechanicky i tepelně namáhán. Aby nástroj byl schopen vykonávat svou funkci, musí být vyroben z vhodného nástrojového materiálu.

Mezi základní vlastnosti řezných materiálů pro výrobu fréz je: tvrdost, pevnost, houževnatost, odolnost proti otěru a tepelná vodivost. Žádný z řezných materiálů není tak univerzální, aby byl vhodný k obrábění všech materiálů. Existuje celá řada řezných materiálů lišících se svými vlastnostmi, a tím i vhodností použití pro obrábění konkrétního materiálu [16][17].

Jako materiál fréz se používají:

- a) Nástrojové oceli slitinové – kde pro třískové obrábění jsou z nich nejužívanější rychlořezné oceli (RO). Podle obsahu a množství legujících prvků např. Cr, V, Mn, Mo, W a další [16].
- b) Slinuté karbidy – jsou to nekovové řezné materiály vyráběné práškovou metalurgií z karbidů těžkých kovů: (karbidu wolframu, karbidu titanu, karbidu tantalu, pojivem je kobalt). Tepelná odolnost břitových destiček ze SK je 800° – 1000°C [17].
- c) Keramické řezné materiály – Zachovávají tvrdost i při teplotách 1 000° až 1 200° C. Pro jejich výrobu je výchozí surovinou oxid hlinitý (Al₂O₃). Vyrábějí se práškovou metalurgií, slinováním lisovaných prášků do tvaru řezných destiček [16].
- d) Tvrdokovy – materiál s vlastnostmi: vysokou tvrdostí, vysokou pevností v tlaku, vysokým modulem pružnosti, dostatečnou houževnatostí, nepatrnou tepelnou roztažností, dobrou obrobiteľnosť a nepatrnou tendencí k zavaření za studena [18].

2.2.3. Upínání obrobků a fréz

Obrobek musí být při frézování řádně upnut. Působí na něj velké řezné síly, protože třísku odebírá současně několik břitů. Tyto síly, jejichž velikost je proměnná, se snaží vychýlit obrobek ze správné polohy, do které byl ustaven.

Při upínání se musí dodržovat tyto hlavní zásady:

- upínací síla má stlačit obrobek na dosedací plochu a na opěrky,
- řezné síly musí při frézování působit proti tuhým opěrám,
- obráběná plocha má být co nejbližší k upínací ploše stolu. Je-li vysoko nad stolem, musí být dostatečně opřena,
- obráběcí i upínací plocha musí být co nejbližší konci vřetena,
- obrobek nesmí být deformován (prohýbán nebo zkrucován) [15].

Produktivita práce při frézování a jakost obrobeneých ploch závisí nejen na geometrickém tvaru nástroje, na volbě správných řezných podmínek a na materiálu nástroje, ale i na spolehlivém upnutí obrobku ke stolu frézky a na upnutí nástroje ve vřetenu. Při nesprávném upnutí frézy mohou řezné síly, vznikající při frézování, vyvolat chvění, jež způsobuje špatnou jakost obrobeneého povrchu, nepřesnost práce a rychlé opotřebení nástroje nebo dokonce jeho zničení [15].

2.3. Kinematika a základní parametry frézování

Hlavní, rotační pohyb u všech druhů frézování koná nástroj, posuvový pohyb je většinou přímočarý a koná ho obrobek, u okružního a planetového frézování může být i rotační a konat ho může obrobek nebo nástroj [23].

Mezi základní kinematické veličiny patří řezná a posuvová rychlost a posuv na zub.

výpočet řezné rychlosti:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m \cdot \text{min}^{-1}], \quad (1)$$

posuv na zub:

$$f_n = f_z \cdot z [mm], \quad (2)$$

posuvová rychlost:

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n [mm \cdot \text{min}^{-1}], \quad (3)$$

kde: D ...průměr nástroje [mm],
 n ...otáčky nástroje [min^{-1}],
 f_z ...posuv nástroje na zub [mm],
 z ...počet zubů (břítu) nástroje [-].

Dalším sledovaným parametrem je tloušťka odřezávané třísky, která se při čelním frézování (Obr. 9) mění v závislosti na úhlu posuvového pohybu a je navíc ovlivněna i úhlem hlavního ostří.

Jmenovitá tloušťka třísky se spočítá ze vztahu:

$$h_i = f_z \cdot \sin\varphi_i \cdot \sin\kappa_r \text{ [mm]}, \quad (4)$$

Vztah pro výpočet jmenovité šířky třísky:

$$b = \frac{a_p}{\sin\kappa_r} \text{ [mm]}, \quad (5)$$

Další sledovaný parametr je jmenovitý průřez třísky pro $\kappa_r = 90^\circ$:

$$A_{Di} = b \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot \sin\varphi_i \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (6)$$

Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky je dána vztahem:

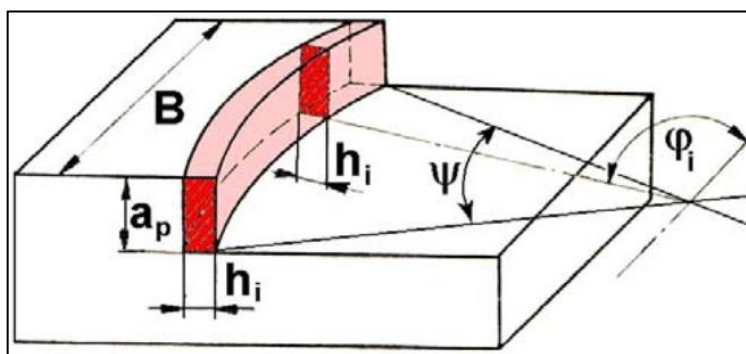
$$A_{Dmax} = a_p \cdot f_z \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (7)$$

kde: f_z ...posuv nástroje na zub [mm],

φ_i ...úhel posuvového pohybu [°],

κ_r ...úhel nastavení hlavního ostří [°],

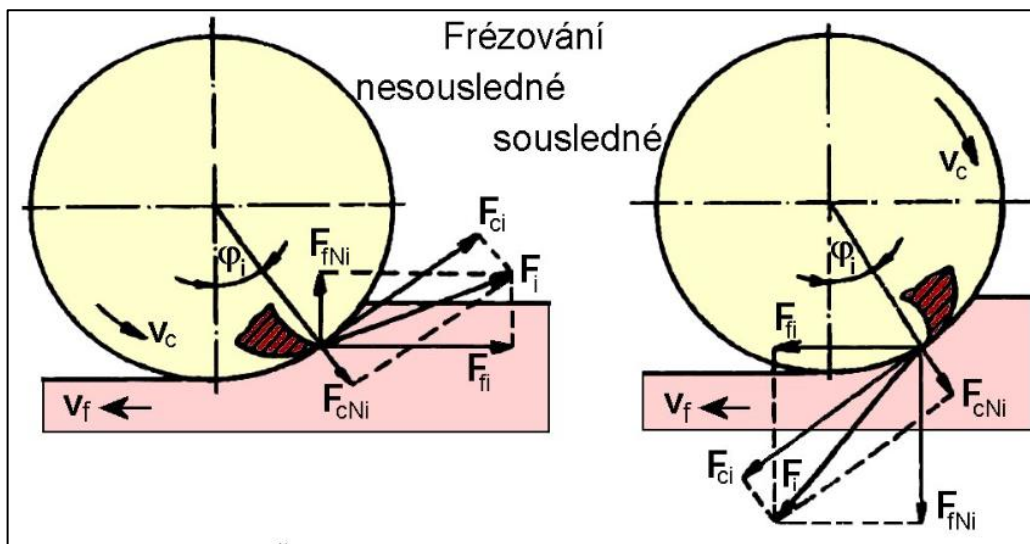
a_p ...hloubka řezu [mm].



Obr. 9 Průřez třísky při čelním frézování [23].

2.3.1. Řezné síly [23]

Při specifikaci řezných sil při frézování se vychází ze silových poměrů na jednom břitu, který je v poloze určené úhlem φ_i . Pro frézování nástrojem s přímými zuby se celková síla působící na břitu F_i rozkládá na složky F_{ci} a F_{cNi} , resp. na složky F_{fi} a F_{fNi} (Obr. 10).



Obr. 10 Řezné síly na zubu válcové frézy [23].

Výpočet řezné síly je dán vztahem:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \text{ [N]}, \quad (8)$$

Velikost měrné řezné síly se získá ze vztahu:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \text{ [Mpa]}, \quad (9)$$

počet zubů v záběru pro čelní frézování je dán vztahem:

$$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z \text{ [-]}, \quad (10)$$

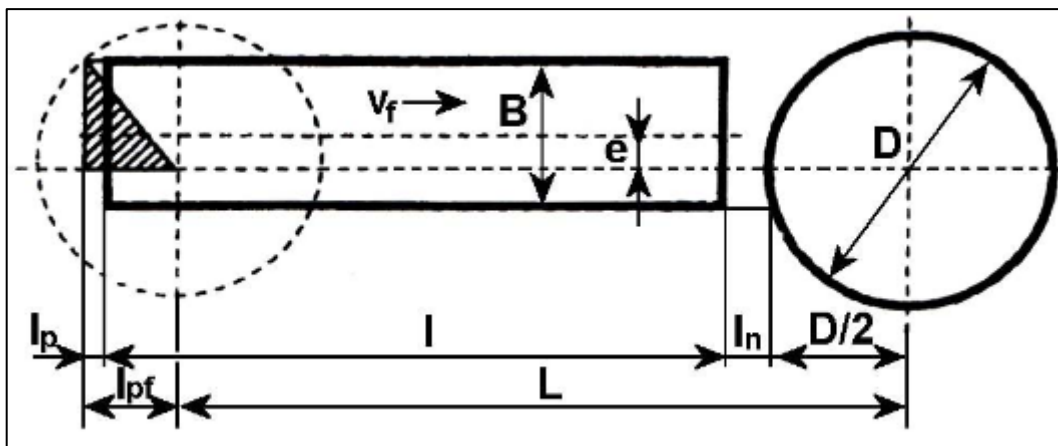
kde: C_{Fc} ...konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu [-],

x ...exponent vlivu tloušťky třísky [-],

ψ ...úhel záběru frézy [°].

2.3.2. Jednotkový strojní čas [23]

Hodnoty jednotkového strojního času pro základní případy frézování se vyjádří na základě poměrů naznačených na (Obr. 11).



Obr. 11 Dráha frézy pro asymetrické frézování [23].

Jednotkový strojní čas se získá ze vztahu:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} [\text{min}], \quad (11)$$

Dráha nástroje ve směru posuvového pohybu je dána vztahem:

$$L = l + l_n + l_p + l_{nf} [\text{mm}], \quad (12)$$

$$\text{kde: } l_{nf} = \sqrt{H \cdot (D - H)} [\text{mm}], \quad (13)$$

2.3.3. Řezné podmínky

Přesnost rozměrů a kvalita obrobku je při procesu obrábění ovlivněna řadou parametrů, hlavně řeznými podmínkami, materiálem obrobku, geometrií břitu nástroje, materiálem nástroje, tuhostí a pevností systému SNOP (stroj-nástroj-obrobek-přípravek).

Břity při frézování pracují za podmínek přerušovaného řezu s různou tloušťkou třísky. Kolísání teploty spolu s těmito rázy má za následek kromě klasického otěru i vylamování malých částic z břitu.

Volba řezných podmínek má hlavní význam při volbě způsobu obrábění. Například při hrubování je zásadou dosáhnout co největší úběr materiálu v závislosti na trvanlivosti nástroje. Trvanlivost fréz zvyšujeme použitím řezných kapalin. Hlavně u nástrojů z rychlořezné oceli, omezeně u nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutých karbidů [10][19].

Lze dosáhnout těchto hodnot přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu:

*Tab. 2 Hodnoty drsnosti povrchu a přesnosti rozměrů
pro různé způsoby obrábění.*

Způsob obrábění	Drsnost povrchu Ra [μm]	Přesnost rozměrů IT
Hrubování	> 6,3	≥ 12
Obrábění načisto	1,6 – 6,3	9 – 11
Jemné obrábění	0,2 – 1,6	5 – 8
Speciální dokončovací obrábění	< 0,2	< 5

Množství způsobů frézování a široký sortiment nástrojů umožňují dosáhnout řadu jakostí obrobeneé plochy. Přesnost rozměrů a tvaru je ovlivněna kromě geometrie nástroje a způsobem frézování i dalšími parametry, jako jsou řezné podmínky, naostření nástroje, tuhost stroje atd.. Drsnost povrchu je závislá hlavně na velikosti posuvu a řezné rychlosti, na tvaru špičky, velikosti fazetky u nástroje.

Hloubka záběru při frézování se pohybuje v rozsahu 0,5 až 20 mm i více, pro jednotlivé fáze frézování se volí obvykle v rozsahu:

Tab. 3 Hloubky záběru při frézování.

Způsob obrábění	Hloubka záběru [mm]
Hrubování	10 až 20 i více
Středně těžké frézování	2 až 10
Frézování načisto	0,5 až 2

Posuv na zub by neměl klesnout pod 0,05 mm, protože pak už se začíná projevovat vliv poloměru ostří břítu nástroje. To platí zejména pro nástroje s břitými z povlakovaných slinutých karbidů. Posuv na zub se obvykle pohybuje v rozsahu 0,05 až 0,4 mm, pro běžné a tvarové frézování se posuv na zub obvykle volí v rozsahu:

Tab. 4 Hodnoty posuvu pro běžné a tvarové frézování.

Způsob obrábění	Posuv [mm/ot]
Běžné frézování	0,3 až 2 (u velkých strojů i více)
Frézování tvarovými frézami	0,1 až 0,3

Řezné rychlosti pro frézování se obvykle pohybují v rozsahu 20 až 570 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ a jsou závislé zejména na druhu obráběného materiálu,

na materiálu nástroje a na způsobu frézování. Pro středně těžké frézování nástroji z RO a SK jsou v následujícím přehledu uvedeny orientační hodnoty řezných rychlostí [19]:

Tab. 5 Řezné rychlosti pro nástroje z SK a RO pro středně těžké frézování.

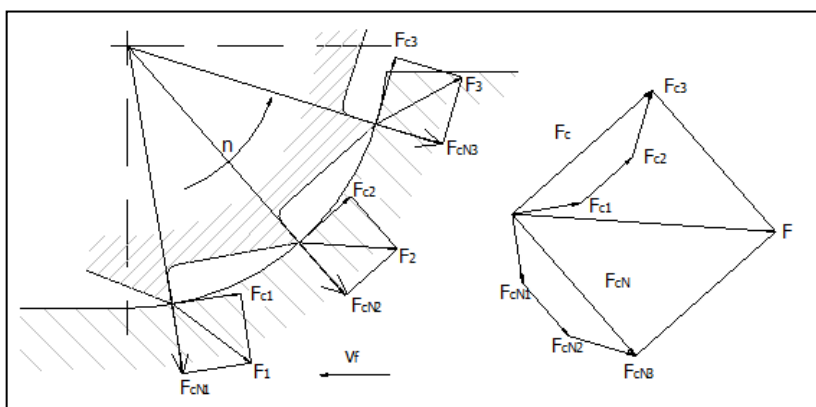
	Materiál nástroje	
	Rychlořezná ocel	Slinutý karbid
Materiál obrobku	Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	
Ocel, šedá litina	20 až 40	120 až 200
Měď	40 až 60	240 až 280
Hliník	120 až 250	450 až 570

2.3.4. Silové poměry

Při procesu obrábění je fréza zatěžovaná řeznými silami, které vznikají na břitu nástroje (Obr. 12). Síla a směr těchto sil je ovlivněna mnoha faktory např. materiálem obrobku, geometrií břitu, způsobem frézování, hloubkou úběru, velikostí opotřebení a řeznými podmínkami [5].

Výsledná síla se rozkládá do složek řezné síly F [N]:

- F_c – tangenciální složka řezné síly (působí ve směru vektoru hlavního řezného pohybu) udává velikost kroučícího momentu a výkonu potřebného pro frézování,
- F_{cN} – radiální složka řezné síly, která zatěžuje ložiska vřetena a stůl frézky,
- F_f – horizontální složka řezné síly, která určuje velikost posuvové síly,
- F_{fN} – vertikální složka řezné síly, která zatěžuje ložiska vřetena a stůl frézky.



Obr. 12 Síly působící na zuby při válcovém frézování [5].

2.4. Teplo a teplota řezání

Teplo je jedním z nejvýznamnějších faktorů v procesu obrábění. Vzniklé teplo má vliv na řezné vlastnosti nástroje, mění mechanické vlastnosti obráběného materiálu, v povrchových vrstvách ovlivňuje tření, zpevnění, pěkchování apod. Je tedy rozhodující sledovat teplotní poměry v místě řezu, případně tuto teplotu snižovat. Neboť se projeví na řezných vlastnostech nástroje a konečných vlastnostech obrobku.

Množství tepla vznikajícího při procesu obrábění je závislé na velikosti práce vynaložené na odebrání třísky. Je to práce nutná na překonání vnějšího tření a na plastické deformace obráběného kovu. Teplo je tedy soustředěno v plasticky deformovaných objemech třísky, ve vrstvách obráběného povrchu a na třecích plochách. Celkové množství vyvinutého tepla lze vyjádřit takto:

$$Q = Q_{def} + Q_{tř} \quad (14)$$

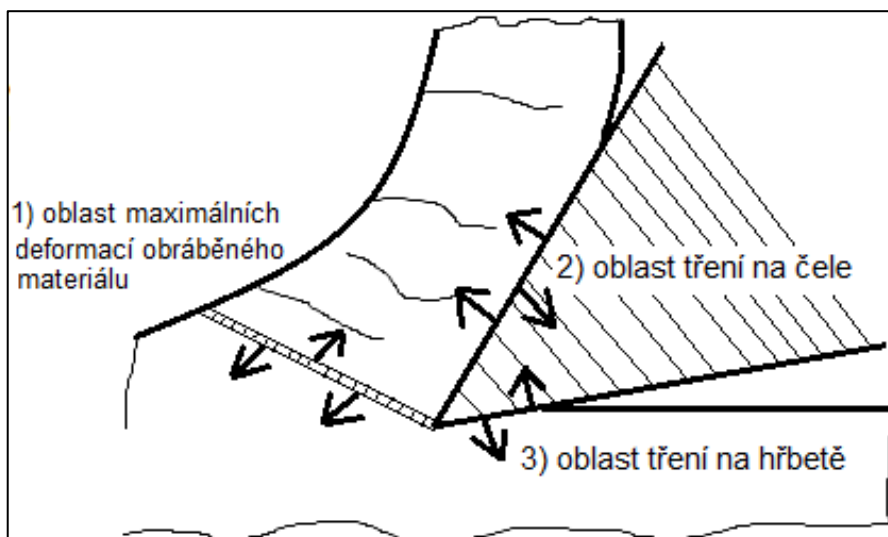
kde:

Q - celkové množství tepla,

Q_{def} - teplo vzniklé z práce pružných a plastických deformací,

$Q_{tř}$ – teplo vzniklé z práce tření.

Ohniska vzniku tepla jsou tam, kde během obrábění dochází k transformaci deformační práce a práce tření v teplo (Obr. 13).



Obr. 13 Šíření tepla při obrábění [4].

Intenzita vzniklého tepla v jednotlivých oblastech se mění s mechanicko-fyzikálními vlastnostmi obráběného materiálu, s řeznými podmínkami, s geometrií nástroje, s kvalitou řezných ploch nástroje a dalšími faktory.

Vzniklé teplo potom přechází do oblasti s nižší teplotou (Obr. 14) a tepelná bilance v místě řezu se dá vyjádřit jako [4]:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (15)$$

kde:

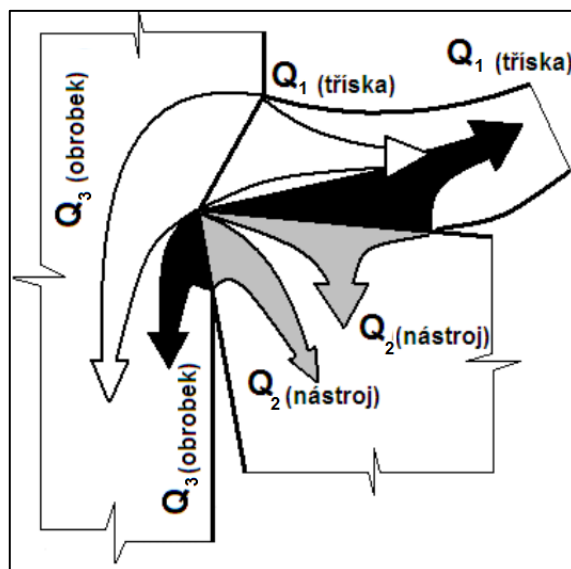
Q – celkové množství tepla vzniklého v místě řezu,

Q_1 – množství tepla odvedené v třísku,

Q_2 – množství tepla zůstávající v nástroji,

Q_3 – množství tepla zůstávající v obrobku,

Q_4 – množství tepla vysálané do okolí.



Obr. 14 Vznik a šíření tepla v zóně řezání [22].

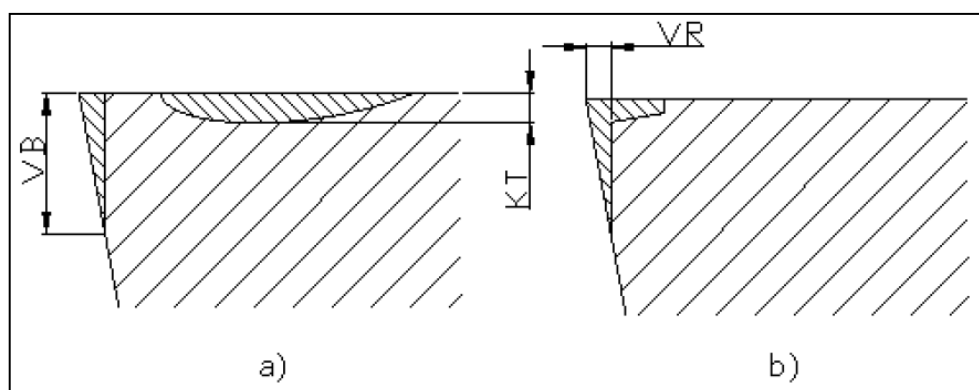
2.5. Tvorba třísky

Nástroj působí řeznou silou na obrobek a způsobuje deformaci, která přechází z elastické přes plastickou, až dojde k vyčerpání plastičnosti materiálu a odstřižení jeho částice (třísky). Kovové materiály lze rozdělit do dvou skupin z hlediska tvoření třísky. Rozlišujeme materiály houževnaté a materiály křehké. Při obrábění houževnatých materiálů dochází ke vzniku plynulé třísky ve tvaru souvislého pásu. Při použití rychlořezných ocelí jako materiálu nástroje a menších řezných rychlostech se tvoří na břitu nástroje nárůstek. S využitím slinutých

karbidů jako materiálu nástroje a vyšších řezných rychlostí se nárůstek nevytváří. U obrábění křehkých materiálů se tvoří drobná tříška [1].

2.6. Opotřebení a hospodárná trvanlivost fréz

Řezné podmínky, které je možné při frézování volit, značně závisí na charakteru a intenzitě opotřebení břitu použitých fréz. Břity fréz pracují za podmínek přerušovaného řezu s proměnnou tloušťkou třísky. Kolísání teploty a rázy na břit způsobují, že kromě normálního otěru dochází i k vytváření trhlin a vylamování drobných částic z břitu.



Obr. 15 Charakter opotřebení břitu fréz
a) frézování na hrubo, b) frézování na čisto [2].

Otupení na čele zubu má obvykle charakter žlábků (Obr. 15a). Při menších řezných rychlostech se jako kritérium opotřebení uvažuje opotřebení na hřbetu VB, jelikož velikost KT žlábků je malá (Obr. 15b). Při frézování na čisto je důležitým kritériem rozměrové opotřebení VR, na jehož velikosti závisí rozměry obrobku.

Velikost přípustných hodnot opotřebení je dána typem a velikostí frézy, druhem řezného materiálu a je udávána v normativních řezných podmínkách. Hlavní zásadou při volbě řezných podmínek je dosáhnout co možná největšího úběru materiálu při hospodárné trvanlivosti nástroje, ta se však pro různé typy fréz liší. Velikost hospodárné trvanlivosti je velmi výrazně ovlivněna náklady na strojní hodinu obráběcího stroje a řezivostí nástrojového materiálu.

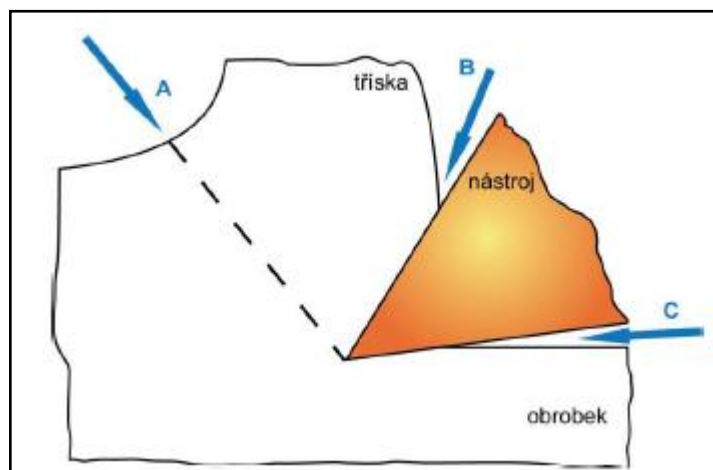
Trvanlivost fréz a kvalitu obrobené plochy lze zvýšit použitím procesních kapalin. Procesní kapaliny se uplatňují hlavně u nástrojů z rychlořezné oceli, omezeně při práci s frézami se slinutými karbidy [2].

3. Procesní média

Proces řezání probíhá vždy v určitém prostředí, které svými charakteristikami ovlivňuje průběh procesu, vlastnosti obrobku i hospodárnost celé technologie. Většina operací obrábění kovů je neproveditelná bez použití pomocných prostředků ulehčujících odvod třísky a omezujících vyvíjení tepla, respektive odvádějících teplo vznikající při řezání kovu.

Řezné prostředí 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 obrobeneého povrchu obrobku, řeznou rychlost, posuv, dobu obrábění, množství spotřebované energie.

Vhodným řezným prostředím lze obvykle zvýšit hospodárny úběr třísky o 50 % až 200 % v porovnání s prací za sucha. Řezné prostředí ovlivňuje tvorbu mechanismu třísky, produktivitu obrábění, náklady na obrábění. To bývá většinou vytvořeno pomocí chladicí kapaliny, řezných olejů, olejové mlhy, procesními pastami, plynem, procesní kapalinou nebo prací za sucha. Důležitým faktorem při volbě řezného prostředí není pouze určení vhodného typu chladicí kapaliny, ale také způsob jak a odkud bude chladicí kapalina do místa řezu dopravována. Pro přívod chladicího média do místa řezu existují tři základní směry přívodu (Obr. 16).



Obr. 16 Přívod chladicí kapaliny do místa řezu [19].

Na umístění přívodu chladicího média neexistuje jednoznačný názor, neboť závisí na druhu obrábeneého materiálu. Přívod ve směru A má výrazný vliv na stáčení třísky, na délku styku mezi třískou a čelem nástroje a také na místo maximální teploty ve vztahu k řezné hraně nástroje. Chlazení vnější strany třísky

(přívod A) snižuje délku styku mezi třískou a nástrojem, a to může mít dobrý vliv na trvanlivost nástroje.

Další důležité faktory přívodu chladicího média do místa řezu jsou: úhel dopadu chladicího média do místa řezu; velikost tlaku, pomocí kterého kapalina dopadá do místa řezu; množství chladicí kapaliny (průtok); přesnost dopadu; přívod kapaliny (vnitřkem nástroje – vrtání, či z vnějšího prostředí – soustružení). Výše uvedené parametry mají vliv na trvanlivost bříty nástroje a jakost obroběné plochy. Volba procesního média závisí na druhu obráběného materiálu, obráběcí operace, geometrii nástroje a daných řezných podmínkách [19].

Prostředí, v němž probíhá řezný proces, ovlivňuje svými fyzikálními vlastnostmi ve větší nebo menší míře ekonomické i kvalitativní výsledky obrábění. Pro některé případy obrábění může vhodně zvolené optimální řezné prostředí zvýšit hospodárny úběr proti práci bez chlazení.

Procesním médii mohou být tuhá maziva, kapaliny, plyny nebo přechod mezi kapalinou a plynem, kapalinové mlhy. Nejčastěji používaným médiem jsou však kapaliny [2].

3.1. Chlazení procesními kapalinami

Kapaliny se staly nejpřínosnějším médiem, protože splňují základní požadavky na trvanlivost nástroje a jakost obroběného povrchu. Především rezné kapaliny nejlépe plní svoji funkci při odvodu tepla z místa řezání a zároveň lépe snižují jak vnější, tak vnitřní tření [20].

Řezné kapaliny vytváří tyto základní účinky:

- a) chladicí účinek,
- b) mazací účinek,
- c) čistící účinek,
- d) ochranný účinek,
- e) provozní stálost,
- f) zdravotní nezávadnost.

Chladicím účinkem chápeme schopnost kapaliny odvádět teplo z místa řezu do okolí. Tuto schopnost mají každé kapaliny, které smáčí povrch kovu, pokud existuje tepelný spád mezi kapalinou a povrchem. Při třískovém obrábění nastává tento jev vždy. Čím větší je teplota v místě řezu, tím větší jsou požadavky

na odvod tepla. Neodváděné teplo se akumuluje v obrobku a může vést k nepřesnostem v obrobení. Chladicí účinek je důležitý především pro trvanlivost nástrojů z nástrojových a rychlořezných ocelí.

Odvod tepla se provádí oplachem nástroje, třísky i obrobku proudem kapaliny v místě řezu. Část kapaliny se odpaří vlivem nadměrného místního přehřátí a zbytek proudí zpět do nádrže, kde se opět ochladí předáním tepla vzduchu a částem stroje.

Chladicí účinek kapalin závisí na jejich smáčecí schopnosti, na tepelné vodivosti a měrném teple. Čím větší tyto veličiny budou, tím větší bude i chladicí účinek kapaliny [2][4].

Mazací účinek je schopnost kapaliny vytvořit na povrchu kovu přínavou tlaku vzdornou vrstvu, která brání přímému styku kovových povrchů a zmenšuje tření mezi třískou a nástrojem i mezi nástrojem a obrobkem. Při řezání kovů se objevují veliké tlaky, proto nikdy nemůže dojít ke kapalnému tření. Mezního tření se však může dosáhnout i při velkých tlacích, váže-li se kapalina na materiál obrobku chemicky v mikroskopickou povrchovou mezní vrstvu o malém součiniteli tření.

Mazací schopnost kapaliny má vliv na zmenšení tření, tedy i na velikost řezných odporů, spotřebované energie, lepší odvod třísky a tím i klidnější chod stroje. Proto se této vlastnosti využívá především při obrábění na čisto.

Mazací schopnost kapaliny je závislá na pevnosti mezní vrstvy a její viskozitě. S rostoucí viskozitou se projevuje zhoršení odvodu tepla. Kapalina lpí více na třískách, čímž vznikají velké ztráty jejím odvodem v třískách [2][4].

Velmi důležitým úkolem procesní kapaliny je odstraňování třísek a pilin, které vznikají při obrábění. Shlukování a slepování kovových částíček s prachem z ovzduší způsobí zhoršení řezné schopnosti nástrojů a poškození funkčních ploch obráběcích strojů. Pokud se tyto příměsi dostanou do nádrže, musí se tam usadit, aby kapalina proudící do oblasti řezu byla čistá. Pro tento účel jsou výhodnější kapaliny s malou viskozitou bez aktivních přísad.

Čisticí účinek se používá téměř u všech výrobních operací a je také jedním z důvodů použití kapalin při třískovém obrábění [2].

Ochranný účinek řezného prostředí se projevuje tím, že nenapadá kovy a nezpůsobuje korozi. Tento požadavek je důležitý proto, aby nebylo nutné výrobky mezi operacemi konzervovat, avšak také proto, aby se během práce nepoškozovaly součásti strojů.

Požadavek ochranného účinku v sobě také zahrnuje podmínku, aby kapaliny nerozpouštěly nátěry obráběcích strojů a nebyly agresivní vůči gumovým těsněním [21].

Provozní stálost se hodnotí podle doby výměny. Delší doba používání je podmíněna neměnnými vlastnostmi chladicí kapaliny. Stárnutí řezného média olejového typu se projevuje tvořením pryskyřičnatých usazenin, které mohou způsobit i poruchu stroje.

Stárnutí má vliv na zhoršování vlastností média např.: zmenšení mazacího účinku, ztrátu ochranných schopností, korozi a hnilobný rozklad. Provozní stálost řezného média závisí na jeho fyzikálních a chemických vlastnostech a na pracovní teplotě [24].

Důležitou vlastností procesních kapalin je i zdravotní nezávadnost. Při práci na obráběcích strojích přichází obsluhující pracovník do přímého styku s procesními kapalinami. Řezné prostředí tudíž nesmí být zdraví škodlivé, nesmí obsahovat látky dráždicí sliznici a pokožku a nesmí být jedovaté. Rovněž nesmí docházet k zamořování ovzduší nepříjemným zápachem.

Zdravotní nezávadnost kapalin závisí také na jejich provozní stálosti a čistotě. Znečištěná nebo bakterie obsahující kapalina může způsobovat zdravotní obtíže, které se u této kapaliny běžně neprojevují [21].

Základním kritériem pro rozdělení procesních kapalin je převažující vlastnost, a to buď chladicí, nebo mazací účinek. Podle toho hlediska rozdělujeme kapaliny na [21]:

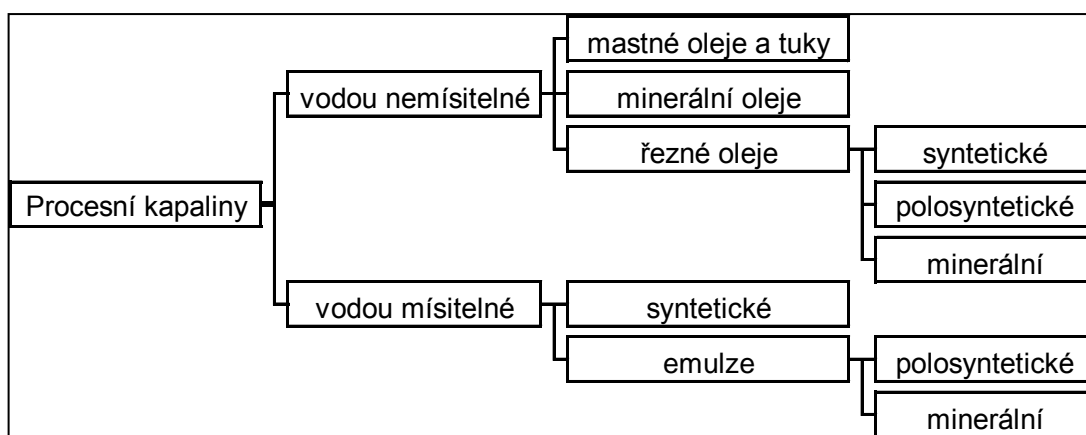
- a) chladicí kapaliny,
- b) řezné oleje.

V dnešní době je však snaha 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 [21]:

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

Další možné pojetí rozčlenění procesních kapalin (Obr. 17) :



Obr. 17 Schéma rozdělení procesních kapalin [21].

Vodou mísitelné kapaliny jsou kapaliny, jejichž hlavní složkou je voda, která má nejlepší chladicí účinek. V závislosti na fyzikálně-chemickém složení může mít voda značně rozdílné chladicí účinky. Častou nevýhodou jsou její vlastnosti podporující korozi (důvodem jsou Cl^- ionty), dále obsahuje množství soli (zejména Ca^{2+} a Mg^{2+}), které mohou vytvářet v rozvodném systému a na stroji nerozpustné usazeniny, navíc neupravená voda je nositelem bakterií a dalších mikroorganismů. Mezi další zápory samotné vody patří její relativně malý smáčecí účinek (vysoké povrchové napětí).

Korozivní charakter vodou mísitelných procesních kapalin je možné vyjádřit hodnotou pH. Při hodnotě $\text{pH} = 7$ mluvíme o neutrálním roztoku, je-li hodnota pH vyšší, pak se jedná o roztok alkalický, přičemž platí, že z dermatologického hlediska je maximální přípustná hodnota $\text{pH} = 9,5$. Je-li hodnota pH naopak nižší, pak mluvíme o kyselých roztocích. Alkalické roztoky snižují stupeň rizika vzniku koroze u železných kovů, naopak zvyšují toto nebezpečí u neželezných kovů [25].

Vodou nemísitelné procesní kapaliny jsou zejména produkty jinak nazývané „řezné oleje“ s určením pro operace honování, lapování, superfiniš, frézování, vrtání a protahování atd., které se před použitím nemíchají s vodou. Výhody oproti procesním kapalinám, které se míchají s vodou, spočívají v tom, že nabízejí delší životnost nástroje a lepší povrchovou úpravu pro obtížné operace prováděné nízkou řeznou silou. Údržba oleje je navíc mnohem méně komplikovaná a životnost oleje je podstatně delší. Při použití nechlorových procesních kapalin se nevyskytují žádné problémy s korozí, narušováním a rozleptáváním barvy a těsnících prvků. Znečištění (kontaminace) hydraulickými oleji a oleji pro kluzná vedení znamená menší problém než s vodou mísitelnými produkty. Navíc únik a prosakování hydraulických olejů a jiných maziv se zvládá lépe, jsou-li použity kompatibilní (slučitelné) oleje. Nové technologie umožňují harmonizaci nebo přizpůsobení procesních kapalin („řezných“ olejů) s oleji např. hydraulickými, ložiskovými nebo převodovými na mazání strojů, a tím významně přispívají ke snížení výrobních nákladů.

Hlavní nevýhodou ve srovnání s vodou mísitelnými procesními kapalinami je jejich nižší chladicí vlastnost. Tato situace nastává hlavně u operací s vysokými řeznými rychlostmi. Výjimkou je pouze vysokorychlostní broušení, kde vyšší mazivost oleje snižuje množství vyprodukovaného tepla. Další nevýhodou je vysoká hořlavost olejů, stejně tak jako velké riziko exploze olejové mlhy a výparů. Proto další velké nákladové faktory pro uživatele, se kterými se musí počítat, jsou přísná ochranná opatření proti vzniku požáru a nebezpečí exploze. Viskozita samotných olejů je vyšší, než u vodou mísitelných procesních kapalin, tím jsou dány jejich zbytečné ztráty při výnosu na třískách a obrobených součástkách. Nicméně tato nevýhoda může být vykompenzována zvoleným účinným odolejováním (odstředěním) komponentů, brusného kalu a třísek [25].

Použité procesní kapaliny se musí zlikvidovat nezávadným způsobem, aniž by došlo k znečištění půdy a okolních vod.

Ropné oleje se většinou mohou po usazení nečistot a zbavení vody použít jako maziva ve vlhkém a prašném prostředí. Největší problémy jsou však s likvidací emulzních kapalin, kde je nutné zabránit pronikání ropných látek do vodních toků.

Zestárlé emulzní kapaliny obsahují velké množství škodlivých látek, které je nutné z emulze odstranit. Běžná čistírenská technologie spočívá v usazování a separaci oleje, jenž se částečně vylučuje, a ve vyčiření zůstávající emulze vhodným chemickým prostředkem. Vyčiřený kal se buď odvodní a odveze na kalové pole, nebo se spálí jako usazený olej [2].

3.2. Chlazení plyny

Většina obráběcích operací se provádí při dokonalém chlazení a mazání, tj. s přívodem procesní kapaliny. Náklady na likvidaci těchto kapalin po jejich využití rostou, a tak se objevuje nová strategie, zaměřená na snižování množství procesních kapalin na výrobních linkách. Snaha vyrovnat se s touto skutečností a omezit problémy s likvidací procesních kapalin vede k uplatňování obrábění za sucha – bez chlazení. Takovéto tendence se mohou uplatnit jen tehdy, bude-li zaručeno, že obrábění bez chlazení zabezpečí stejnou jakost obrobku a stejný čas na jejich opracování jako při chlazení.

Chlazení plynem se začalo používat při obrábění pomocí slinutých karbidů a řezné keramiky. Plyn je přiváděn pod tlakem do místa řezu. Má nízký chladicí i mazací účinek. Vhodné plyny jsou CO₂, N₂, inertní argon nebo freon pod vysokým tlakem, pomocí kterého se odstraňují třísky a nečistoty při obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Nevýhodou chlazení plynem jsou poměrně vysoké náklady a riziko nebezpečí při jeho používání [11].

3.2.1. Chlazení pomocí podchlazeného vzduchu

Chlazení pomocí podchlazeného vzduchu má velkou variabilitu použití, např.: chlazení při třískovém obrábění různých materiálů (plastů, dřeva, kompozitů a dalších materiálů), chlazení forem pro technologii vstřikování plastů, chlazení slévárenských forem.

Při chlazení nedochází ke kontaminaci okolí nástroje. Není zapotřebí investovat náklady do nákupu chladících emulzí. Výhodou je samočistící schopnost vzduchu, který pomáhá čistit obrobek od nečistot a třísek. Používá se v provozech, kde je nebezpečí exploze.

Ke vzniku podchlazeného vzduchu se používá zařízení zvané vírová trubice.

Vírová trubice je konstrukčně velmi jednoduché zařízení, které dokáže rozdělit proud stlačeného vzduchu na studenou a teplou část. Samotné zařízení je

bezúdržbové, bez nutnosti přivádět elektrický proud, bez rizika výbuchu a bez pohyblivých částí.

Tyto vlastnosti zajišťují vírové trubici široké uplatnění v průmyslových odvětvích a všude tam, kde se využívá proud studeného či teplého vzduchu nebo oba současně.

Fyzikální jev, který je klíčový pro chod vírové trubice, byl objeven francouzským fyzikem Georgem Ranquem již v roce 1930.

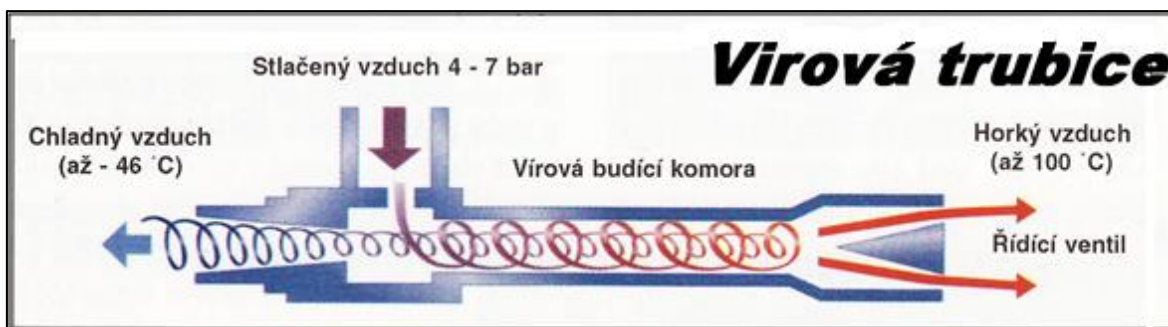
George Ranquem se pokusil o představení samotného objevu vědecké společnosti, ale i tento počín byl přijat s velkou nedůvěrou a články z třicátých let dvacátého století byly na dlouhou dobu ignorovány.

Ve čtyřicátých letech dvacátého století se jevem začal zabývat německý fyzik Rudolf Hilsch, který na základě vlastních pokusů publikoval článek „Použití expandujícího plynu v centrifugálním poli v chladících procesech“ v časopise Review of Scientifics Instrument 18 z roku 1947. Po vydání článku byl považován za objevitele, proto byla z počátku vírová trubice pojmenována Hilschova trubice a později Ranque-Hilschova trubice (či v anglickém jazyce Vortex tube) [26].

Princip vírové trubice lze popsat následným způsobem:

Vírová trubice (Obr. 18) upravuje obyčejný stlačený vzduch do dvou vzduchových proudů, jeden horký a druhý studený. Bez pohyblivých částí, bez elektrické energie, bez freonu mohou vírové trubice vyrábět chlazení až do 1 758 W nebo teploty v rozsahu: -46 °C až $+100\text{ °C}$ použitím pouze filtrovaného stlačeného vzduchu o teplotě 20 °C a tlaku 6,9 bar. Řídicí ventil na výfuku horkého vzduchu reguluje teploty a proudění v širokém rozsahu.

Stlačený vzduch vstupuje do tangenciálně vrtaného stacionárního generátoru (kde dosahuje až rychlosti zvuku), který nutí vzduch rotovat trubicí podél vnitřní stěny směrem k horkému řídicímu ventilu při rychlosti až 1 000 000 ot. /min. Část tohoto vzduchu vystupuje přes jehlový ventil jako horký výfuk vzduchu. Zbývající vzduch je tlačěn zpět středem proudu vzduchu, kde stále se točící se pohybuje pomalejší rychlostí při konání jednoduché (přirozené) výměny tepla. Vnitřní pomaleji se pohybující sloupec vzduchu nechává teplo vnějšímu rychleji se pohybujícímu sloupci vzduchu. Když pomalejší vnitřní sloupec vzduchu prochází středem stacionárního generátoru a vystupuje studeným výfukem, dosáhne extrémně nízké teploty [27].



Obr. 18 Virová trubice [27].

V současné době se k experimentálním účelům využívá zařízení Cold Air Gun, které je postaveno na principu vírové trubice. Vytváří proud mrazivého vzduchu pro spoustu průmyslových aplikací při bodovém chlazení. Vírová trubice převádí stlačený vzduch do studeného proudu vzduchu o teplotě až -46 °C . Cold Air Gun se používají v různých průmyslových procesech, výrobě, montáži a balení jako univerzální zdroj bodového chlazení.

Chlazení studeným vzduchem významně zvyšuje životnost nástroje (až o 50%) a produktivitu práce (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 [19].



Obr. 19 Cold Air Gun [19].

3.2.2. Chlazení pomocí zkapalněného dusíku

Z největší části se dusík používá jako inertní ochranný plyn v železářském a ocelářském průmyslu a v dalších metalurgických a chemických procesech.

Kryogenní chlazení je současným trendem, kdy je snaha docílit velmi nízkých teplot a jeho následným kladným působením na materiál i nástroj. Americký

národní institut standardů a technologií určil hranici mezi chlazením a kryogenním chlazením na 93,15 K ($-180\text{ }^{\circ}\text{C}$). Toto rozhodnutí se jeví rozumně, protože bod varu permanentních plynů (vodík, kyslík, dusík...) se nachází pod touto hranicí oproti bodu varu běžných chladicích kapalin, které jsou nastaveny opačně. Hranice však není nastavena zcela pevně a může mít určité odchylky. Pro kryogenní chlazení se využívá hlavně kapalného dusíku – LN2 (jeho fyzikálních vlastností), který je pro tyto případy naprosto ideální. Dusík se uchovává při teplotě okolo $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, tím pádem máme umožněno použití rychlé a laciné zásoby chladu. Kapalný dusík lze po jeho zahřátí a následném odpaření využít po procesu jako plyn v prvotní jakosti (např. pro inertní atmosféru). Ke zkapalňování plynu (dusíku) slouží kryogenní expanzní turbíny.

Používají se dvě základní metody:

a) Nepřímé chlazení:

Metoda nepřímého chlazení spočívá v ochlazování místa řezu přívodem dusíku pře trysku umístěnou mimo obráběcí nástroj. Tato metoda velmi závisí na tepelné vodivosti materiálu nástroje (obrobku), kvůli zavedení chladicího účinku až do místa řezu přes odcházející trysku, která brání přímému přístupu do místa řezu.

b) Přímé chlazení:

Tento způsob kryogenního chlazení umožňuje přivedení tekutého dusíku přes utvařecí trysku přímo mezi trysku a čelo nástroje. Proud dusíku přes utvařecí trysku pomáhá zvednout trysku a tím zároveň sám sobě umožňuje lepší přístup k ochlazovanému místu a chladí ještě lépe. Na rozdíl od předchozího způsobu tryska neblokuje proudění tekutého dusíku [19].

3.2.3. Chlazení pomocí zkapalněného oxidu uhličitého

Skleníkový plyn oxid uhličitý je známý s pokračujícím současným tempem růstu jeho koncentrace v ovzduší, obavách z vývoje vedoucího k celosvětovému suchu, zvedání mořských hladin, růstu počtu bouří a záplav a nedostatku potravin. Je však možné využít to, čeho máme dost, k něčemu užitečnému, a to k ochlazování obrobků a snižování tření na jejich povrchu.

Jedním z účinných způsobů chlazení plynem je totiž chlazení stlačeným CO_2 . Princip spočívá v přívodu tenkého paprsku plynu do místa řezu pod tlakem

0,5 – 7 MPa. Tento způsob chlazení je zvláště vhodný u těžkoobrobitelných materiálů. Tato metoda, i když přináší možnost zvýšení výkonu obrábění, má řadu nevýhod. Vysoké náklady na CO₂ a jisté nebezpečí při jeho používání. Vyžaduje se totiž dokonalé odsávání a větrání pracoviště [19].

Jednou z technologií chlazení je tryskání pevného oxidu uhličitého. Používá se pro obrábění špatně obrobitelných materiálů například titanu, slitin niklu, či duplex ocelí, kdy při obrábění probíhá velké tepelné zatížení s vysokým opotřebením nástroje. S cíleným chlazením lze dosáhnout větší životnosti nástroje a možností zvýšit i řezné podmínky. Kryogenní proces lze provádět nejen s tekutým dusíkem, ale také s přiváděným tekutým kyslíčným oxidem uhličitým CO₂ ve formě tryskaného sněhu.

Technologie využívá proud malých ledových částic o velikosti mikronu. Tryskající zmrzlé krystaly suchého ledu jsou vytvářeny dějem, kterému fyzikové říkají adiabatické rozpínání. Princip je velmi jednoduchý, do tenké trubičky se vede pod tlakem kapalný oxid uhličitý [19].

3.3. Obrábění bez chlazení

Obrábění bez chlazení („na sucho“) znamená vyloučení či minimalizaci používání tzv. „procesních kapalin“, při současném snížení nákladů na jejich pořízení, filtraci, recyklaci a konečně také likvidaci.

Jde o jeden z nových trendů v oblasti mazání a chlazení je eliminace řezné kapaliny. Důležitým faktorem při obrábění za sucha je teplota v místě řezu, která ovlivňuje především životnost nástroje. Je dokázáno, že snížením teploty o 25°C se jeho životnost prodlouží až trojnásobně. Při obrábění za sucha odpadají náklady spojené s řeznou kapalinou, ale teplota v místě řezu bývá řádově o 100°C vyšší. Náklady na aplikaci řezných kapalin se pohybují v rozmezí 7 % až 16 % výrobních nákladů vztahovaných na jeden obrobek, zatímco náklady na nástroje se pohybují v rozmezí 2 % až 4 %. Obrábění za sucha se používá především u soustružení při vyšších rychlostech. Při soustružení za sucha s vyšší řeznou rychlostí se teplota v místě řezu téměř shoduje s teplotou, která vznikne v místě řezu při soustružení s chlazením.

Mezi nevýhody této metody patří nutnost použití nástrojů, které odolávají vysokým teplotám, a to až 1300°C, nutnost úpravy geometrie nástroje a například, u technologie hlubokého vrtání, řešit odvod třísek z místa řezu.

Výhodou je zlepšení pracovního prostředí vzhledem k pracovníkům, kde odpadají případné problémy s alergiemi a nepřiměřenými reakcemi pokožky. Odpadá také nutnost skladových ploch pro kapaliny a likvidace použitých kapalin [19].

4. Experimentální část

Experimentální část popisuje základní měřené parametry, jakým způsobem byly měřeny a jaké vybavení bylo použito. Jsou zde míněny i základní vlastnosti obráběného materiálu.

Tab. 6 Metodika frézování.

Měřené parametry	Řezná síla
	Teplota řezného nástroje a obrobku
	Trvanlivost břítu nástroje
	Drsnost povrchu
	Rozměrová přesnost
Obráběný materiál	Ocel 12 050.1 (C45+N)
Rozměry polotovaru	80x60x13 mm
Stroj	Frézka FNG 32
Nástroj	Fréza čelní \varnothing 32 mm
Nástroj – vyměnitelné břitové destičky	ADEW 120308 SR, 8230
Řezné prostředí	zkapalněný dusík
	řezná kapalina EOPS 1030
	řezná kapalina HOCUT 795B

4.1. Materiál 12 050.1 [29]

Ocel 12 050 je uhlíková ocel vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení. Konkrétně 12 050.1 je ocel normalizačně žíhaná.

Tab. 7 Chemické složení.

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
Chem. Složení	0,42	0,5	0,17	max	max	max	max	max
[%] Dle ČSN:	0,50	0,8	0,37	0,25	0,3	0,3	0,04	0,04

Tab. 9 Mechanické vlastnosti dle ČSN 41 20 50.

			12 050.1
Mez kluzu	R_{p0,2}	MPa	min. 235
Mez pevnosti	R_m	MPa	min. 540
Tažnost	A₅	%	min. 17
	Tvrдост	HB	max 225
Kontrakce	Z	%	
Modul pružnosti v tahu	E	GPa	211
Modul pružnosti ve smyku	G	GPa	79

4.2. Charakteristika použitých strojů

Příprava vzorků byla zahájena na stroji ARG 300 Plus H. F. (Obr. 20) od firmy Pilous -TMJ s.r.o., kde byly nařezány polotovary.



Obr. 20 Pásová pila na kov ARG 300 Plus H.F.

Tab. 12 Technické parametry ARG 300 Plus H. F.

ARG 300 PLUS H.F.	Výkon motoru	Rychlost posuvu pásu	Rozměry	Hmotnost
	2,3Kw	15-90m/min	1600x950x1600	570kg

Úprava polotovarů na požadovaný rozměr byla provedena na frézce FNG 32 (Obr. 21) od společnosti TOS Olomouc s.r.o.



Obr. 21 Frézka FNG 32.

Tab. 13 Technické parametry frézky FNG 32.

Frézka FNG 32.		
Charakteristika	Hodnota	Jednotky
Rozměr pracovní plochy	800 x 400	[mm]
Maximální zatížení stolu	350	[kg]
Pracovní zdvih podélný	600	[mm]
Pracovní zdvih příčný, svislý	400	[mm]
Posuv X, Y	15-1000	[mm/min]
Posuv Z	6-400	[mm/min]
Rychloposuv X, Y	2000	[mm/min]
Rychloposuv Z	800	[mm/min]
Rozsah otáček vřetena	50-4000	[ot/min]
Počet rychlostních stupňů vřetena	2	[°]
Natočení vertikálního vřetena	±90	[°]
Výkon hlavního motoru vertikálního vřetena	4	[kW]
Výkon posuvného motoru vertikálního vřetena	1,1	[kW]
Celkový příkon stroje	22	[kVA]
Hmotnost stroje	2500	[kg]
Zastavěná plocha	2070x2120	[mm]
Výška stroje	2115	[mm]

4.3. Procesní média pro experimenty

Zkapalněný dusík je bezbarvá kapalina uchovávaná při teplotě $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kovové materiály při ochlazení na teplotu kapalného dusíku mění své mechanické vlastnosti. O několik procent zpravidla vzroste Youngův modul pružnosti, s čímž souvisí i zvýšení rychlosti šíření zvuku, a také snížení meze únavového lomu, materiál se stává křehčím [33].

Procesní kapalina HOCUT 795 B je kapalina na bázi minerálního oleje. Používá se pro chlazení všech druhů kovů. Zaručuje dobré mazání a ochranu proti korozi, prodlužuje životnost nástroje a zlepšuje jakost povrchu obráběné součásti [34].

PARAMO EOPS 1030 je polosyntetická univerzální obráběcí kapalina. S vodou tvoří stabilní mikroemulzi s vyváženým chladícím a mazacím účinkem. Vyniká dobrou ochrannou schopností proti atmosférické korozi a nízkou pěnivostí. Je vhodná pro obrábění kovových i nekovových materiálů. [35]

4.4. Příprava procesních médií pro experimenty

Procesní kapaliny byly namíchány s koncentrací 5%. Tato koncentrace byla určena pomocí ručního refraktometru RLC (Obr. 22). Refraktometr slouží k určení koncentrace vodou mísitelných chladicích kapalin.



Obr. 22 Refraktometr.

Kapalný dusík byl odebírán v Dewarových nádobách (Obr. 23) od firmy Linde. Do místa řezu byl z nádoby dopravován pomocí aparatury (Obr. 24).



Obr. 23 Dewarova nádoba.



Obr. 24 Aparatura pro čerpání dusíku.

4.5. Řezné podmínky pro experimentální měření

Tab. 8 Řezné podmínky pro frézování.

Parametr	Hodnota
Řezná rychlost v_c	141 – 191 m/min
Otáčky n	1400 – 1900 min^{-1}
Posuv f	0,2 – 0,4 mm/ot
Hloubka záběru a_p	1–2 mm

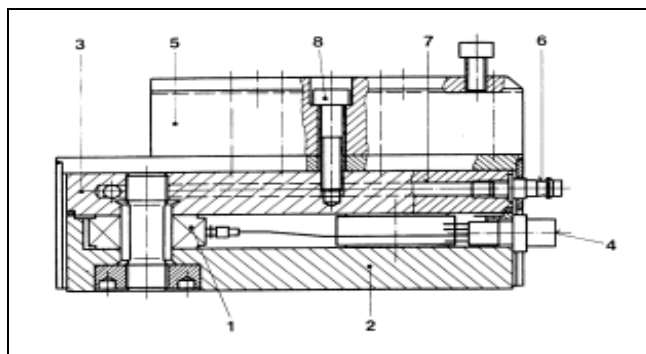
4.6. Měřené parametry

V této kapitole jsou uvedeny parametry měřené při experimentu vlivu různých procesních prostředí na technologii frézování. Parametry jsou stručně popsány a u každého je uveden způsob měření a použitá zařízení v laboratořích Katedry obrábění a montáže.

4.6.1. Řezná síla

Měření složek řezné síly a jejich točivých momentů se provádí prostřednictvím dynamometrů, jedná se o přímé měření a měří se na základě deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek během obrábění. Dynamometr musí zaručit měření požadované veličiny ve zvoleném rozsahu s maximální přesností. Měření musí proběhnout nezávisle na provozních vlastnostech přístroje.

K měření řezných sil bude použit piezoelektrický dynamometr KISTLER, typ 9265B (Obr. 25).



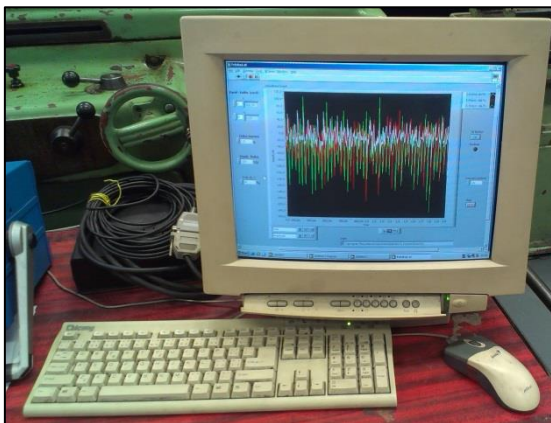
Obr. 25 Dynamometr KISTLER typ 9265B [15].

1 – piezoelektrický snímač, 2 – základová deska, 3 – vrchní deska, 4 – konektor, 5 – nožový držák, 6 – vstup pro chladivo, 7 – chladicí systém, 8 – šroub pro upevnění nožového držáku

Piezoelektrické dynamometry využívají pro snímání deformace piezoelektrického jevu, který je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů (křemen, materiály na bázi titaničitanu barnatého, Seignettovy soli a podobně) při mechanickém zatížení.

Základem piezoelektrického snímače pro tyto druhy dynamometrů je měřicí destička vhodně vyříznutá z příslušného krystalu. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly a s poklesem zatížení se lineárně snižuje, až zcela vymizí při zatížení nulovém [19].

Pro vyhodnocení výstupních signálů byl použit program Labview 6.1 (Obr. 26), který je nainstalovaný na PC. Tento software používá pro měření univerzální měřicí kartu PCI-6023E, pomocí které je program schopen získávat výstupní signály z připojených zařízení. Signály do této karty jsou zesíleny pomocí nábojového zesilovače 5019B 140 (Obr. 27).



Obr. 26 program Labview 6.1.

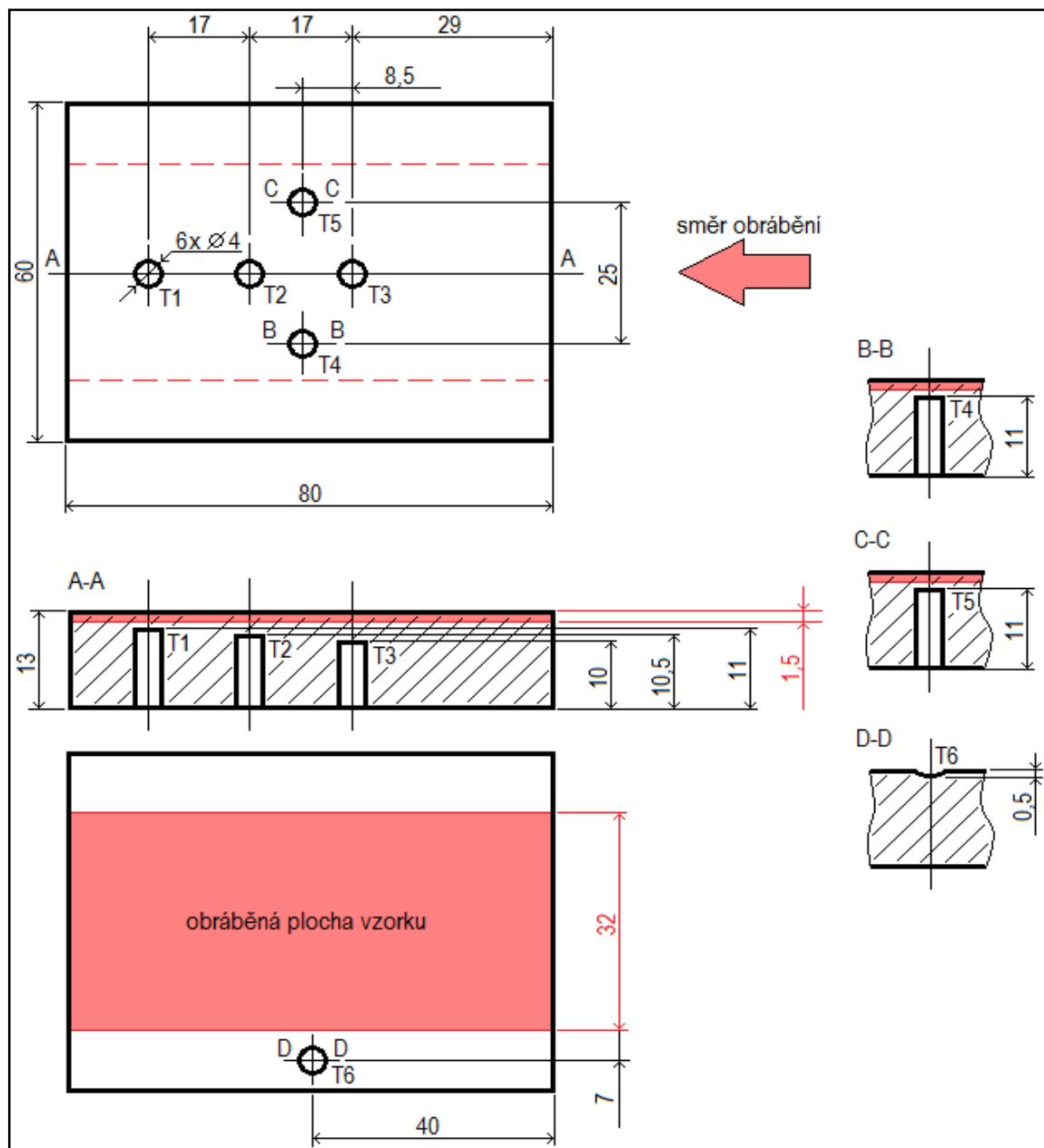


Obr. 27 Nábojový zesilovač 5019B 140.

4.6.2. Teplota obrobku

Při procesu obrábění je jedním z nejdůležitějších parametrů teplota. Teplota má vliv na všechny další parametry, a tím ovlivňuje celý proces obrábění. Závisí na ní možnosti a vhodnost použití různých rezných rychlostí, posuvů, hloubky řezu a také ovlivňuje trvanlivost nástroje.

K měření teploty obrobku budou použity termočlánky (Obr. 28).



Obr. 28 Rozmístění termočlánků na obrobku [19].

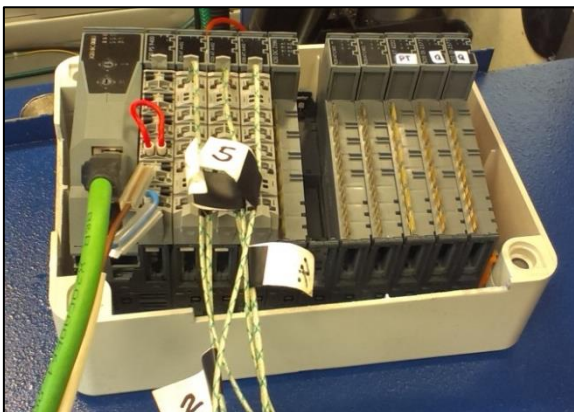
V praxi se využívá několik metod měření teploty v místě řezu. Je to měření pomocí:

- termočlánků, kde se měří vznikající termoelektrické napětí,
- termistorů, které se využívají pro měření změny elektrického odporu se změnou teploty,
- teplotních indikátorů, kde sledujeme změnu skupenství nebo barvy při dosažení určité teploty,
- pyrometrů a termovizí, kde se měří tepelné záření vyzařované měřeným tělesem.

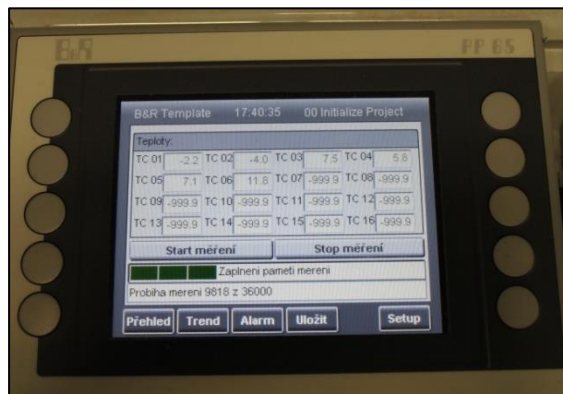
Při měření termočlánky se využívá tzv. termoelektrického jevu. Tento jev využívá vzniku termoelektrického napětí (termoelektromotorické síly), v obvodu tvořeného dvěma různými vodiči, jejichž konce jsou vodivě spojeny, jestliže jsou oba spoje udržovány na různých teplotách. Při obrábění se ho využije tak, že měřicí spoj je umístěn do místa měření teploty a srovnávací spoj je udržován na známé teplotě (obvykle teplota okolí).

K těmto vodičům je pak připojen milivoltmetr. Velikost vznikajícího termoelektrického napětí však závisí nejen na rozdílu teplot, ale i na druhu materiálů obou vodičů tvořících termočlánek. Pro praktická měření teploty lze využít jen některé dvojice kovů nebo slitin. Musí být sestaveny tak, aby vzniklé termoelektrické napětí bylo dostatečně velké v rozsahu předpokládaných teplot [30].

Pro měření teploty byly použity termočlánky typu K, které jsou schopny snímat teploty v intervalu od minimální teploty -270°C až do maximální teploty 1372°C . Vodiče termočlánek K jsou ze dvou materiálů, tj. Ni–Cr (+) a Ni–Al (–), které jsou kondenzátorovou svářečkou (Obr. 29) uchyceny v místě snímání (Obr. 30). Termočlánky jsou zapojeny do sběrnice (Obr. 31), kde dochází k převodu mV na $^{\circ}\text{C}$, a poté jsou data transportována a ukládána na flash disk přes provozní jednotku (Obr. 32) [19].



Obr. 31 Sběrnice s termočlánky.



Obr. 32 Provozní jednotka PP65.



Obr. 29 Kondenzátorová svářečka.



Obr. 30 Zapojení termočlánků na vzorek.

4.6.3. Trvanlivost břítu nástroje

Oddělování třísky od obrobku je proces, který je doprovázen vysokou teplotou a tlakem. Při tomto procesu dochází ke kontinuálnímu vytváření kovově čistého povrchu, kdy je materiál náchylný k chemickým reakcím a difuzním procesům. Většina obráběných materiálů obsahuje tvrdé částice různého druhu. Tyto částice nezdědka dosahují tvrdosti materiálu břítu nástroje. Dochází tak ke kombinaci mechanických, tepelných, chemických a abrazivních faktorů, které zatěžují břit nástroje, kde toho zatížení se projeví opotřebením nástroje.

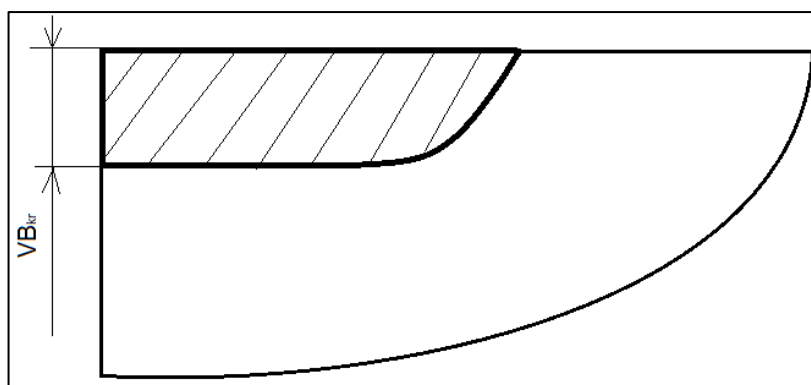
Základní mechanismy opotřebení:

- abraze (brusný otěr vlivem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje),
- adheze (vznik a okamžité následné porušování mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky, v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů),

- difúze (migrace atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak, a z ní vyplývající vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje),
- oxidace (vznik chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí),
- plastická deformace (důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení, kumulovaného v čase), která se může ve svém nejnepříznivějším důsledku projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení,
- křehký lom (důsledek vysokého mechanického zatížení, např. přerušovaného řezu, nehomogenity a vměstky v obráběném materiálu, atd.).

Na to, zda se bude nástroj opotřebovávat více na hřbetě nebo na čele, mají vliv i další faktory, jako jsou např.: geometrie nástroje, druh operace a v neposlední řadě i řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, šířka záběru ostří, řezné prostředí). V podstatě lze proces obrábění sledovat tolika způsoby, kolik signálů o svém okamžitém stavu vysílá do svého okolí [31].

Při zkouškách trvanlivosti u technologie frézování bude sledován abrazní otěr hřbetu nástroje. Jako mezní hodnota bude zvolena hodnota šířky opotřebení na hřbetu $VB_{kr} = 0,3$ mm (Obr. 33).

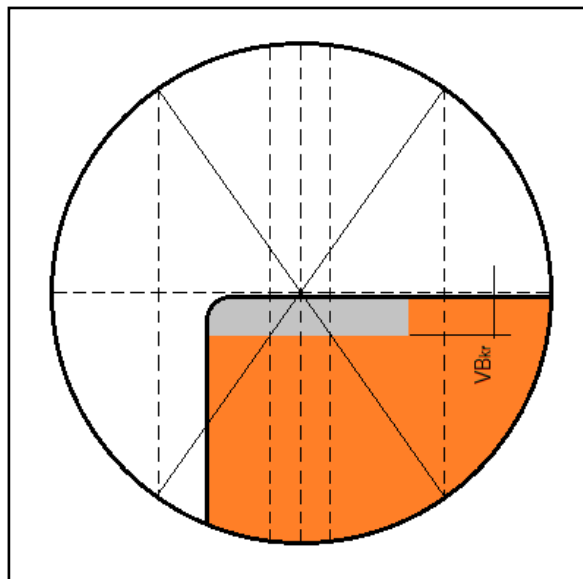


Obr. 33 Měřené opotřebení VB [19].

Měření opotřebení břitové destičky bylo prováděno na mikroskopu ZEISS (Obr. 34). Tento mikroskop umožňuje posuv v lineárním směru v osách X, Y a dále rotační pohyb kolem osy Z. Pohyb je vykonáván pomocí vodících šroubů na vodících lištách. Hodnoty se odečítají pomocí mikrometrických hlavic, které udávají rozlišení 0,01 mm. Polohování měřeného vzorku se provádí optickým způsobem přes okulár pomocí nitkového kříže (Obr. 35)



Obr. 34 Dílenský mikroskop
ZEISS [19].



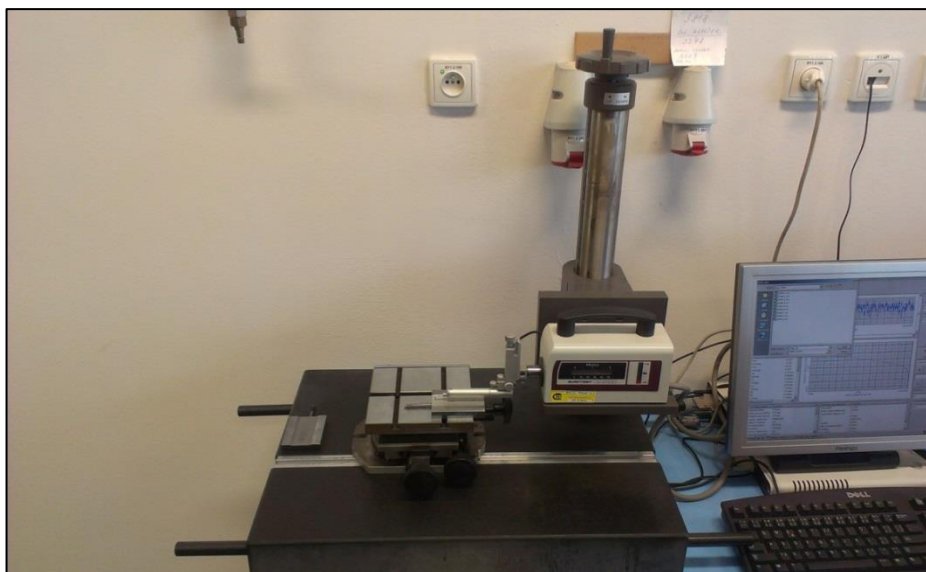
Obr. 35 Nitkový kříž [19].

4.6.4. Drsnost povrchu

Povrch obrobku není v žádném případě ideálně hladký. Pokaždé vykazuje určitý stupeň drsnosti, který je dán mikronerovnostmi vzniklými při dané technologii obrábění.

Stopy, které zanechává břit nástroje na obrobku definují drsnost povrchu. Druh a stupeň drsnosti závisí na způsobu obrábění, na fyzikálních a mechanických vlastnostech obráběného materiálu, tvaru a geometrii břitu, na řezných podmínkách a hlavně na velikosti posuvu a řezné rychlosti. Dále může být drsnost ovlivňována tuhostí soustavy stroj-nástroj-obrobek-přípravek, způsobem upnutí obrobku, druhem procesního média a opotřebením nástroje [32].

Popis měřicího zařízení pro měření drsnosti povrchu: Profiloměr Mitutoyo SurfTest SV-2000N2 (Obr. 36).



Obr. 36 Příklad pro měření drsnosti MITUTOYO SURFTEST 2000-SV.

Profiloměr pracuje na principu dotykové metody snímání povrchu a skládá se z mechanické a elektronické části. Snímání povrchu se realizuje pomocí mechanické části, a to použitím hrotu, který zjišťuje nerovnosti povrchu. Pohyb hrotu je transformován v převodníku na elektrický signál, který je zpracován do souřadnicového záznamu profilu povrchu. Data jsou zpracována pomocí softwaru „Surfpak“ v připojeném počítači. Tento software dokáže vyhodnotit parametry drsnosti dle různých norem např. : ISO, DIN a JIS. Zvládá také zobrazení profilu povrchu v různém nastavení a vyjádření pomocí zvoleného diagramu. Nasnímané souřadnice lze jednoduše použít ke zpracování pro další výpočetní program díky tomu, že jsou ve formátu * csv.



Obr. 37 Dotek s diamantovou špičkou [19].

K měření drsnosti povrchu pomocí přístroje Mitutoyo SurfTest SV–2000N2 se jako koncový člen soustavy používají doteky s diamantovou kuželovou špičkou (Obr. 37).

Z velkého počtu parametrů drsnosti povrchu, které umožňuje software Surfpack vypočítat, byly pro vyhodnocení naměřených hodnot prvních vzorků předběžně zvoleny následující parametry:

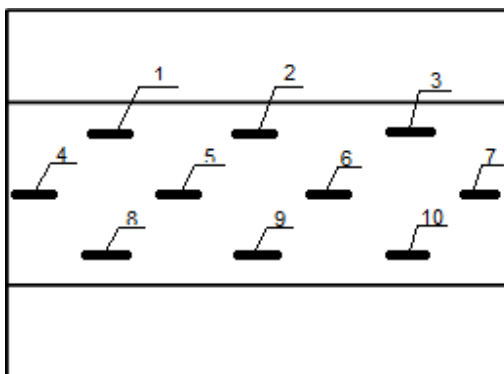
- Ra** - průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu,
- aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic v rozsahu základní délky,
- užíván v praxi při označování drsnosti na výkresech.
- Rz** - největší výška profilu,
- součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky,
- doporučen z důvodu jeho mezinárodního používání při charakterizování drsnosti povrchu strojních součástí.
- Rt** - celková výška profilu,
- součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky [15].

Tab. 9 Technická specifikace profiloměru Mitutoyo Surftest SV-2000N2.

Parametr	Hodnota
Maximální posuv	50 mm
Maximální zdvih	800 μm
Výškové přestavení	300 mm

Popis měření drsnosti povrchu:

Měření drsnosti povrchu bude probíhat v předem určených místech (Obr. 38). Snímač ujede po povrchu vzdálenost 4,8 mm, z každé strany se 0,4 mm ořízne a vyhodnocování proběhne na dráze 4 mm. Hodnoty jednotlivých parametrů se spočítají pomocí ovládacího softwaru [19].



Obr. 38 Místa měření drsnosti.

4.6.5. Rozměrová přesnost

Vyrobené plochy se vždy liší od těch ideálních, které jsou znázorněny na výkrese svými rozměry a vzájemnou polohou. Nejsou nikdy úplně přesné. Každá vyrobená součást je vyrobena s určitou přesností. Pro tento případ se využívají rozměrové tolerance nebo také úchyly rozměrů, drsnosti povrchu, tvaru a polohy. V praxi se především dohlíží, aby funkční plochy, ty které se stýkají s jinými a zajišťují správnou funkci součásti, byly vyrobeny dle stanovených úchylek či tolerancí, čili s určitou povolenou nepřesností od základního rozměru.

K měření rozměrové přesnosti bude použit digitální třmenový mikrometr (Obr. 39), digitální posuvné měřítko (Obr. 40).



Obr. 39 Třmenový mikrometr.

Popis měřicího zařízení pro měření drsnosti povrchu:

Digitální třmenový mikrometr:

Tab. 10 Technická specifikace třmenového mikrometru.

Parametr	Hodnota
Rozsah	0–25 mm; 25–50 mm
Rozlišení	0,001 mm

Digitální posuvné měřítko:

Tab. 11 Technická specifikace digitálního posuvného měřítka.

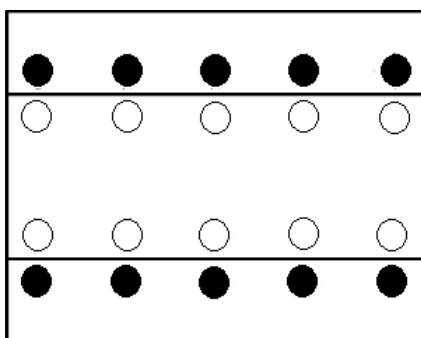
Parametr	Hodnota
Rozsah	0–150 mm
Rozlišení	0,01 mm

Na frézovaném vzorku budou měřeny dva rozměry (Obr. 41, 42):

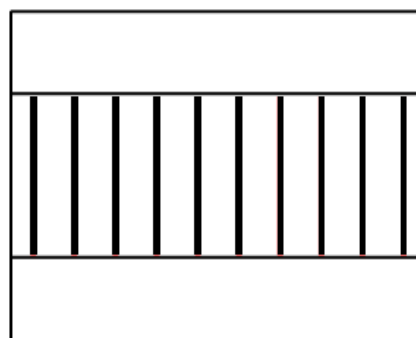
- hloubka drážky pomocí digitálního třmenového mikrometru o rozsahu 0–25 mm,
- šířka drážky pomocí digitálního posuvného měřítka o rozsahu 0–150 mm.



Obr. 40 Digitální posuvné měřítko.



Obr. 41 Místa pro měření hloubky drážky vzorku [19].



Obr. 42 Místa pro měření šířky hloubky drážky vzorku [19].

5. Experimentální měření

V této kapitole jsou uvedeny výsledky měření, které byly provedeny v laboratořích Katedry obrábění a montáže.

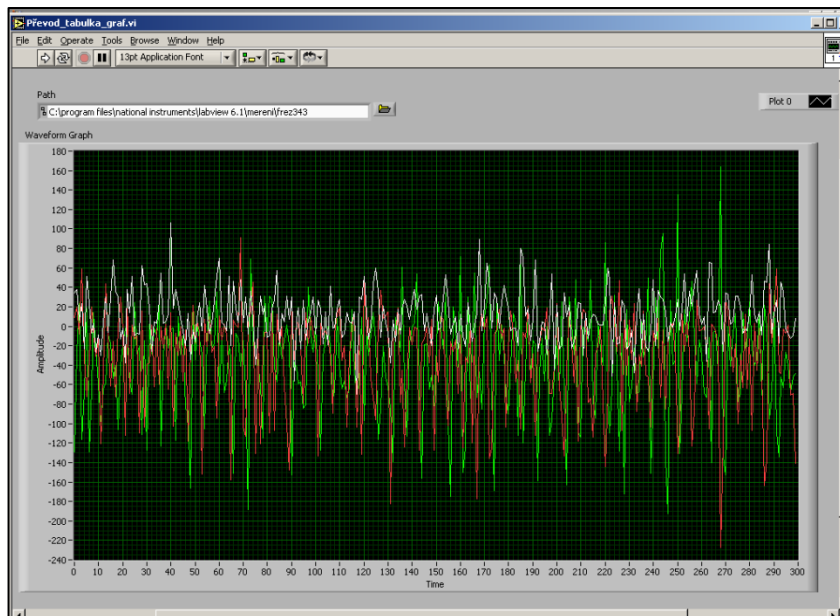
Řezné podmínky pro veškeré experimenty byly následující:

- otáčky 1800 ot/min.
- posuv 25mm/min.
- hloubka řezu 1,5mm,

Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány a jsou shrnuty do výsledných tabulek a grafů pomocí softwarů Microsoft Excel 2010. Tyto tabulky a grafy jsou uvedeny v přílohovém CD.

5.1. Měření řezné síly

Pro měření řezných sil byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER, typ 9265B (viz kapitola 4.6.1). Výsledky byly zpracovány programem Labview 6.1. Měření proběhlo na pěti vzorcích pro každé chladicí médium.



Obr. 43 Záznam měření řezných sil v programu Labview 6.1.

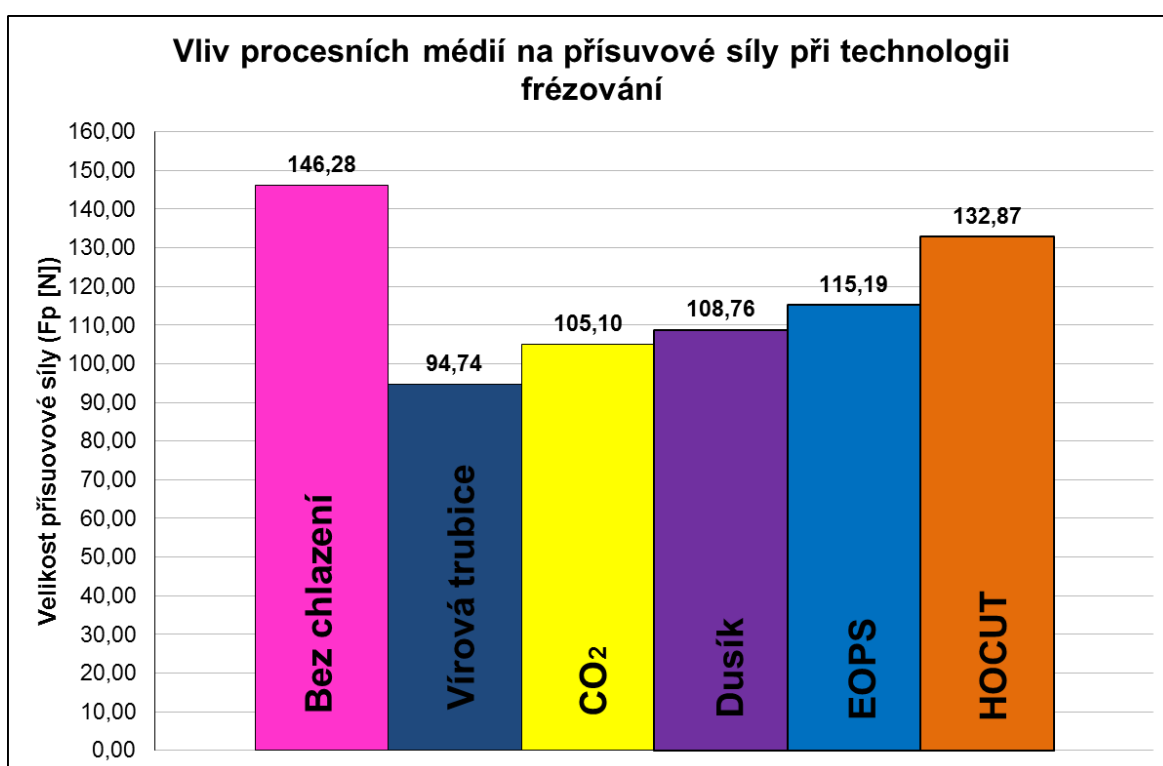
Na záznamu programu (Obr. 43) jsou znázorněny tři složky řezných sil působících při technologii frézování. Bílou barvou je zobrazena hlavní složka řezné síly F_c [N], červenou síla příusovová F_p [N] a zeleně síla posuvová F_f [N].

Z grafu byly odečteny hodnoty znázorňující konkrétní velikost řezných sil. Hodnoty byly zaznamenány do tabulky (Tab. 12), následně sestrojeny grafy. Řezné podmínky pro měření řezných sil byly posuv 25 mm/min při hloubce záběru 1,5mm.

Tab. 12 Výsledné střední hodnoty řezných sil.

	F_p [N]	F_f [N]	F_c [N]
Bez chlazení	146,28	158,90	48,08
Vírová trubice	94,74	122,76	33,98
CO ₂	105,10	117,08	36,06
Dusík	108,76	121,61	40,32
EOPS	115,19	125,59	49,09
HOCUT	132,87	117,50	48,15

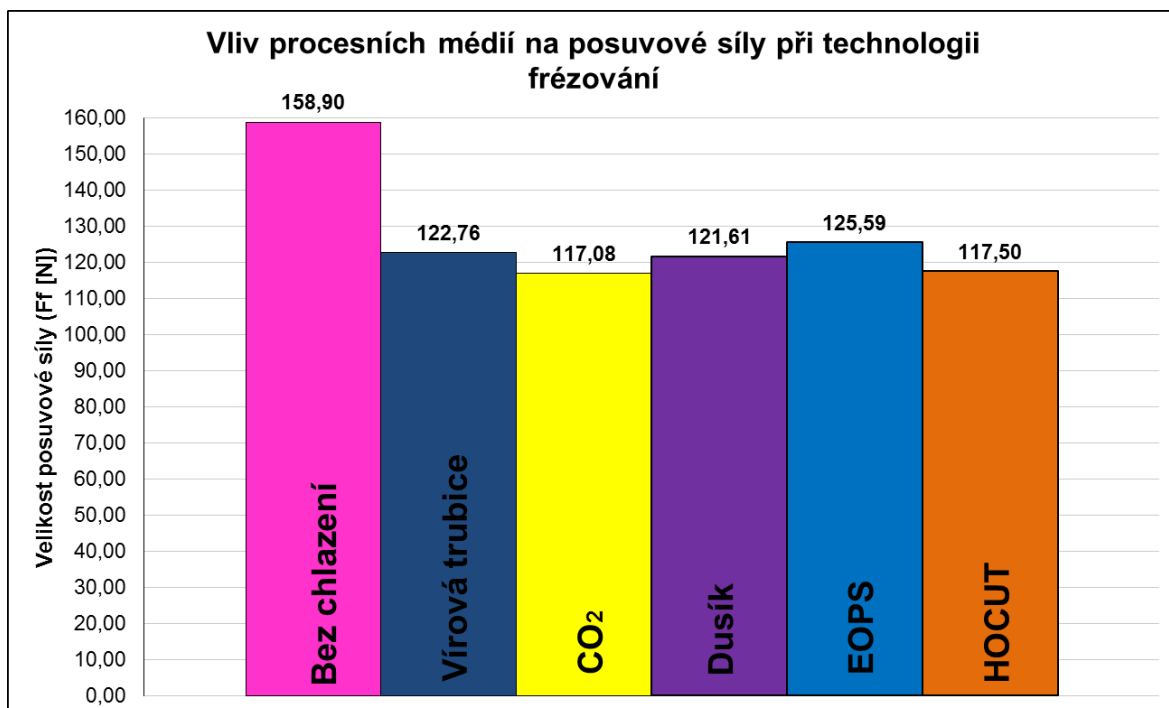
Nejnižší přísuvoivá síla byla naměřena při chlazení pomocí podchlazeného vzduchu, kde se hodnota síly dostala na 94,74N. Naopak nejvyšší hodnota 146,28N byla zaznamenána při frézování bez chlazení, za působení okolního vzduchu. Pomocí podchlazeného vzduchu bylo dosaženo o 35,2 % menší přísuvoivé síly než při frézování bez chlazení. Za použití chladícího média CO₂ byla naměřená hodnota přísuvoivé síly o 28,2 % menší než při obrábění za sucha. Tekutý dusík prokázal snížení této síly o 25,7 %. V porovnání dvou použitých procesních kapalin, byly naměřené hodnoty nižší u kapaliny EOPS. Přísuvoivá síla naměřená při použití kapaliny EOPS byla nižší o 21,3 % a při použití kapaliny HOCUT byla nižší o 9,2 % v porovnání s obrábění bez chlazení.



Graf 1. Porovnání středních hodnot přísuvoivých sil.

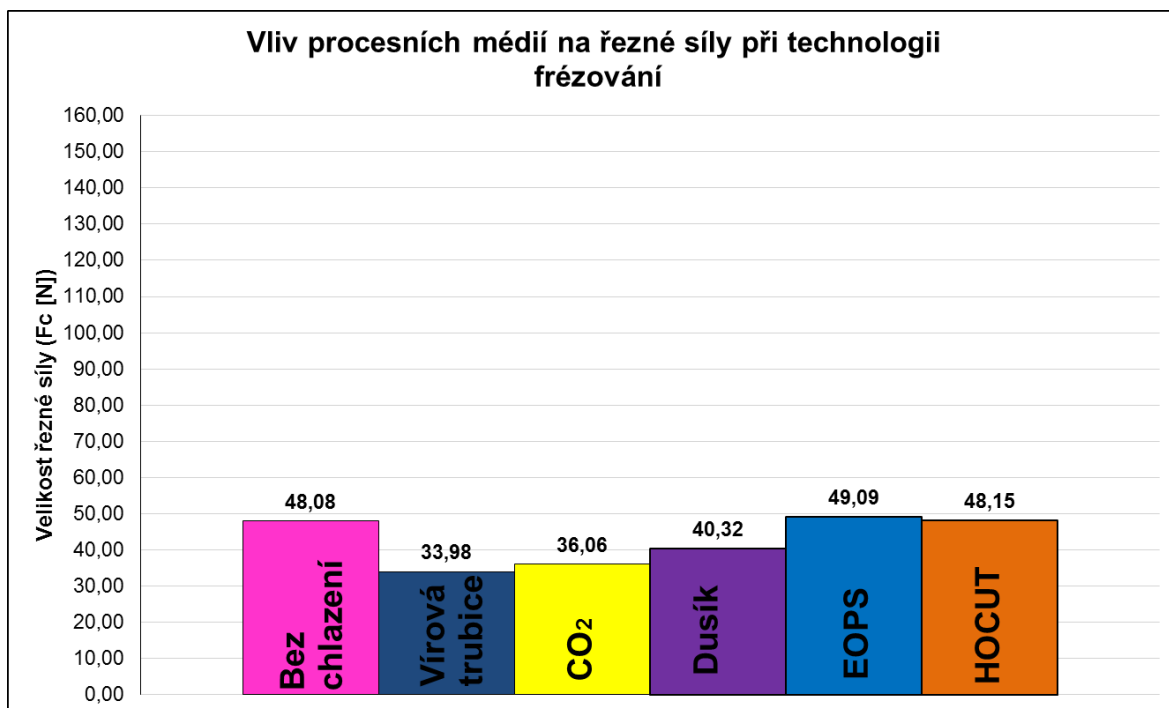
U procesních médií CO₂ a procesní kapaliny HOCUT byly naměřeny téměř stejné hodnoty posuvové síly. Tyto hodnoty jsou zároveň těmi nejmenšími, které byly dosaženy. Tato dvě média dokázala snížit posuvovou sílu o 26,3 %. Největší hodnota posuvové síly byla naměřena bez použití žádného chladícího média.

Srovnatelné hodnoty posuvové síly byly také naměřeny pro chlazení pomocí podchlazeného vzduchu z vírové trubice a kapalného dusíku, kdy zlepšení oproti obrábění bez chlazení dosáhlo ± 23 %. Druhým nejhorším médiem byla při měření posuvové síly kapalina EOPS, která dokázala snížit tuto sílu o 21%.



Graf 2. Porovnání středních hodnot posuvových sil.

Nejvyšší hodnota řezné síly byla zjištěna u polosyntetické chladicí kapaliny EOPS, kdy se nejvíce přiblížila naměřené hodnoty řezné síly při obrábění bez chlazení. Naměřené zvýšení řezné síly u kapaliny EOPS bylo větší o 2,1 % oproti obrábění bez chlazení. Naopak nejnižší hodnoty bylo dosaženo při použití podchlazeného vzduchu z vírové trubice. Podchlazený vzduch na -36°C dokázal snížit řeznou sílu o 29,3 %. Hodnoty naměřené při použití kapaliny HOCUT byly téměř stejně velké jako při obrábění bez chlazení. Vykázaly zvětšení řezné síly jen o 0,2 %. Při použití kapalného dusíku byla hodnota řezné síly menší o 16,1 %. Naměřená hodnota řezné síly pro chlazení pomocí oxidu uhličitého byla ve srovnání s obrábění za sucha nižší o 25 %.



Graf 3. Porovnání středních hodnot řezných sil.

5.2. Měření drsnosti povrchu

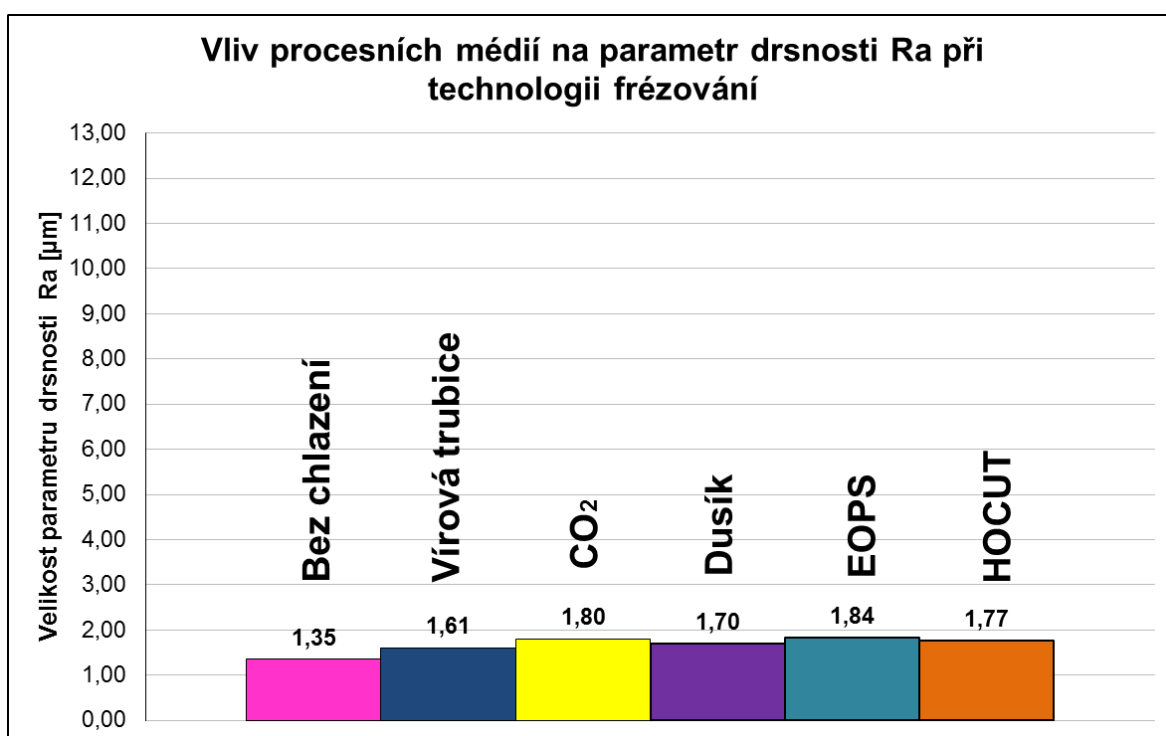
Měření drsnosti povrchu proběhla na profiloměru Mitutoyo SurfTest SV-2000N2 (viz. kapitola 4.6.4). Drsnost povrchu byla měřena na pěti vzorcích pro každé médium. Hodnoty se zjišťovaly na deseti místech vzorku. Hrot profiloměru se pohyboval ve směru posuvu nástroje. Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány a vloženy do tabulky (Tab. 13).

Tab. 13 Střední hodnoty drsnosti povrchu.

	Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]
Bez chlazení	1,35	7,83	10,09
Vířivá trubice	1,61	9,04	11,93
CO ₂	1,80	9,85	12,11
Dusík	1,70	9,52	12,30
EOPS	1,84	9,59	12,08
HOCUT	1,77	9,28	11,79

Nejnižší hodnota Ra, která udává průměrnou aritmetickou výšku posuzovaného profilu povrchu, byla naměřena při frézování bez chlazení. K tomuto výsledku došlo z důvodu hlazení nástroje v oblasti terciálních plastických deformací. Z důvodů chlazení pouze okolní atmosférou došlo k nárůstu teploty a rozpínání materiálu, díky čemuž docházelo k většímu hlazení materiálu hřbetem nástroje a zlepšení parametru Ra.

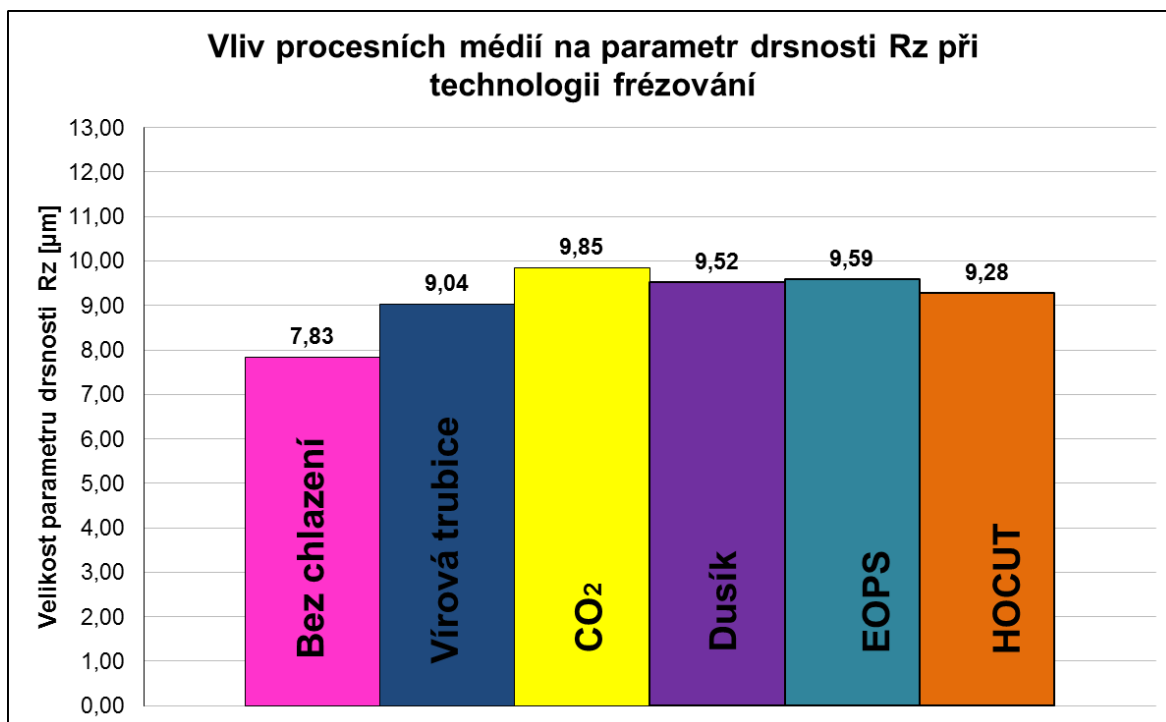
Výsledná hodnota parametru Ra při obrábění bez chlazení byla o 25 % nižší než při chlazení pomocí vírové trubice. S použitím CO₂ se hodnota parametru Ra zmenšila a rozdíl v porovnání s obráběním bez chlazení byl 16,2 %. Hodnota drsnosti dosažená při použití tekutého dusíku byla 1,70 μm, což v porovnání s obráběním bez chlazení dělá rozdíl 20,6 %. Chladicí kapaliny HOCUT a EOPS vykazaly podobné hodnoty drsnosti Ra. U kapaliny EOPS bylo zhoršení oproti použití okolního atmosférického vzduchu o 26,6 % a u kapaliny HOCUT byla tato hodnota 23,7 %.



Graf 4. Porovnání středních hodnot parametru Ra.

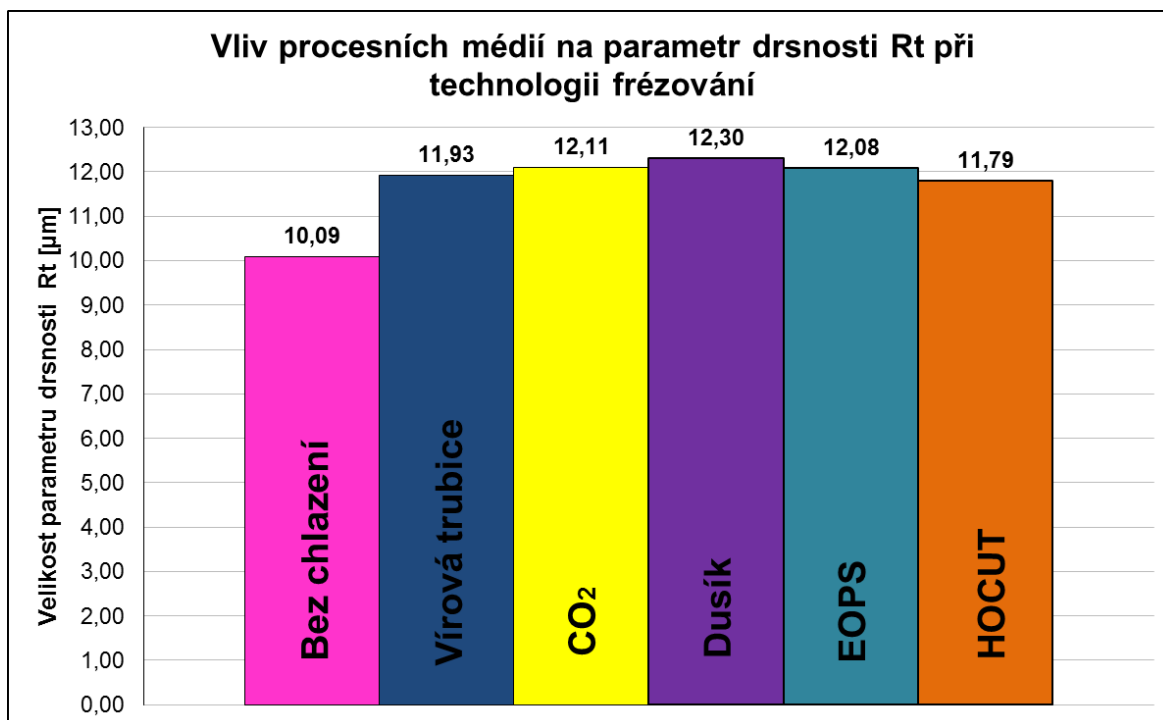
Parametr Rz udává největší výšku posuzovaného profilu. Největší výška profilu byla naměřena na vzorku obráběném pomocí CO₂. V porovnání s obráběním bez chlazení byla hodnota drsnosti Rz větší o 25,8 %. Chlazení pomocí vírové trubice vykazovalo zhoršení hodnoty drsnosti o 15,5 %. Téměř

shodná hodnota Rz byla naměřena jak pro chlazení dusíkem, tak pro chlazení pomocí procesní kapaliny EOPS. Pro tekutý dusík bylo naměřeno zhoršení o 21,6 % a pro kapalinu EOPS 22,5 %. U posledního zkoušeného média, kterým byla kapalina HOCUT, se projevilo zhoršení hodnoty Rz oproti obrábění bez chlazení o 18,5 %.



Graf 5. Porovnání středních hodnot parametru Rz.

Jako poslední byla měřena hodnota drsnosti Rt, která udává celkovou výšku posuzovaného profilu. Nejmenší hodnota byla naměřena pro obrábění bez chlazení. V porovnání s ní byla hodnota naměřená při obrábění pomocí chladicí kapaliny HOCUT větší o 16,8 %. Chlazení pomocí podchlazeného vzduchu bylo horší o 18,2 %. Téměř stejného rozdílu, a to 19,7 % v porovnání s obrábění bez chlazení, bylo naměřeno u chlazení pomocí kapaliny EOPS. Při chlazení pomocí CO₂ byla naměřená hodnota o 20 % vyšší, podobně potom při chlazení pomocí dusíku, a to o 21,9 %, který vykázal vůbec největší naměřenou hodnotu Rt.



Graf 6. Porovnání středních hodnot parametru Rt.

Tab. 14 Zvětšení hodnot drsnosti Ra, Rz, Rt při obrábění bez chlazení s ostatními použitými chladícími médii.

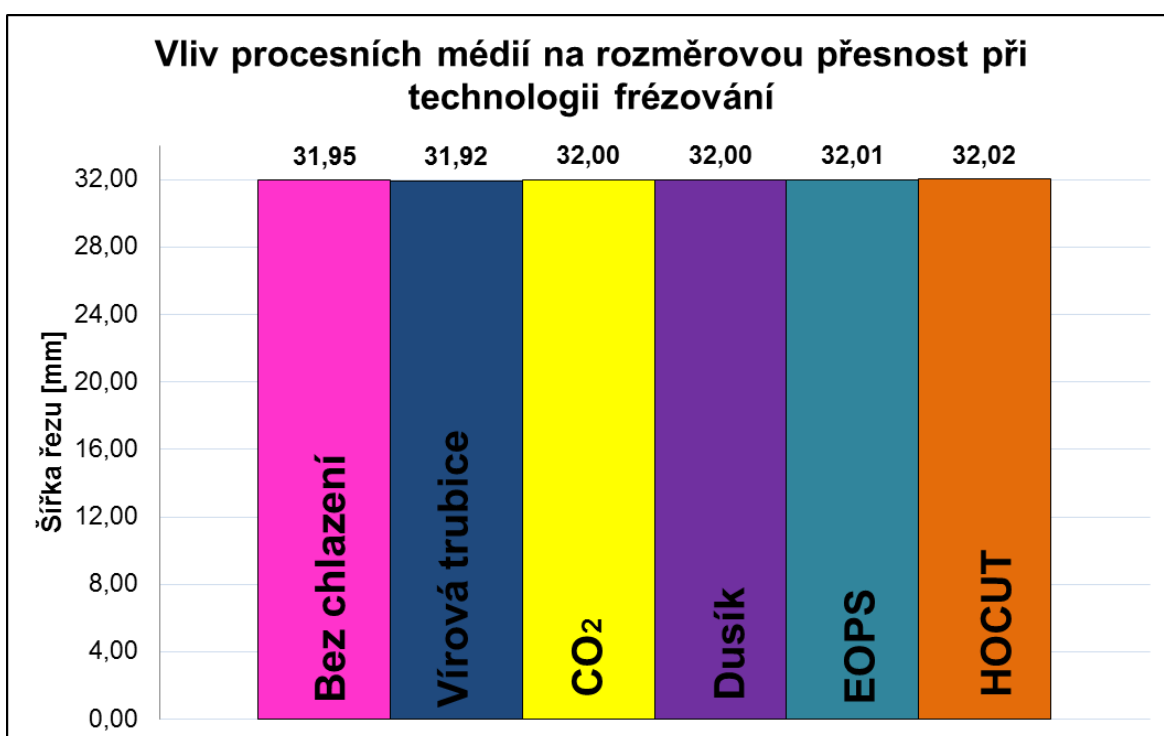
	Ra [%]	Rz [%]	Rt [%]
Vírová trubice	25,0	15,5	18,2
CO ₂	16,2	25,8	20,0
Dusík	20,5	21,6	21,9
EOPS	26,6	22,5	19,7
HOCUT	23,7	18,5	16,8

5.3. Měření rozměrové přesnosti

V rámci experimentu byla měřena rozměrová přesnost vzhledem k šířce a hloubce řezu. Pro všechna média byly zvoleny stejné řezné podmínky, a to posuv 25 mm/min při hloubce záběru 1,5mm. Průměr nástroje byl 32 mm. K porovnání přesnosti tedy byly použity hodnoty hloubky záběru nástroje 1,5mm a šířka řezu 32mm.

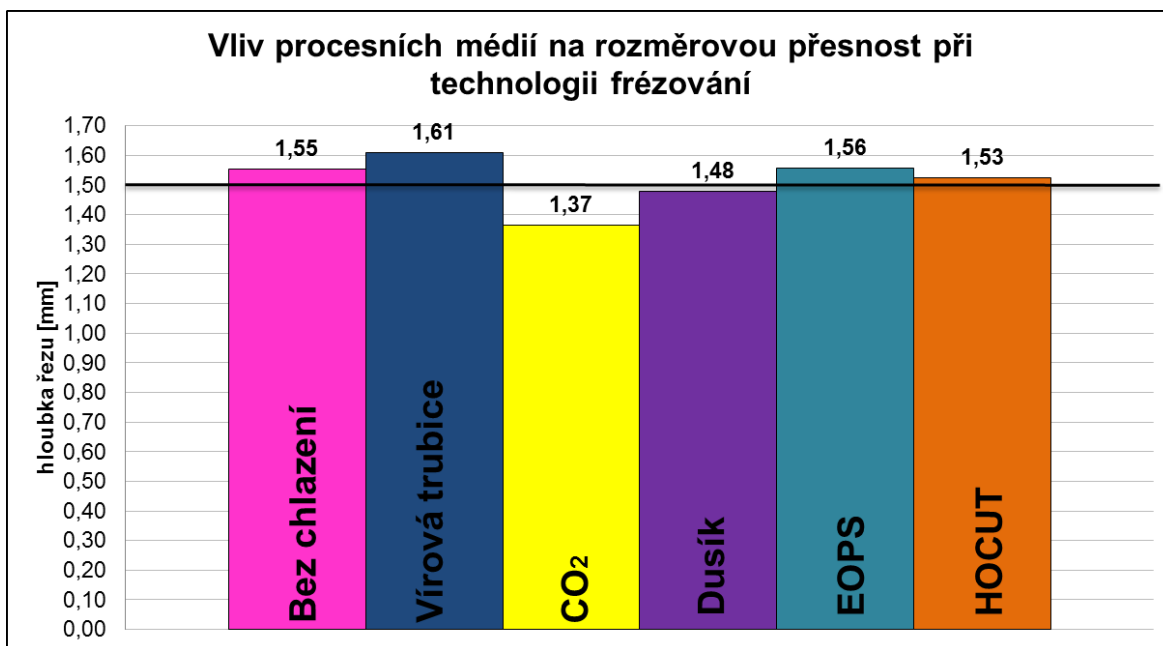
Tab. 15 Střední hodnoty rozměrů frézované drážky.

	Šířka [mm]	Hloubka [mm]
Bez chlazení	31,95	1,55
Vírová trubice	31,92	1,61
CO ₂	32,00	1,37
Dusík	32,00	1,48
EOPS	32,01	1,56
HOCUT	32,02	1,53



Graf 7. Porovnání středních hodnot šířky řezu.

Dosažená rozměrová přesnost šířky řezu byla u všech médií téměř shodná. Největší odchylka od porovnávaného rozměru byla 0,08mm. Této odchylky bylo dosaženo při použití podchlazeného vzduchu z vírové trubice. Nejpřesnější šířky řezu bylo dosaženo při použití plynů CO₂ a dusíku. Hodnoty jsou po zaokrouhlení na dvě desetinná místa stejná, avšak při použití dusíku byla přesná střední naměřená hodnota 31,9996mm a u CO₂ měla tato hodnota velikost 32,004mm. V porovnání procesních kapalin a těchto dvou plynů není velký rozdíl. Kapaliny dosahovaly maximální odchylky 0,02mm.



Graf 8. Porovnání středních hodnot hloubky řezu.

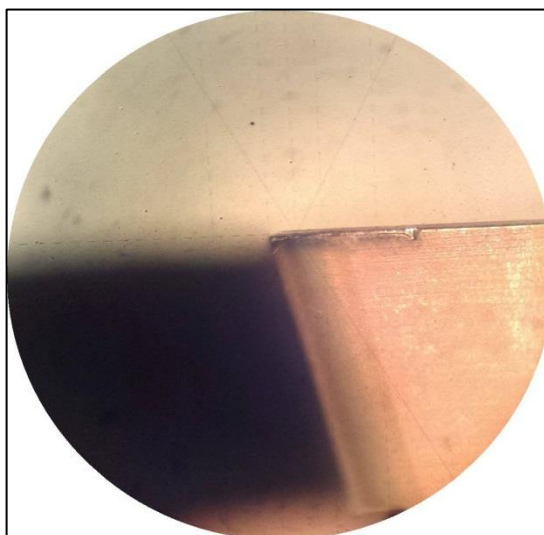
Nejmenší odchylka od zadané hloubky řezu byla naměřena při použití kapalného dusíku jako chladicího média. Tato odchylka dosáhla hodnoty 0,02298mm. Nejhorší vliv na přesnost řezné hloubky vykázalo chlazení pomocí vírové trubice a CO₂. U vírové trubice to bylo zhoršení ve smyslu zvětšení obráběného rozměru o 0,109mm. Při použití oxidu uhličitého byla naopak naměřena hodnota odchylky ukazující větší odtažení nástroje. Tato odchylka se pohybovala kolem 0,1346mm.

5.4. Měření trvanlivosti nástroje

Parametry za kterých byly provedeny experimenty jsou uvedeny v tabulce (Tab. 16). Pro každé médium byly použity tři břitové destičky. Každá z těchto destiček obrobila délku 2000mm. Měření trvanlivosti probíhalo pokaždé, kdy destička obrobila délku 250mm. Šlo tedy o osm měření na každé břitové destičce. Měření opotřebení břitové destičky bylo prováděno na mikroskopu ZEISS. Pohled na břitovou destičkou a nitkový kříž skrz okulár je na obrázku (Obr. 44).

Tab. 16 Řezné podmínky pro experiment opotřebení břitové destičky.

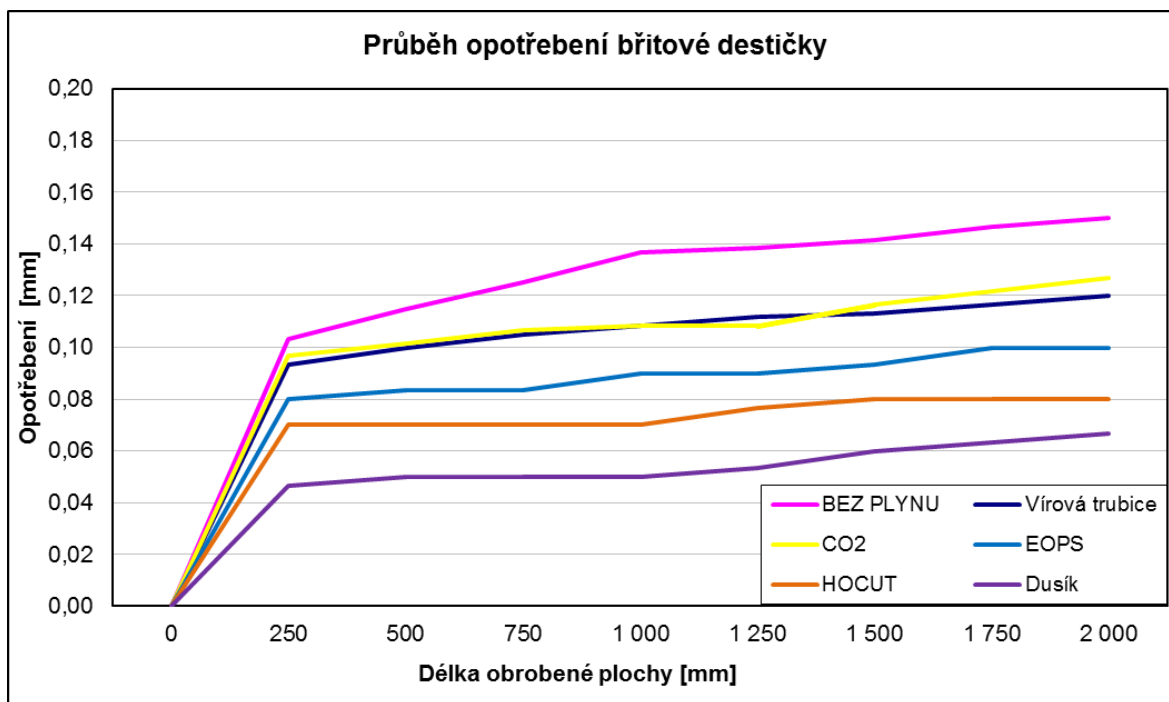
řezná rychlost v_c	181 m.min ⁻¹
otáčky nástroje n	1800 min ⁻¹
posuv na zub f_z	0,014 mm
délka styku VBD/ot	36,27 mm
šířka průjezdu frézy	26,26 mm
čas obrábění T	85,1 min
dráha obrábění L	2000 mm
šířka obrobku $\check{S}1$	78,8 mm
délka obrobku $L1$	250 mm



Obr. 44 Pohled do okuláru mikroskopu ZEISS.

Tab. 17 Dosažené opotřebení VBD po obrobení 2000 mm.

	VB1 [mm]	VB2 [mm]	VB3 [mm]
Bez chlazení	0,15	0,15	0,14
Vírová trubice	0,12	0,12	0,12
CO ₂	0,13	0,12	0,13
Dusík	0,07	0,07	0,06
EOPS	0,10	0,10	0,10
HOCUT	0,08	0,08	0,08



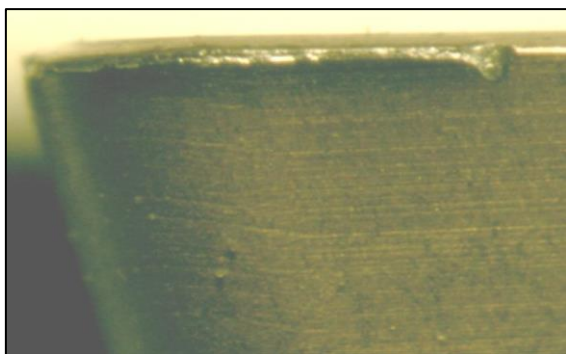
Graf 9. Průběh otupení břitové destičky.

Největšího opotřebení se dosáhlo při obrábění bez chlazení. Tato hodnota se pohybovala kolem hodnoty 0,15mm. Toto opotřebení je způsobeno mazacím a chladícím účinkem atmosférického vzduchu.

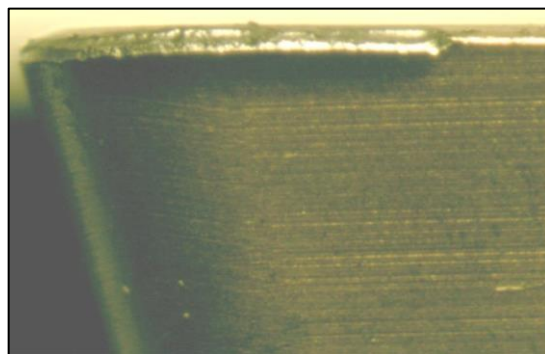
Obě chladicí kapaliny projevily dobré mazací a chladící schopnosti, které se podílely na nízkém a konstantním opotřebení břitové destičky. Z těchto dvou kapalin byla lepší kapalina na bázi minerálního oleje HOCUT, avšak oproti polysyntetické obráběcí kapalině EOPS (Obr. 46) byl rozdíl v opotřebení jen 20 %.

Opotřebení při použití podchlazeného vzduchu z vírové trubice a stlačeného oxidu uhličitého bylo srovnatelné a vykazovalo zmenšení oproti obrábění bez chlazení. U vírové trubice toto zmenšení opotřebení bylo 20%. Nejblíže hodnotě opotřebení obrábění za sucha byla hodnota naměřena při chlazení pomocí CO₂. Oxid uhličitý projevilo zlepšení pouze o 15,3 % oproti obrábění bez chlazení.

Výrazné zlepšení oproti obrábění bez chlazení se projevilo při použití kapalného dusíku jako chladícího média (Obr. 45). Průměrná hodnota opotřebení byla 0,067mm. Což je menší opotřebení o 55,3 % oproti obrábění bez chlazení. Avšak na břitové destičce docházelo k opotřebení ve tvaru vrubu. Toto opotřebení docházelo v místě styku destičky a vrchní hranou obráběného materiálu. Je to typický případ adhezního opotřebení a deformačního zpevnění povrchu obrobku.



Obr. 45 Otupení břitu při chlazení
kapalným dusíkem.



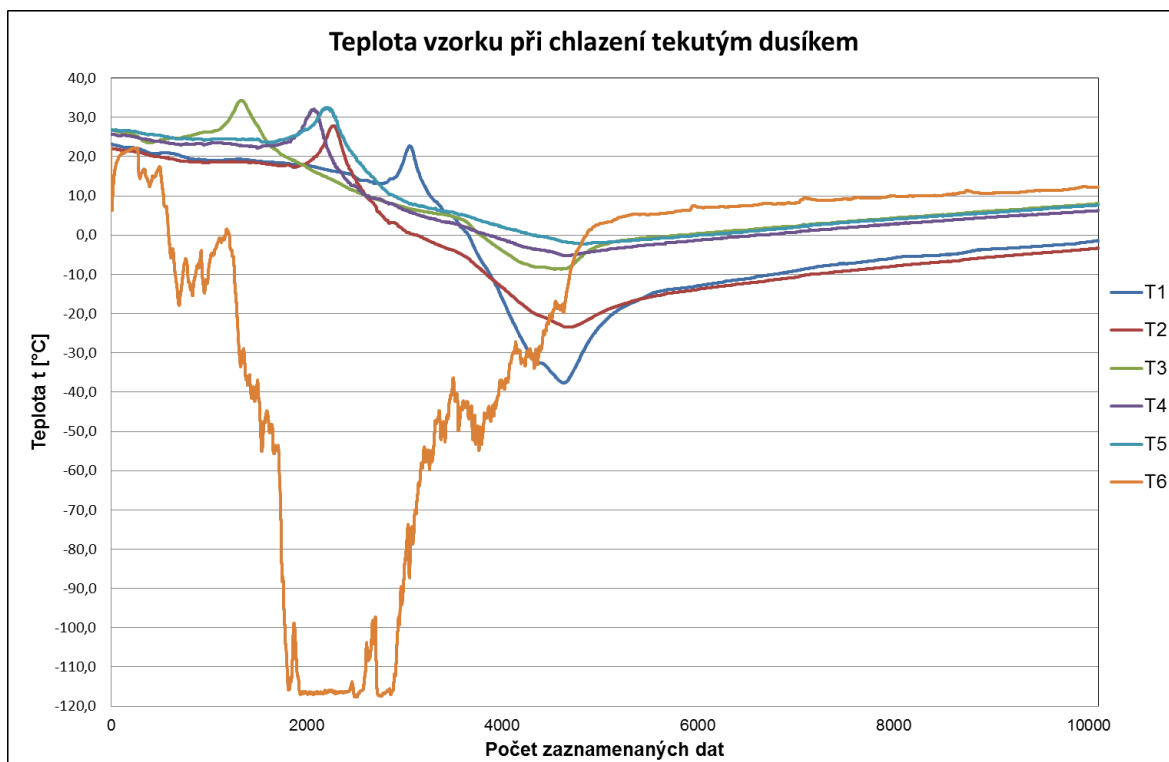
Obr. 46 Otupení břitu při chlazení procesní
kapalinou EOPS.

Tab. 18 Zmenšení opotřebení břitové destičky chladících médií oproti obrábění za
sucha.

	Opotřebení břitové destičky [%]
Vírová trubice	20,0
CO ₂	15,3
Dusík	55,3
EOPS	33,3
HOCUT	46,7

5.5. Měření teploty obrobku

Měření bylo prováděno pomocí šesti termočlánků napájených do vzorku (Obr. 30). Pět z těchto termočlánků (T1,T2,T3,T4,T5) bylo napájeno z druhé strany obrobku v různých hloubkách (Obr. 28). Šestý termočlánek (T6) byl napájen do povrchu vzorku ze strany, která se obráběla, a byl v přímém styku s chladícím médiem. Počáteční hodnota teplot měření se rovnala teplotě v laboratoři, a ta byla průměrně 24°C. Hodnoty teplot při přejezdu nástroje přes jednotlivé termočlánky byly odečteny z grafu. Na ukázce tohoto grafu (Graf 10.) je znázorněn experiment při použití kapalného dusíku jako chladícího média. Je z něj zřejmý rozdíl teplot na povrchu vzorku, kde byl termočlánek v kontaktu s dusíkem (T1,T2,T3,T4,T5) a termočlánky napájenými do těla vzorku (T6). Na grafech v příloze (Příloha 3) jsou uvedeny průběhy teploty na jednotlivých termočláncích T1-T6.



Graf 10. Teplota vzorku při chlazení tekutým dusíkem.

Tab. 19 Teploty termočlánků při přejetí nástroje.

	Teplota termočlánků [°C]					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Bez chlazení	151,46	130,22	104,94	130,50	122,78	87,60
Vírová trubice	83,72	71,72	67,98	76,48	75,64	44,58
CO ₂	-0,20	-0,56	0,36	16,80	-7,98	-1,66
Dusík	29,86	32,92	33,60	33,32	31,76	-115,62
EOPS	35,80	34,20	32,40	34,52	40,80	27,54
HOCUT	36,60	33,36	33,10	34,48	36,06	26,98

Největší teploty byly dosaženy při obrábění bez chlazení, kdy byl materiál ochlazován pouze okolní atmosférou. Na termočlánek T1, který byl nejbližší obráběné ploše, byla naměřena průměrná hodnota 151,46°C.

K největšímu zchlazení obrobku došlo při použití zkapalněného oxidu uhličitého jako procesního média. Teplota obrobku se průměrně pohybovala kolem bodu mrazu.

Avšak nejnižší teploty bylo dosaženo při chlazení kapalným dusíkem, a to u termočlánu T6 připájeného na povrchu obrobku vedle místa řezu. Teplota termočlánu se pohybovala průměrně kolem -115°C . Bylo to způsobeno přímým kontaktem termočlánu a kapalného dusíku.

Na termočlánu T6 byla pro všechna média naměřena nejnižší teplota v obrobku. Tato teplota byla naměřena, protože termočlánek T6 byl napájen jen na povrchu vzorku a ostatních pět bylo napájeno do přesně vyvrtaných děr. Důvodem také samozřejmě bylo přímé působení procesních médií na termočlánek T6, odvod tepla z místa působení termočlánu.

Obě procesní kapaliny, jak polosyntetická kapalina EOPS, tak kapalina na bázi minerálního oleje HOCUT, vykazovaly při pokusech srovnatelné hodnoty teploty. Tato teplota se pohybovala průměrně kolem $30-35^{\circ}\text{C}$.

6. Ekonomické zhodnocení použití procesních médií

Při vyhodnocování vhodnosti jednotlivých médií se nesmí opomenout i část týkající se nákladů na použití jednotlivých médií. Stejně tak k tomu v praxi přistupují jednotlivé firmy. Patří sem právě náklady na zařízení potřebné k používání těchto médií a v neposlední řadě i samotná cena média.

6.1. Fixní náklady

Fixní náklady jsou náklady na pořízení potřebného zařízení. Jsou to prvotní náklady, které nezávisí na vyrobeném množství výrobků.

Pro kalný dusík a oxid uhličitý volíme nákup dvou nádob, pro okamžité využívání pouze jedné, kdy druhá nádoba se v tomto období bude doplňovat.



Tab. 18 Fixní náklady.

Bez chlazení	U tohoto procesního prostředí nejsou fixní náklady
---------------------	--

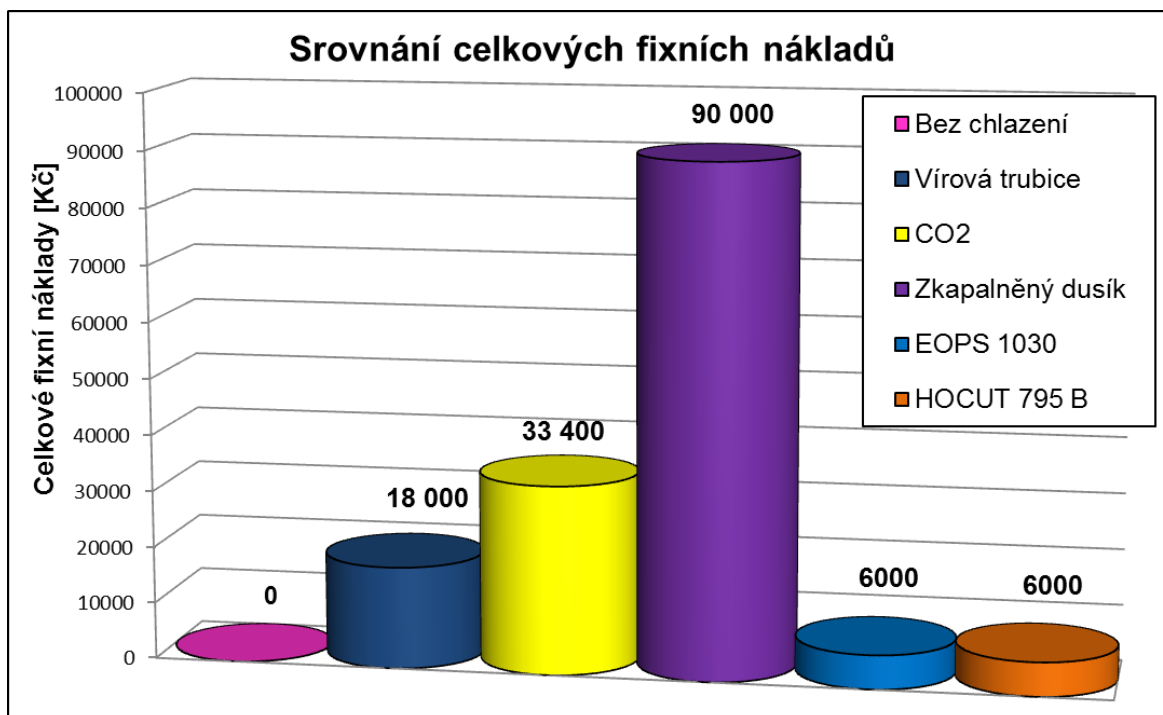
Vírová trubice			
Příslušenství	Vírová trubice	Kompresor	Hadice, držáky
Cena [Kč]	11 000	6000	1000
Celkové fixní náklady [Kč]		18 000	

CO2			
Příslušenství	Řídící aparatura, škrťací ventil	2x Tlaková nádoba	Hadice, držáky
Cena [Kč]	22 000	10 400	1000
Celkové fixní náklady [Kč]		33 400	

Zkapalněný dusík			
Příslušenství	Řídící jednotka, přečerpávací zařízení	2x Přepravní nádoba	Hadice, držáky
Cena [Kč]	39 000	50 000	1000
Celkové fixní náklady [Kč]		90 000	

EOPS 1030			
Příslušenství	Externí čerpadlo	Hadice, držáky	
Cena [Kč]	5000	1000	
Celkové fixní náklady [Kč]		6000	

HOCUT 795 B			
Příslušenství	Externí čerpadlo	Hadice, držáky	
Cena [Kč]	5000	1000	
Celkové fixní náklady [Kč]		6000	



*Graf 11. Srovnání celkových fixních nákladů pro
všechna procesní prostředí.*

Velké fixní náklady, které jsou vidět u použití tekutého dusíku, jsou dány vysokou pořizovací cenou řídicí jednotky a přečerpávacího zařízení.

Druhé nejvyšší náklady jsou při realizaci chlazení pomocí stlačeného oxidu uhličitého. Nejnákladnější položkou je zde řídicí aparatura a škrtící ventil.

Při použití zchlazeného vzduchu jako chladicího média je nejdražší položkou samotná vírová trubice, která stojí 11 000Kč.

Náklady u chlazení pomocí procesních kapalin jsou závislé na ceně externího čerpadla.



6.2. Celkové náklady

Celkové roční náklady byly stanoveny za těchto podmínek:

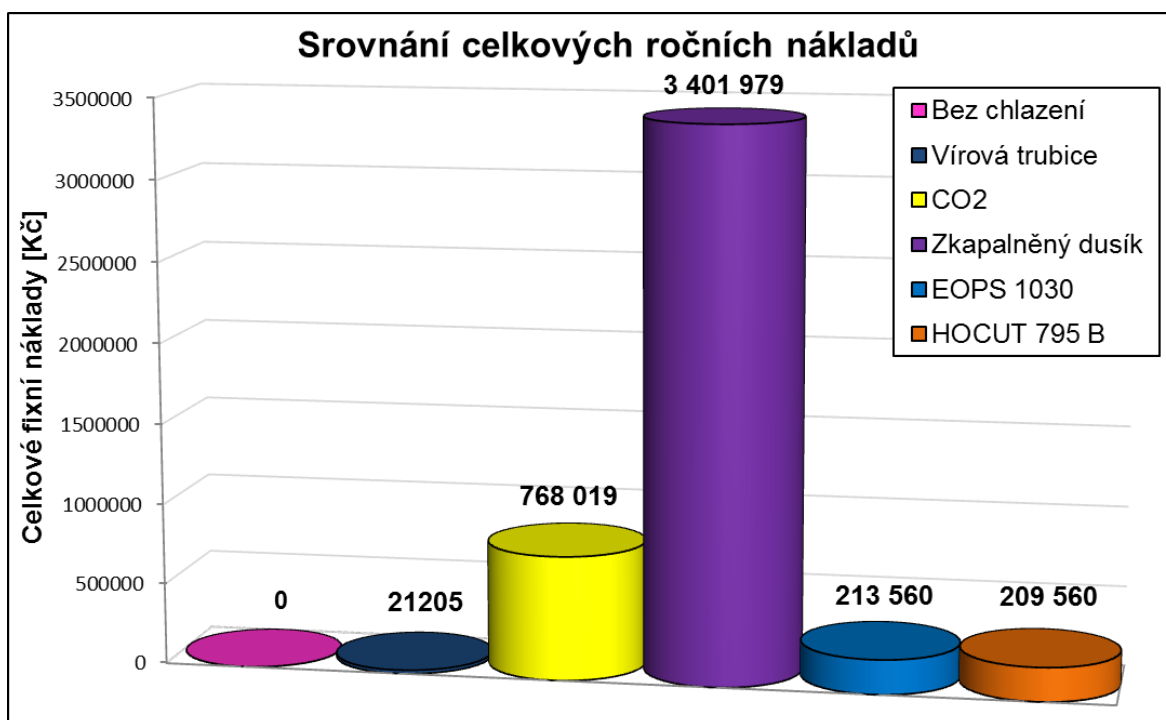
- rok 2015 má 251 pracovních dnů a 2008 pracovních hodin (8. hod. směna),
- celková roční obrobená délka je stanovena z experimentu na 2410m,
- průtočné množství $\text{CO}_2 = 4,40 \text{ g/s}$,
- spotřeba CO_2 za rok je 31,60 T = 1590 doplnění láhve za rok,
- doplnění láhve CO_2 – pro 20kg = 480 Kč,
- průtočné množství dusíku = 6,47g/s
- spotřeba zkapalněného dusíku za rok je 46,77 T = 1807 doplnění lahve za rok,
- doplnění Dew. nádoby – pro 32 litrů (25,89Kg) = 1880 Kč,
- průtočné množství procesní kapaliny = 0,27 l/s,
- do 1 m³ vody je potřeba 50 litrů procesní kapaliny,
- množství koncentráту procesní kapaliny na 1 výměnu = 250 litrů,
- počet výměn procesní kapaliny stanoven na 4 výměny za rok,
- ekologická likvidace procesní kapaliny – 50 litrů = 10000 Kč,
- elektřina – cena 1 kWh = 4,80 Kč,
- vodné a stočné – cena za 1 m³ = 96 Kč.



Tab. 19 Celkové roční náklady

Procesní prostředí	Celkové roční náklady	
Za sucha	Toto procesní médium nevyžaduje roční náklady na provoz.	
Vírová trubice	Roční spotřeba	Cena
	Elektřina 2,2 kWh x 2008 prac. hodin	21 205 Kč
	Celkové roční náklady: 21 205 Kč	
CO ₂	Roční spotřeba	Cena
	Doplnění 20 kg láhve CO ₂ 795 x za rok	1590 x 480 = 763 200 Kč
	Elektřina 500 W x 2008 prac. hodin	4 819 Kč
	Celkové roční náklady: 768 019 Kč	
Zkapalněný dusík	Roční spotřeba	Cena
	Doplnění 32l lahve dusíku 1807 x za rok	1807 x 1880 = 3 397 160
	Elektřina 500 W x 2008 prac. hodin	4 819 Kč
	Celkové roční náklady pro dusík: 3 401 979 Kč	
HOCUT 795B	Roční spotřeba	Cena
	HOCUT kanystr 10 litrů x 5	Kanystr 10 litrů 2500 Kč x 5 = 12 500 Kč
	Voda 950 litrů za rok	96 Kč
	Ekolog. likvidace 1 m ³ použité procesní kapaliny	200 000 Kč
	Elektřina 100 W x 2008 prac. hodin	964 Kč
	Celkové roční náklady: 213 560 Kč	

Procesní prostředí	Celkové roční náklady	Procesní prostředí
EOPS 1030	Roční spotřeba	Cena
	EOPS kanystr 10 litrů x 5	Kanystr 10 litrů 1700 Kč x 5 = 8 500 Kč
	Voda 950 litrů za rok	96 Kč
	Ekolog. likvidace 1 m ³ použité procesní kapaliny	200 000 Kč
	Elektřina 100 W x 2008 prac. hodin	964 Kč
	Celkové roční náklady: 209 560 Kč	

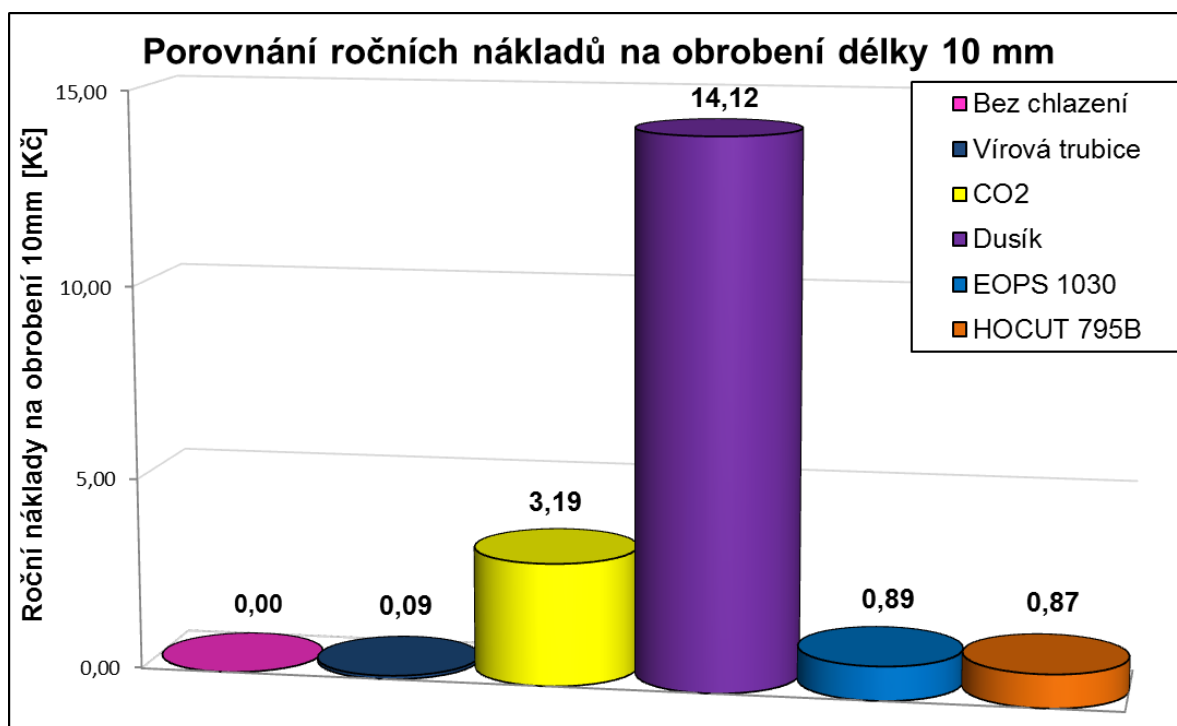


Graf 12. Srovnání celkových ročních nákladů pro všechna procesní prostředí.

6.3. Roční náklady na obrobení délky 10 mm

Tab. 20 Roční náklady na obrobení délky 10 mm.

	Celkové roční náklady [Kč]	Náklady [Kč/m]	Náklady [Kč/mm]	Náklady [Kč/10mm]
Bez chlazení	0	0,00	0,00	0,00
Vírová trubice	21 205	8,80	0,01	0,09
CO ₂	768 019	318,68	0,32	3,19
Dusík	3 401 979	1411,61	1,41	14,12
EOPS	213 560	88,61	0,09	0,89
HOCUT	209 560	86,95	0,09	0,87



Graf 13. Porovnání ročních nákladů na obrobení délky 10 mm.

6.4. Roční náklady na obrobení délky 10 mm pro sériovou výrobu

U sériové výroby předpokládáme vedlejší časy, které zahrnují seřízení stroje, výměnu nástrojů a obrobků. Tyto vedlejší časy tvoří 20 % celkových ročních nákladů. Zbýlých 80 % je vynaloženo na fyzické zhotovování výrobků. Pro sériovou výrobu bude obrobená délka 1928 m za rok.

Tab. 21 Roční náklady pro sériovou výrobu.

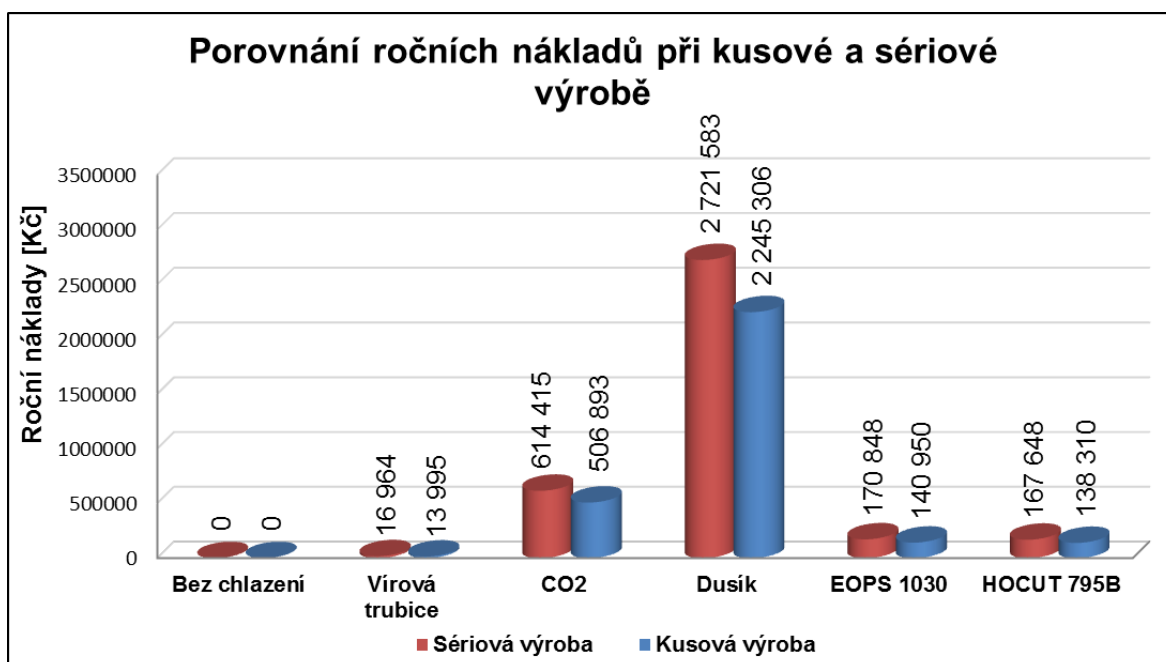
Procesní prostředí	Roční náklady [Kč]
Za sucha	Bez nákladů
Vírová trubice	16 964 Kč
CO ₂	614 415 Kč
Zkapalněný dusík	2 721 583 Kč
HOCUT 795B	170 848 Kč
EOPS 1030	167 648 Kč

6.5. Roční náklady na obrobení délky 10 mm pro kusovou výrobu

U kusové výroby předpokládáme vedlejší časy, které zahrnují seřízení stroje, výměnu nástrojů a obrobků. Tyto vedlejší časy tvoří 34 % celkových ročních nákladů. Zbýlých 66 % je vynaloženo na fyzické zhotovování výrobků. Pro sériovou výrobu bude obrobená délka 1590,6 m za rok.

Tab. 22 Roční náklady na obrobení délky 10 mm pro kusovou výrobu.

Procesní prostředí	Roční náklady [Kč]
Za sucha	Bez nákladů
Vírová trubice	13 995 Kč
CO ₂	506 893 Kč
Zkapalněný dusík	2 245 306 Kč
HOCUT 795B	140 950 Kč
EOPS 1030	138 310 Kč



Graf 14. Porovnání ročních nákladů při kusové a sériové výrobě.

7. Diskuze výsledků

Cílem této diplomové práce byl výzkum použití technických plynů jako procesních médií pro technologii frézování. Zjišťován byl vliv na proces obrábění, jako jsou schopnost chlazení a mazání v soustavě obrobek – nástroj. Výzkum se také týkal použití těchto médií ve fyzické výrobě, kde se brala v potaz ekonomická a ekologická hlediska využití plynů jako procesních médií.

Součástí výzkumu bylo porovnání výsledků provedených experimentálně v laboratořích KOM TUL, kde se porovnával vliv použití plynů a kapalin jako procesních médií na proces frézování.

Výzkum byl prováděn pro zvolená čtyři plynná média a pro porovnání byly vybrány dvě procesní kapaliny. Srovnání médií bylo prováděno z hlediska: drsnosti povrchu, řezných sil, vznikajících teplot při obrábění, rozměrové přesnosti a trvanlivosti nástroje. Pro každý jednotlivý experiment byly nastaveny stejné řezné podmínky.

V experimentu byly porovnávány nejen kapaliny s plyny, ale také bylo použito srovnání všech použitých médií s obráběním za sucha čili bez chlazení. V první řadě tedy byl zvolen jako procesní médium atmosférický vzduch (obrábění bez chlazení). Jako plynná prostředí byla zvolena: zchlazený vzduch pomocí vírové trubice, oxid uhličitý a kapalný dusík. Pro srovnání byly vybrány kapaliny: polysyntetická procesní kapalina EOPS 1030 od společnosti PARAMO, a.s., která je členem koncernu UNIPETROL, a procesní kapalina na bázi minerálního oleje HOCUT 795 B od společnosti Houghton International.

Tab. 23 Experimentálně zjišťované veličiny.

Hodnotící kritéria	Měřené veličiny
velikost řezných sil	F_x, F_y, F_z ,
teplota termočlánků	T1, T2, T3, T4, T5, T6,
drsnost	R_a, R_z, R_t ,
rozměrová přesnost	hloubka a šířka řezu,
trvanlivost nástroje	VB1, VB2, VB3,

V první řadě byl proveden experiment pro zjištění vlivu procesních médií na velikost řezných sil F_x , F_y , F_z . Z vyhodnocených měření se došlo k těmto závěrům:

Použitím vírové trubice při daných řezných podmínkách (otáčky 1800 ot/min, posuv 25mm/min, hloubka řezu 1,5mm) se projevilo snížením složek řezných sil a to hlavně příslušné síly. Hodnota posuvové síly byla díky vírové trubici také výrazně snížena, ale největší vliv na velikost posuvové síly vykazovalo použití oxidu uhličitého, kdy se tato hodnota dostala pouze na 117,08N. Použité procesní kapaliny prokázaly zmenšení velikosti řezných sil v porovnání s obráběním bez chlazení, avšak v porovnání s použitými plyny byl mazací účinek menší a hodnoty řezných sil vyšší.

Jako další experiment byla měřena teplota obrobku pomocí šesti termočlánků (T1,T2,T3,T4,T5,T6). Pět z nich bylo napájeno z druhé strany v přesně vyvrtaných otvorech, a jeden byl napájen na vrchní plochu vedle místa řezu. Obrobené vzorky byly přemístěny na přístroj MITUTOYO SURFTEST 2000-SV, kde byla změřena dosažená drsnost povrchu (R_a , R_t , R_z). Následně byla změřena na vzorcích rozměrová přesnost pomocí digitálního posuvného měřítka a třmenového mikrometru. Z vyhodnocených měření se došlo k těmto závěrům:

Nejvyšší hodnoty teplot obrobku naměřené při tomto experimentu byly zjištěny při obrábění bez chlazení, kde byl obrobek chlazen pouze okolní atmosférou v laboratoři, kde byla průměrná teplota 24°C. Použitím vírové trubice byla snížena teplota obrobku o polovinu oproti obrábění bez chlazení. Teploty dosažené chlazením vírovou trubicí byly druhé největší pro celé měření. Hodnoty teplot při chlazení kapalným dusíkem byly srovnatelné s teplotami naměřenými při použití procesních kapalin, až na termočlánek T6, který byl hned vedle místa řezu. Teplota na tomto termočlánku dosáhla v průměru hodnoty -115°C. Tento termočlánek byl v přímém kontaktu s chladícím médiem, kde tekutý dusík dosahuje teploty -180°C. Zchlazení celého objemu obrobku při použití procesních kapalin a tekutého dusíku se pohybovalo v průměru od 30°C do 40°C. Nejvyšší chladicí schopnost při tomto experimentu byla zaznamenána při použití oxidu uhličitého. Teplota dosažená při použití tohoto média se pohybovala v celém obrobku kolem bodu mrazu. Vyjimkou byl termočlánek T4, který byl v místě nesousledného frézování, a kde byla naměřená průměrná teplota $\pm 17^\circ\text{C}$.

Nejlepší dosažené drsnosti povrchu v tomto experimentu bylo při obrábění za sucha. Je to z důvodu většího množství materiálu zatlačovaného do povrchu obrobku hřbetem nástroje. Množství materiálu pro toto hlazení bylo dáno rozpínáním obrobku při zvětšující se teplotě řezu. Hodnoty drsnosti naměřené při použití plynných prostředí byly srovnatelné s hodnotami při použití procesních kapalin. Nejlepší drsnosti ve srovnání použitých plynů bylo dosaženo při chlazení pomocí vírové trubice. Těchto hodnot drsnosti bylo dosaženo díky horšímu chladicímu účinku, jak bylo zmíněno u vyhodnocení naměřených teplot v předchozím odstavci.

Rozměrová přesnost byla měřena na deseti místech na každém vzorku. Měřenými veličinami byla hloubka a šířka řezu. Díky velkému chladicímu účinku v místě řezu byl nejlepší vliv na šířku řezu zjištěn při použití kapalného dusíku a oxidu uhličitého. O něco málo menší vliv daný intenzitou chlazení obrobku byl zjištěn pro procesní kapaliny, kde se odchylka pohybovala v 0,02 mm.

Největší vliv na hloubku řezu byl naměřen při použití kapalného dusíku. Při použití procesních kapalin byla naměřená odchylka hloubky řezu téměř stejná jako při obrábění bez chlazení. Největší odchylky bylo dosaženo při použití zchlazeného vzduchu z vírové trubice a při chlazení oxidem uhličitým.

Posledním měřeným experimentem bylo opotřebením břitové destičky po obrobení 2000 mm. Vyhodnocením měření a zpracováním dílčích výsledků v této etapě experimentu se došlo k následujícím závěrům:

Ze tří zkoušených plynných médií měl největší vliv na opotřebením břitové destičky kapalným dusíkem. V průběhu experimentu byla naměřená průměrná hodnota 0,08 mm, avšak již po obrobení prvního úseku (250 mm) bylo zjištěno vytvoření opotřebením ve tvaru vrubu. Tento vrub se vytvořil u všech tří břitových destiček, a to v místě přímého styku s kapalným dusíkem. Dalším obráběním se tento vrub spojoval s konstantním opotřebením břitové destičky. Velikost tohoto vrubu se pohybovala v průměru kolem 0,16 mm. Pro zbývající dvě plynná média byly naměřeny téměř stejné hodnoty opotřebením a v porovnání s obráběním bez chlazení se jednalo o nejmenší zlepšení trvanlivosti (15-20%) ze všech testovaných procesních médií. Při použití procesních kapalin dochází ke snížení opotřebením břitové destičky v důsledku vysokého mazacího účinku oproti procesním plynům nedochází k takovému podchlazení nástroje.

Celkově lze zhodnotit použití plynů jako procesních médií takto:

Použité plyny nemají takové vlastnosti jako procesní kapaliny, avšak při jejich použití došlo k menšímu namáhání nástroje řeznými silami. Při použití vírové trubice byla naměřena druhá nejmenší drsnost povrchu. Je to díky částečnému mazacímu účinku přiváděného vzduchu. Vzduch se přivádí do místa řezu pomocí kompresoru, kde na sebe váže malé množství oleje, který je nutný pro fungování kompresoru. Největšího podchlazení obrobku bylo dosaženo chlazením pomocí oxidu uhličitého, kdy byl obrobek schlazen v průměru na teplotu mrazu. Největší vliv na rozměrovou přesnost měl kapalný dusík, když z měřené hloubky a šířky řezu prokázal nejlepší vlastnosti na stabilizaci obráběných rozměrů. Pokud nebudeme brát v potaz vytvoření vrubu na břitu nástroje, měl dusík i největší vliv na trvanlivost břitové destičky, kde prvotní opotřebení zůstalo konstantní po celou dobu experimentu.

V poslední části experimentu bylo zapotřebí vyhodnotit a porovnat použité procesní kapaliny a plyny z hlediska ekonomického a ekologického. Bylo nutné porovnat veličiny, jako jsou: prvotní investice na nákup nezbytného vybavení, roční provoz daných zařízení, náklady na roční provoz u sériové a kusové výroby. Z ekologického hlediska se porovnávalo množství spotřebovaného média, likvidace použitého média a dopad na životní prostředí.

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 došlo k následujícím závěrům:

Nejdražším použitým médiem byl kapalný dusík, kde se největší investice skrývá jak v pořizovacích nákladech na vybavení, tak i ve spotřebě množství média. Nevýhodou používání plynů je také to, že se nedají používat vícekrát tak, jak se tomu děje u procesních kapalin.



Druhé nejdražší použité médium bylo CO₂, jehož použití skrývá stejné nevýhody jako u použití kapalného dusíku.

Třetím plynným médiem byl zchlazený vzduch pomocí vírové trubice. V konečném porovnání vychází toto médium z ekonomického hlediska nejlépe, samozřejmě když se nebere v potaz, že náklady na obrábění bez chlazení jsou nulové. Důvodem je, že vírová trubice používá atmosférický vzduch, který nejen že nepotřebuje nijak ekonomicky likvidovat, ale ani není potřeba ho nějak doplňovat.

U používání procesních kapalin je tedy výhodou, že se mohou po potřebném přefiltrování používat vícekrát, ale je nutno počítat s určitou životností předepsanou výrobcem, kdy je nutné tuto použitou kapalinu nechat ekologicky zlikvidovat. Což je největší položka v používání procesních kapalin.

Shrneme-li fakta, která tu byla zmíněna, tak nám z toho vyplývá, že používání plynů jako procesních médií je, až na chlazení pomocí vírové trubice, velice finančně náročné. Proto je nutné před zavedením takovéto technologie do výroby zvážit její přínos.

8. Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou účinku procesních plynů a kapalin na technologii frézování a kvalitu obrobených součástí.

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

Diplomová 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, teplotu, trvanlivost, kvalitu povrchové vrstvy a rozměrovou přesnost, při technologii frézování. Nedílnou součástí výzkumu je porovnání (zhodnocení) výsledků experimentálních měření sledovaných vlivů mezi procesními médii: kapalina a plynná látka.

Diplomová práce je rozdělena do několika částí. Jako první je úvod, následuje teoretická část, kde je shrnuta problematika technologie frézování. Následuje přiblížení informací o použitých procesních médiích, experimentální část, kde je popsán postup experimentu a použité přístroje, experimentální měření, ve kterém jsou uvedeny naměřené hodnoty, ekonomické zhodnocení, diskuze a závěr.

Z naměřených hodnot v experimentu byly vyvozeny tyto závěry:

Použití plynů jako procesních médií mělo za následek menší snížení řezných sil, ale v porovnání s použitím procesních kapalin bylo toto zlepšení téměř zanedbatelné. Nejvýraznější vliv z použitých plynů na velikost řezných sil se projevil u použití vírové trubice, kde byl nástroj nejméně namáhán.

Největší účinnost chlazení obrobku byla naměřena při použití CO₂, kdy průměrné hodnoty na všech termočláncích byly kolem bodu mrazu, až na termočlánek, který byl usazen v místě nesousledného frézování. Použitím kapalného dusíku bylo dosaženo největší chlazení v místě řezu, kde na termočlánek byla naměřena teplota při obrábění -115°C. Při chlazení

pomocí vírové trubice bylo zchlazení materiálu nejmenší ze všech použitých procesních médií. Chladicí schopnost použitých kapalin měla za následek, že se teplota obrobku držela mezi 30-40°C.

Vliv plynů na rozměrovou přesnost se projevil nejvíce při použití kapalného dusíku. Stabilizace teplot procesu oddělování třísky pomocí dusíku měl za následek nejlepší dosažené rozměrové přesnosti. Zbylé dva plyny nevykázaly větší vliv na přesnost obrobků. Při porovnání vlivu na rozměrovou přesnost použitých plynů a kapalin se kapaliny zařazují mezi dusík a zbylé dva plyny.

Výrazně nejlepší výsledky při měření drsnosti byly naměřeny u vzorků, kde nebylo použito žádné procesní médium (obrábění za sucha). Dosažená hodnota drsnosti byla $R_a = 1,35 \mu\text{m}$. Ze zkoušených procesních médií dosáhlo chlazení pomocí vírové trubice nejmenší drsnosti $R_a = 1,61 \mu\text{m}$. Rozdíly naměřených drsností při chlazení pomocí procesních médií byly jen v desetinách mikrometru. Z očekávaných výsledků použité kapaliny neprojevily výrazné mazací schopnosti a vliv na drsnost pro technologii frézování.

Opotřebením břitové destičky při experimentu bylo nejvyšší při obrábění za sucha, kdy nedocházelo k chlazení ani mazání pomocí žádného procesního média. Použitím CO_2 a vírové trubice došlo k malému zlepšení, avšak z použitých médií dopadla tato dvě nejhůře. Použité kapaliny projevily mazací účinek a zmenšily opotřebením nástroje na 0,08 a 0,1 mm. Při použití kapalného dusíku došlo, tak jako u všech použitých médií, k prvotnímu opotřebením, avšak díky dusíku toto opotřebením zůstalo téměř konstantní během celého experimentu. Nevýhodou použitého dusíku bylo vytvoření vrubu v místě přímého styku s kapalným dusíkem, kde materiál nevydržel velké teplotní rozdíly mezi teplotou v místě řezu a teplotou kapalného dusíku.

Tab. 24 Celkové porovnání měřených parametrů pro jednotlivá procesní média.

	Drsnost	Rozměrová přesnost		Řezná síla	Opotřebení	Teplota
	Ra [μm]	Hloubka [mm]	Šířka [mm]	Ff [N]	VB [mm]	T1 [$^{\circ}\text{C}$]
Bez chlazení	1,35	1,55	31,95	121,61	0,15	151,46
Vírová trubice	1,61	1,61	31,92	125,59	0,12	83,72
CO2	1,80	1,37	32,00	117,50	0,13	-0,20
Dusík	1,70	1,48	32,00	158,90	0,07	29,86
EOPS	1,84	1,56	32,01	122,76	0,10	35,80
HOCUT	1,77	1,53	32,02	117,08	0,08	36,60

Z ekonomického hlediska byly vyvozeny následující závěry:

Fixní Náklady:

Nejmenší fixní náklady, přesněji žádné, byly při obrábění bez chlazení, kde není potřeba pořizovat žádnou aparaturu a ani doplňovat používané médium. Největší pořizovací náklady na potřebnou aparaturu vykazuje použití kapalného dusíku, u kterého tyto náklady činí 90 000Kč. Pro použití CO₂ se fixní náklady pohybují kolem 33 400 Kč za aparaturu a příslušenství. Vírová trubice má ve srovnání s ostatními použitými plyny nejnižší náklady na pořízení potřebné aparatury, tyto náklady byly stanoveny na 18 000Kč. Pořizovací náklady na aparaturu pro možnost použití jako chladicího média procesních kapalin byly 6 000Kč.

Roční náklady:

Roční náklady byly stanoveny pro rok 2015, který má 2008 pracovních hodin. Největší roční náklady byly zjištěny u použití kapalného dusíku. Tyto roční náklady se dostaly na 3 401 979 Kč. Při přepočtu těchto nákladů na délku obrobeneých

plochy, dostaneme částku 14,12 Kč/10 mm. U použití oxidu uhličitého byly náklady stanoveny na 768 019 Kč. Nejlevnějším plynným médiem je zchlazený vzduch při použití vírové trubice. Zde se náklady pohybovaly kolem 21 205 Kč. Náklady na chlazení pomocí procesních kapalin by se mohly zdát nejmenšími, ale při přičtení poplatku za ekologickou likvidaci se náklady pohybují kolem 210 000 Kč. Jako ekonomicky nejvýhodnější médiem je opět obrábění za sucha, kdy byly stanoveny nulové roční náklady.

Tab. 25 Srovnání nákladů na použití jednotlivých procesních médií.

	Fixní náklady [Kč]	Celkové roční náklady [Kč]	Roční náklady na obrobení délky [Kč] / 10 mm
Bez chlazení	Bez nákladů	Bez nákladů	Bez nákladů
Vírová trubice	18 000	21 205	0,05
CO ₂	33 400	768 019	3,19
Dusík	90 000	3 401 979	14,12
EOPS	6 000	213 560	0,49
HOCUT	6 000	209 560	0,48

Tab. 26 Srovnání nákladů na kusovou a sériovou výrobu.

	Náklady pro kusovou výrobu		Náklady pro sériovou výrobu	
	Roční náklady [Kč]	Roční náklady na obrobení [Kč / 10 mm]	Roční náklady [Kč]	Roční náklady na obrobení [Kč / 10 mm]
Za sucha	Bez nákladů	Bez nákladů	Bez nákladů	Bez nákladů
Vírová trubice	13 995	0,05	16 964	0,05
CO₂	506 893	3,19	61 4415	3,19
Zkapalněný dusík	2 245 306	14,12	2 721 583	14,12
HOCUT 795B	140 950	0,49	170 848	0,49
EOPS 1030	138 310	0,48	167 648	0,48

Zdroje:

- [1] ŠTRAJBL, Jan. A KOLEKTIV. *Příručka pro frézaře*. první. Praha: SNTL, 1962.
- [2] JAROSLAV, Stryal. *Vliv procesního média na vlastnosti frézovaného obrobku*. Liberec, 2010. Kvalifikační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Jersák Jan.
- [3] DOBROVOLNÝ, Bohumil. *Frézování kovů: Učební texty pro frézaře, úvod do nové techniky a pomůcka pro školení*. první. Praha: SNTL, 1961.
- [4] BUMBÁLEK, Bohumil, Bohuslav OŠŤÁDAL a Emil ŠAFR. *Řezné kapaliny*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963, 136 s. Řada strojírenské literatury.
- [5] GAZDA, Jaromír. *Teorie obrábění: řezné síly při obrábění*. Vyd. 1. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1993, 123 s. ISBN 80-708-3110-3.
- [6] DRÁB, Vojtěch. A KOLEKTIV. *Technologie 1*. Liberec: TUL, 1979.
- [7] NĚMEC, Dobroslav. A KOLEKTIV. *Strojírenská technologie 3: Strojní obrábění*. druhé, opravené vydání. Praha: SNTL, 1982.
- [8] KOLEKTIV AUTORŮ. *Nástroje pro frézování*. Dům techniky Ústí nad Labem: ČSVTS, 1985.
- [9] DRÁBEK, František. *Frézování*. druhé. Praha: STNL, 1960.
- [10] FRÝDA, Dušan. *Využití programovatelného řídicího systému PLC pro monitorizaci obrábění na frézce FNG32*. Liberec, 2010. Kvalifikační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Jersák Jan.
- [11] KOREJS, Michal. *Účinek procesních plynů na technologii frézování a kvalitu obrobeneých součástí*. Liberec, 2014. Kvalifikační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Dvořáčková Štěpánka.
- [12] VAŇÁK, A. *Technologie frézování – pracovní listy*. Střední odborná škola a Střední odborné učiliště, Šumperk. 2007, 101 s. CZ.04.1.03/3.1.15.2/0091. [cit. 26. 2. 2015]. Dostupné na: http://www.sossou-spk.cz/stary_web/esf/TEC_fr.pdf
- [13] VINGER, M.; PŘIKRYL, Z. *Technický průvodce 61 : Obrábění*. 1. vydání. Praha : SNTL, 1984. 800 s.
- [14] JERSÁK, Jan. *Základní konvenční technologie obrábění*. Liberec, 2013. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_pod.zip
- [15] DOLANSKÝ, Pavel. *Návrh optimálních řezných podmínek pro technologii frézování hořčikovými slitinami ve firmě EXPLAT, spol. s r.o.* Liberec, 2012.

- Kvalifikační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Dvořáčková, Štěpánka.
- [16] STROJÍRENSTVÍ - FRÉZOVÁNÍ: MATERIÁLY NA VÝROBU FRÉZ. [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-frezovani.blogspot.cz/2011/03/13-materialy-na-vyrobu-frez.html>
- [17] ZELINKA, Zdeněk. KONVENČNÍ FRÉZOVÁNÍ: Frézy. In: [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: http://elearning.sousvitavy.cz/repository/DUMY/frezovani/VY_32_INOVACE_O_VZ_1_05.pdf
- [18] [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/tvrdokov-vysoce-odolny-material-proti-opotrebeni.html>
- [19] KARÁSEK, J. Závěrečná zpráva – Protokol hodnotící vliv plynů pro konkrétní podmínky obrábění. Liberec: TAČR – TA03010492, TU v Liberci, 2013. 34 s.
- [20] STRELCOVÁ, Radka. Řezné kapaliny a jejich uplatnění v moderní výrobě: Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 48s., 5 příloh. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.
- [21] REJZEK, Miroslav. *Účinek procesní kapaliny na technologii soustružení a kvalitu obroběných součástí*. Liberec, 2010. Kvalifikační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Jersák Jan.
- [22] ZDROJE TEPLA A TEPELNÁ BILANCE. In: [online]. [cit. 2015-03-06]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_03.pdf
- [23] HUMÁR A., Technologie 1 Technologie obrábění – 1. Část. Dostupné na: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [24] TŘETINA, Jaromír. *Modernizace výuky všeobecně vzdělávacích a odborných předmětů v SOŠ Josefa Sousedíka Vsetín prostřednictvím využití ICT: Technologie [Základy technologie obrábění]*. Vsetín, 2009.
- [25] BENEŠ, Petr. Chladící a mazací schopnost procesních kapalin při obrábění. Liberec, 2009. Kvalifikační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Jersák Jan.
- [26] KABÁT, Miroslav. Experimentální vyšetření možnosti sušit vzduch pomocí vírové trubice. Plzeň, 2013. Kvalifikační práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Linhart, CSc.



- [27] Vírové trubice [online]. 2006 [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <http://www.technikaatrh.cz/aktuality/virove-trubice>
- [28] PŘÍKRYL, Zdeněk a Rosa MUSÍLKOVÁ. Teorie obrábění. 3. opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982, 235 s.
- [29] [online]. [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze_modelu_soubory/ocel_12050.3.pdf
- [30] BILÍK, Oldřich a Jan MÁDL. Trvanlivost bříty a provozní spolehlivost obráběcího nástroje. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, Ústav techniky a řízení výroby, 2001, 86 s. Strojírenská technologie. ISBN 80-704-4389-8.
- [31] MÁDL, Jan. Teorie obrábění pro experimentální výuku: Otupování bříty, trvanlivost. Vydavatelství ČVUT, Praha 1, Husova 5, 1980.
- [32] KUBÍK, Milan. Zkoumání trvanlivosti nástroje a drsnosti povrchu při frézování geopolymerních kompozitních systémů. Liberec, 2013. Kvalifikační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Prof. Ing. Alexey POPOV, DrSc.
- [33] [online]. [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/07-19-Rotter.html>
- [34] [online]. [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.houghtonintl.com/en-uk/products/metalcleaning/Pages/Hocut-Sym-C.aspx>
- [35] [online]. [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <https://eshop.paramo.cz/produkty/KatalogovyList.aspx?kodproduktu=V032467>



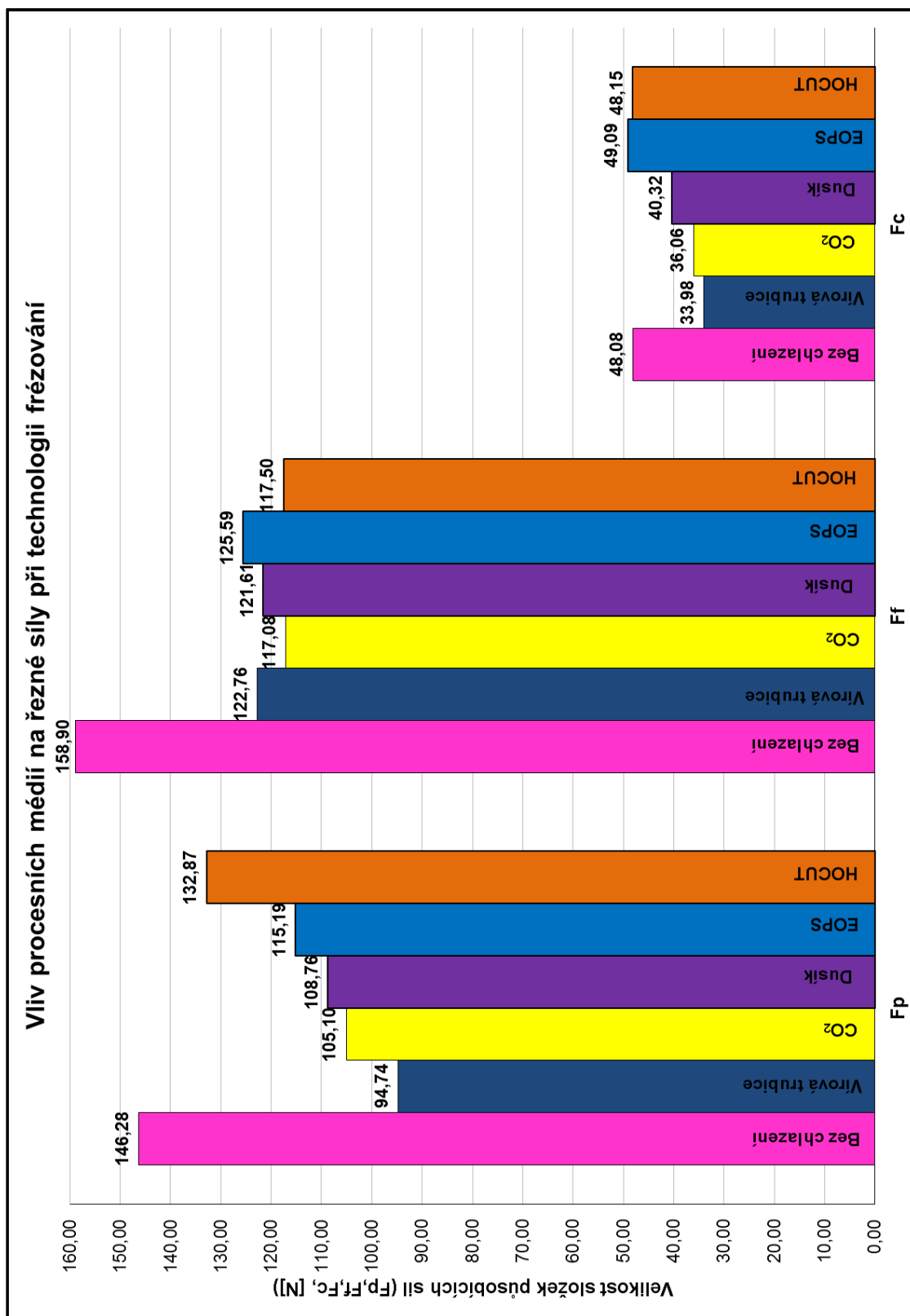
Seznam příloh:

Příloha 1: Graf vliv procesních médií na řezné síly při technologii frézování,

Příloha 2: Graf vliv procesních médií na drsnost při technologii frézování,

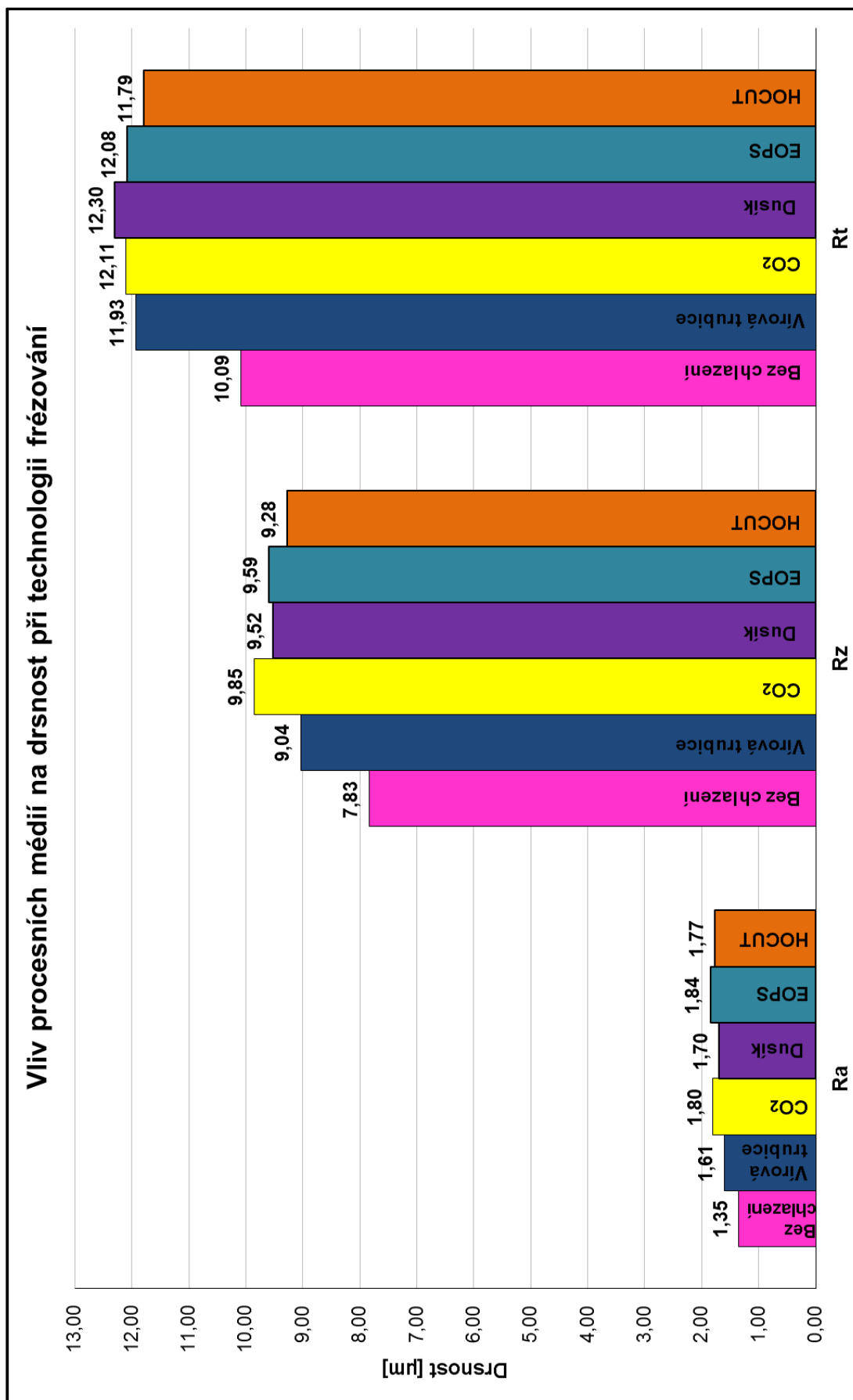
Příloha 3: CD

Příloha 1:



Přílohy- Graf. 1 Vliv procesních médií na řezné síly při technologii frézování.

Příloha 2:



Přílohy- Graf. 2 Vliv procesních médií na drsnost při technologii frézování.



Příloha 3: CD – naměřené hodnoty zpracované do tabulek