

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rok odevzdání: 2010

Jaroslav Stryal

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Bakalářský studijní program:

Strojírenská technologie

Zaměření:

Obrábění a montáž

Vliv procesního média na vlastnosti frézovaného obrobku

The effect of procedural liquid to the properties of millings workpiece

KOM - 1132

JAROSLAV STRYAL

Vedoucí práce:

Doc. Ing. Jan Jersák, CSc.

Konzultant:

Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.

Počet stran:

76

Počet příloh:

2

Počet tabulek:

21/9

Počet obrázků:

17

Počet diagramů:

24/27

13. 5. 2010

Vliv procesního média na vlastnosti frézovaného obrobku

ANOTACE:

V bakalářské práci jsou porovnány účinky různých druhů procesních kapalin a metody jejich přívodu do oblasti řezu při frézování za různých řezných podmínek. Hodnoticími kritérii jsou řezné síly, drsnost povrchu a zbytkové napětí v povrchové vrstvě obrobených součástí.

Výsledky této bakalářské práce dokazují velký vliv procesního média na čelní frézování. Procesní médium pozitivně působí na velikost řezných sil, drsnost povrchu, velikost parametru c_{p50} a negativně na velikost zbytkového napětí.

The effect of procedural liquid to the properties of millings workpiece

ANNOTATION:

In this thesis effects of different kinds of procedural liquids and the methods of procedural liquid supply into the place of milling are assessed. The evaluative criteria are the cutting force, the surface roughness and the remanent voltage in the surface layer of machined components.

The results of this thesis prove a greater effect of procedural liquids on side milling. Procedural liquid positively influences the size of cutting coaming, the skid resistance, size of parameter c_{p50} and negatively influences the size of discharge voltage.

Klíčová slova: OBRÁBĚNÍ, FRÉZOVÁNÍ, PROCESNÍ MÉDIA

Zpracovatel:	TU v Liberci, KOM
Dokončeno:	2010
Archivní označ. zprávy:	

Počet stran:	76
Počet příloh:	2
Počet tabulek:	21/9
Počet obrázků:	17
Počet diagramů:	24/27

Prohlášení

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

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

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

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

Datum

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především panu doc. Ing. Janu Jersákovi, CSc. za cenné rady a předmětné připomínky při vedení mé bakalářské práce. Dále děkuji panu doc. Ing. Jaromírovi Gazdovi, CSc. za poskytnuté rady v průběhu řešení a panu Martinu Kordikovi za pomoc s realizací praktické části v laboratoři KOM. Také bych rád poděkoval panu doc. Ing. Miroslavu Svobodovi, CSc. za úpravu vývojového prostředí LabWIEV a Ing. Jaroslavu Votočkovi za úpravu elektrického rozvodu dynamometru Kistler. Dále bych chtěl velice poděkovat panu prof. Ing. Nikolaji Ganevovi, CSc. za realizaci měření zbytkového napětí v povrchové vrstvě vzorků a cenné rady s tím spojené.

Touto cestou děkuji také celé své rodině za podporu a trpělivost projevenou v průběhu mého studia vysoké školy.

Obsah

Seznam použitých značek a zkratk	9
1 Úvod	11
2 Frézování	12
2.1 Základní způsoby frézování	12
2.1.1 Frézování válcové	12
2.1.2 Čelní frézování	13
2.1.3 Okružní frézování	14
2.1.4 Planetové frézování	14
2.2 Silové poměry	14
2.3 Teplo a teplota řezání	15
2.4 Řezné podmínky při frézování	16
2.4.1 Opatření a hospodárná trvanlivost fréz	16
2.4.2 Ostření fréz	17
2.5 Upínání fréz a obrobků	17
3 Procesní média	18
3.1 Druhy procesních kapalin a jejich vlastnosti	18
3.1.1 Minerální oleje	19
3.1.2 Mastné oleje a tuky	19
3.1.3 Řezné oleje	19
3.1.4 Emulzní kapaliny	19
3.1.5 Vodné roztoky	19
3.1.6 Syntetické kapaliny	20
3.1.7 Polysyntetické kapaliny	20
3.2 Požadavky na procesní kapaliny	20
3.3 Vliv procesní kapaliny na frézovací proces	22
3.4 Způsoby přívodu procesní kapaliny do místa řezu	22
3.4.1 Běžný způsob přívodu procesní kapaliny	23
3.4.2 Tlakový způsob	23
3.4.3 Metoda MQL	24

3.5	Kontrola procesních kapalin	24
3.6	Likvidace použitých kapalin	24
3.7	Plynné prostředí	25
4	Charakteristika stroje a měřicího zařízení	26
4.1	Obráběcí stroj	26
4.2	Dynamometr KISTLER	27
4.3	Laboratorní profiloměr MITUTOYO	27
4.4	Rentgenový difraktometr X'Pert PRO MPD	28
4.5	Aplikátor Accu-Lube	28
5	Experimentální část řešení	30
5.1	Příprava zkušebních vzorků	30
5.2	Použitá procesní média	30
5.2.1	Accu-Lube LB 2000	30
5.2.2	Microcool 387+	31
5.2.3	Paramo SK 300	31
5.2.4	Solgreen 540	32
5.2.5	Podchlazený vzduch	33
5.2.6	Okolní vzduch	33
5.3	Metodika experimentu	33
5.3.1	Příprava experimentu a měřené parametry	33
5.3.2	Měření sil	35
5.3.3	Měření drsnosti	37
1.1.1	Měření zbytkových napětí	38
6	Vyhodnocení experimentu	39
7.1	Posouzení velikosti středních hodnot řezných sil	39
7.1.1	Experiment 1	40
7.1.2	Experiment 2	41
7.1.3	Experiment 3	43
7.1.4	Experiment 4	44
6.2	Porovnání procesních médií z hlediska dosažené drsnosti	46

6.2.1	Experiment 1	46
6.2.2	Experiment 2	47
6.2.3	Experiment 3	48
6.2.4	Experiment 4	50
6.3	Porovnání procesních médií z hlediska nosného podílu profilu	51
6.4	Porovnání procesních médií z hlediska zbytkového napětí	52
6.5	Opakované měření	54
7	Závěr.....	59
	Seznam použité literatury	63
	Seznam příloh.....	65

Seznam použitých značek a zkratek

a	[mm]	tloušťka řezu
a _{max}	[mm]	maximální tloušťka řezu
a _p	[mm]	hloubka záběru řezného nástroje
c _{tp50}	[μm]	parametr nosného podílu profilu
D	[mm]	průměr frézy
Ex. 1	[-]	Experiment 1
Ex. 3	[-]	Experiment 3
Ex. 5	[-]	Experiment 5
F	[N]	výsledná řezná síla
F _c	[N]	řezná síla
F _{cn}	[N]	normálová složka řezné síly
F _f	[N]	posuvová síla
F _p	[N]	přísuvová síla
F _x	[N]	x-ový směr dynamometru (F _c)
F _y	[N]	y-ový směr dynamometru (F _f)
f _z	[mm]	posuv na zub
F _z	[N]	z-ový směr dynamometru (F _p)
GND	[-]	uzemnění
KT	[mm]	hloubka žlábků
Mic	[-]	procesní kapalina Microcool 387+
MQL	[-]	Minimum Quantity Lubrication (proc. kapalina Accu-Lube LB 2000)
n	[s ⁻¹]	otáčky
OV	[-]	okolní vzduch
Par	[-]	procesní kapalin Paramo SK 300
PV	[-]	podchlazený vzduch na teplotu 4 °C
Q _{def}	[J]	teplo vzniklé z práce plastických a pružných deformací
Q _N	[J]	teplo, které zůstalo v nástroji
Q _O	[J]	teplo, které zůstalo v obrobku
Q _P	[J]	teplo, které bylo vysááno do okolí
Q _T	[J]	teplo, které bylo odvedeno třískou
Q _{tr}	[J]	teplo vzniklé z práce tření
Ra	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu
Rm	[MPa]	mez pevnosti
Rmr	[-]	nosný podíl drsnosti povrchu
R _{p0,2}	[MPa]	smluvní mez kluzu
Rt	[μm]	celková výška profilu

Rz	[μm]	největší výška profilu
Sol	[-]	procesní kapalina Solgreen 540
VB	[mm]	střední šířka otěru na hřbetě (velikost otupení)
v_f	[mm/min]	rychlost posuvu
VR	[mm]	radiální otupení
σ_L	[MPa]	zbytkové napětí v povrchu obrobku ve směru posuvu
σ_T	[MPa]	zbytkové napětí v povrchu obrobku ve směru kolmém
$\varphi_{\max}$	[°]	úhel záběru frézy v maximální poloze
φ	[°]	úhel záběru frézy v obecné poloze
χ_f	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
ψ	[°]	úhel záběru čelní frézy

1 Úvod

Frézování je nejvíce rozšířená metoda obrábění rovinných ploch. Setkáváme se s ní prakticky v každém strojírenském podniku. Rozeznáváme frézování na hrubo, kde je odebíráno velké množství materiálu (až 20 mm), a na jemné frézování, kde dosahujeme velmi dobré kvality povrchu.

Kvalita obrobené plochy je závislá na řadě faktorů. Značnou roli hraje správná volba nástroje a stroje. Pro optimalizaci procesu je dále důležitá volba řezných podmínek a vhodného procesního média.

Bakalářská práce se zabývá problematikou volby vhodných řezných podmínek pro čelní frézování a problematikou použití různých procesních médií a metod jejich přívodu do oblasti řezu.

Cílem bakalářské práce je:

- porovnání vlivu řezných podmínek a účinku procesních médií na technologii čelního frézování,
- posouzení vlivu procesních médií na síly, které vznikají během procesu čelního frézování,
- výzkum vlivu procesních médií na jakost povrchu obrobené součásti,
- vyhodnocení vlivu procesních médií na zbytková napětí v povrchové vrstvě obrobených vzorků (u vybraných součástí),
- porovnání nové metody přívodu procesního média MQL (Minimum Quantity Liquid) s dalšími metodami.

V rámci řešení bakalářské práce byla použita následující procesní média: Accu-Lube (řezný olej), Microcool 387 + (semisyntetická emulze), Paramo SK 300 (vodný roztok), Solgreen 540 (syntetická kapalina), podchlazený vzduch o teplotě 4° C a okolní vzduch. Tyto média byla porovnána při různých řezných podmínkách.

Tato práce navazuje na bakalářskou práci Miroslava Rejzka, která se věnuje vlivu procesního média na proces soustružení, a na diplomovou práci Tomáše Bartuška, která se zabývá vlivem procesního média na proces broušení. Práce souvisí s řešením výzkumného záměru MSM 4674788501.

2 Frézování

Frézování je způsob obrábění, při kterém se materiál obrobku odebírá vícebřítým nástrojem – frézou. Hlavní řezný pohyb je rotační a vykonává ho nástroj. Posuv a přísmuv zpravidla vykonává obrobek. Směr pohybu obrobku je většinou kolmý na osu otáčení nástroje [11].

Fréza je několikabřítý nástroj, který má břity uspořádané na válcové, kuželové nebo jiné tvarové ploše. Vzhledem k mnohostrannému uplatnění frézování ve strojírenské výrobě a velkému rozsahu technologie frézování se používá v současnosti mnoho typů a velikostí fréz, které se dělí podle různých hledisek [19].

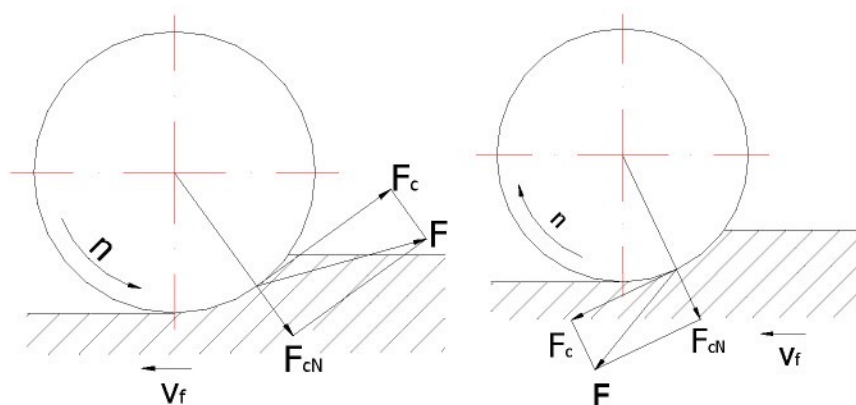
Stroj, který používáme při frézování, se nazývá frézka. Frézky jsou vyráběny a dodávány ve velkém počtu modelů a velikostí. Je možné je rozdělit do čtyř základních skupin; frézky konzolové, stolové, rovinné a speciální. Zvláštní kategorií tvoří frézky na závity a frézky na ozubení [20].

2.1 Základní způsoby frézování

Podle způsobu záběru frézy do materiálu obrobku rozeznáváme tyto dva druhy frézování: frézování čelní a frézování válcové. Od těchto základních způsobů se odvozují některé další způsoby [19].

2.1.1 Frézování válcové

Válcové frézování se používá převážně při práci s válcovými a tvarovými frézami. Zuby frézy jsou vytvořeny na obvodu nástroje. Hloubka řezu se nastavuje kolmo na směr posuvu a na osu frézy. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy. Podle způsobu rotace frézy ke směru posuvu obrobku rozeznáváme frézování sousledné a nesousledné [20]. Sousledné a nesousledné frézování je znázorněno na obrázku 1.



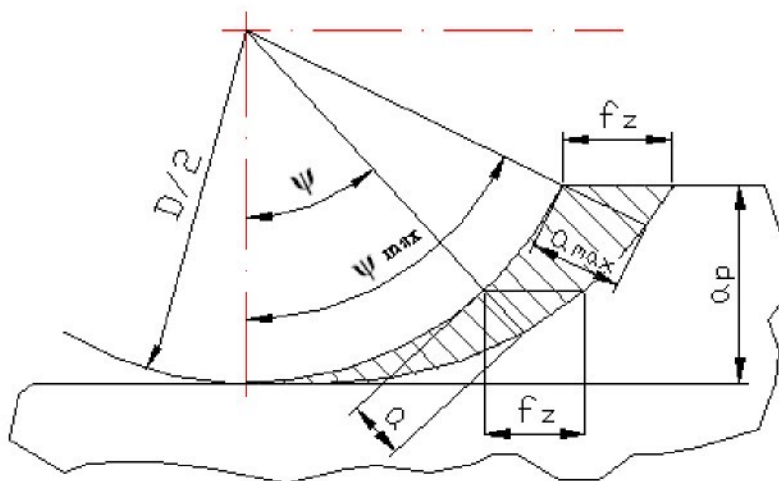
Obr. 1. Nesousledné frézování (vlevo), sousledné frézování (vpravo)

Při nesousledném frézování je smysl rotace nástroje v místě záběru proti směru posuvu obrobku. Obrobená plocha vzniká tím, že nástroj vniká do obrobku. Tloušťka třísky se mění od nulové hodnoty na hodnotu maximální (obr. 2). Vznikají silové účinky a deformace, které

způsobují velké opotřebení bříty. Řezná síla obsahuje složku, která působí směrem nahoru od místa upnutí a odtahuje obrobek od stolu.

U sousledného frézování je smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku. V počáteční fázi vniká zub frézy do obrobku a vzniká maximální tloušťka třísky. Řezné síly působí obvykle směrem dolů od místa upnutí.

U sousledného frézování dochází ke snaze o vtažení obrobku mezi nástroj a stůl, proto může toto frézování probíhat pouze na přizpůsobeném stroji při vymezené vůli a předpětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézky. Pokud tomu tak není, může dojít k poškození nástroje, obrobku i stroje [19].

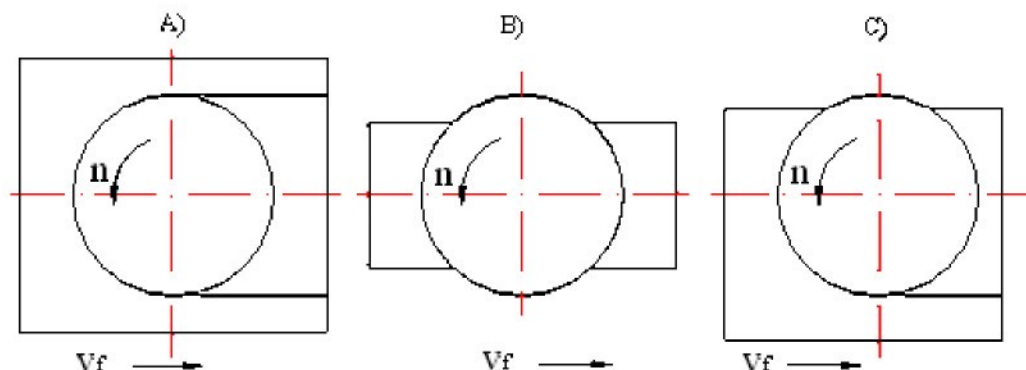


Obr. 2. Záběrové podmínky při válcovém obrábění [11]

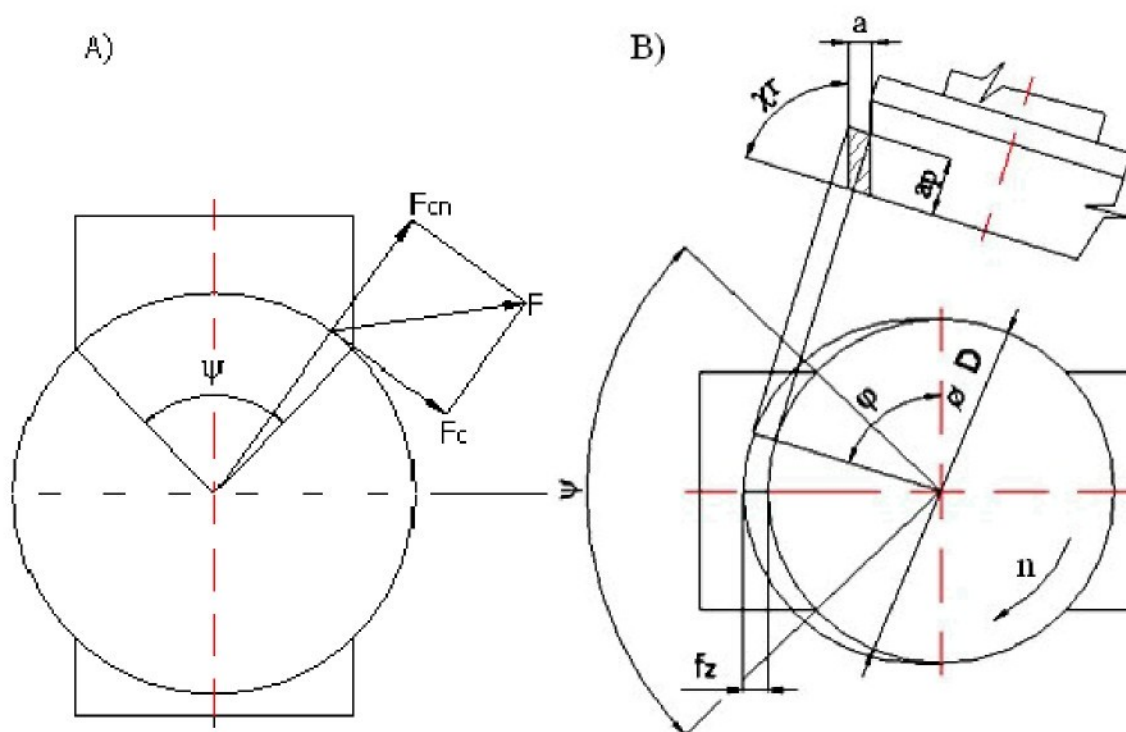
2.1.2 Čelní frézování

Při čelním frézování se uplatňují obvodové a čelní bříty zubů nástroje. Obrobená plocha je kolmá na osu frézy. Hloubka třísky se nastavuje ve směru osy frézy. Tloušťka třísky se zvětšuje směrem ke středu odřezané vrstvy a zmenšuje se v místě vstupu a výstupu zubů frézy do obrobku. Obrázek 4 znázorňuje síly působící při čelním obrábění na průřez třísky.

Čelní frézování dělíme podle symetričnosti na: úplné symetrické (obr. 3a), neúplné symetrické (obr. 3b) a neúplné nesymetrické (obr. 3c) [20].



Obr. 3. Frézování úplné symetrické (A), neúplné symetrické (B), neúplné nesymetrické (C)



Obr. 4. Čelní frézování – složky sil při obrábění (A), záběrové podmínky (B) [20]

2.1.3 Okružní frézování

Při okružním frézování slouží jako nástroj frézovací hlava osázená několika noži. Hlava koná většinou rotační a posuvný pohyb, při řezání závitů pouze rotační pohyb. Používá se při obrábění dlouhých válcových tyčí a při výrobě závitů [19].

2.1.4 Planetové frézování

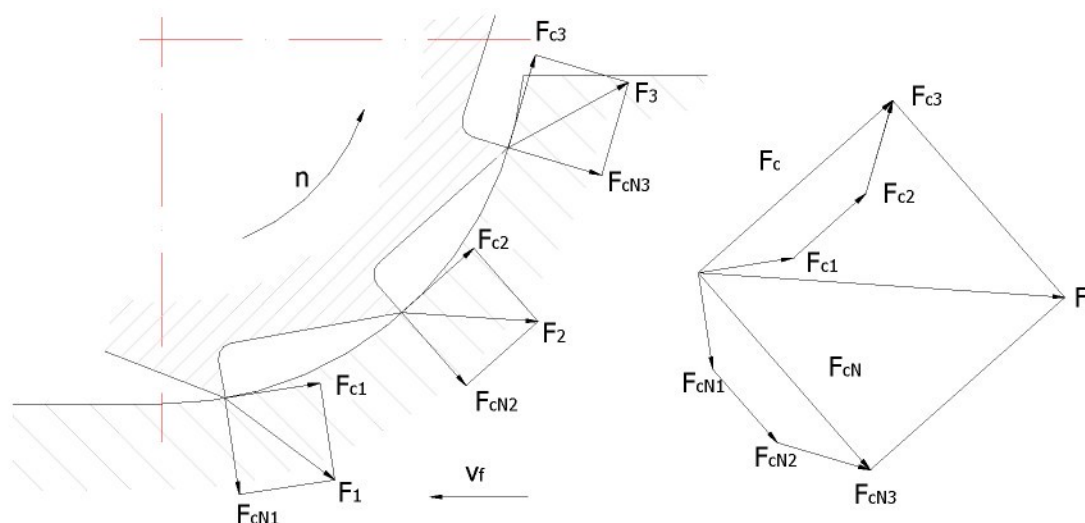
Planetové obrábění se uplatňuje u číslicově řízených frézek a u obráběcích center vybavených kruhovou interpolací. Pohyb frézy je pak řízen u těchto strojů po kružnici, takže lze obrábět části nebo i celé rotační plochy. Tento způsob se používá pro vnitřní frézování zápchů, kruhových zaoblení, větších otvorů a čelních ploch [19].

2.2 Silové poměry

Při odebrání materiálu obrobku vznikají na břitu síly. Směr a velikost složek těchto sil jsou značně závislé na četných faktorech, které ovlivňují proces obrábění. K těmto faktorům patří: způsob frézování, poloha nástroje, materiál obrobku, geometrie břitu, tloušťka třísky, velikost a typ opotřebení břitu nástroje a řezné podmínky.

Je možné říci, že výsledná síla se skládá ze tří složek: řezné síly F_c , posuvové síly F_p a přísluvové síly F_f .

Odřezávání materiálu se uskutečňuje současně několika zuby frézy a proto výsledná síla F je součtem sil, které působí na jednotlivé zuby (obr. 5). Každý zub odebrá různě velký průřez odřezané vrstvy a tím je i různě velká řezná síla na příslušném zubu [11].



Obr. 5. Síly působící na jednotlivé zuby při válcovém frézování

2.3 Teplo a teplota řezání

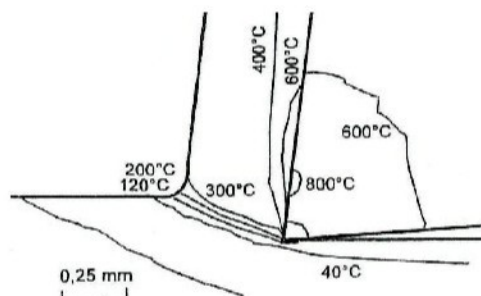
Teplo je jedním z nejdůležitějších činitelů ovlivňujících proces řezání. Vzniklé teplo mění mechanické vlastnosti obráběného materiálu, otupuje nástroj, v povrchových vrstvách ovlivňuje tření, pěchování, zpevnění apod. [11].

Množství tepla vznikajícího při obrábění závisí na velikosti práce vynaložené na odebrání třísky. Část tepla přechází do nástroje, část do obrobku a část vysálá okolí. Převážná část je však odvedena třískou. Tepelná bilance v místě řezání se dá vyjádřit takto:

$$Q_{tr} + Q_{def} = Q_N + Q_T + Q_O + Q_P \quad [J] \quad [11],$$

- kde
- Q_{tr} ... teplo vzniklé z práce tření,
 - Q_{def} ... teplo vzniklé z práce plastických a pružných deformací,
 - Q_N ... teplo, které zůstalo v nástroji,
 - Q_T ... teplo, které bylo odvedeno třískou,
 - Q_O ... teplo, které zůstalo v obrobku,
 - Q_P ... teplo, které bylo vysíláno do okolí.

Rozložení teploty v oblasti, ve které probíhá odřezávání třísky, závisí na množství vyvinutého tepla a na rychlosti jeho odvedení. Příklad rozložení teplotních polí v oblasti řezu je zobrazen na obr. 6 [19].



Obr. 6. Teplotní pole v oblasti řezání [18]

Teplota řezání je střední teplota celé styčné plochy nástroje s třískou a obrobkem. Podstatně ovlivňuje proces řezání. Působí nepříznivě na opotřebení nástroje, na trvanlivost nástroje a na jakost obrobené plochy. Proto je snaha teplotu řezání snížit pokud možno na co nejnižší hodnotu. Toho lze dosáhnout umělým chlazením [11].

2.4 Řezné podmínky při frézování

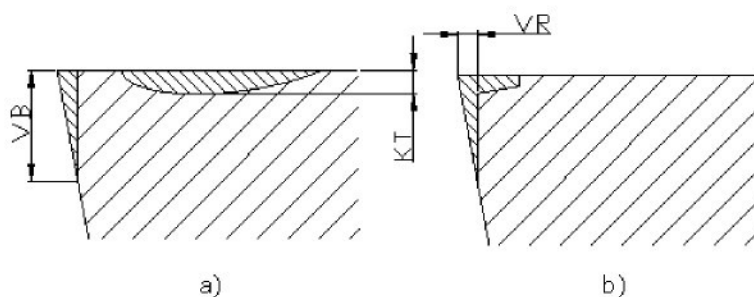
Základními řeznými podmínkami jsou posuv na zub, řezná rychlost a hloubka záběru. Posuv na zub se obvykle pohybuje v rozsahu 0,05 až 0,4 mm. Při nižších hodnotách posuvu se začíná projevovat vliv poloměru ostří břitu nástroje. Toto platí zejména pro nástroje s břitzy z povlakových slinutých karbidů.

Hloubka záběru se pohybuje při frézování v rozsahu 0,5 mm až 20 mm, příležitostně i více. Při hrubování se volí větší hloubky (až 20 mm), při frézování na čisto naopak menší hloubky záběru (0,5 mm až 2 mm).

Řezné rychlosti jsou závislé zejména na materiálu nástroje, obrobku a způsobu frézování. Pohybují se obvykle v rozsahu 20 až 570 m.min⁻¹ [6].

2.4.1 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 proměnou tloušťkou třísky. Kolísání teploty a rázy na břit způsobují, že kromě normálního otěru dochází i k vytváření trhlin a vylamování drobných částic z břitu [19].



Obr. 7. Charakter opotřebení břitu fréz
a) frézování na hrubo, b) frézování na čisto [19]

Otupení na čele zubu má obvykle charakter žlábků (obr. 7a). Při menších řezných rychlostech se jako kritérium opotřebení uvažuje opotřebení na hřbetu VB, jelikož velikost KT žlábků je malá (obr. 7b). 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 [19].

2.4.2 Ostření fréz

Úroveň hospodárných řezných podmínek při frézování závisí nejen na volbě vhodného nástroje, ale rovněž na jeho udržování, zejména na ostření. Při kvalitním ostření je menší drsnost obrobené plochy a zvyšuje se trvanlivost fréz.

Při ostření fréz je třeba volit takové pracovní podmínky, aby nedocházelo k přehřátí, a tím k vytváření trhlin nebo popraskání destiček. Na frézách se ostří hřbety, čela a přechodová ostří. Zuby se při ostření podpírají opěrkami, které jsou výškově nastaveny podle požadované velikosti úhlu hřbetu [20].

2.5 Upínání fréz a obrobků

Upínání fréz

Způsob upnutí záleží na druhu frézy. Nástrčné frézy se upínají pomocí frézovacího trnu, jenž má na jednom konci kuželovou stopku, kterou se upíná do dutiny vřetena. Krouticí moment se přenáší perem v drážce frézovacího trnu. Poloha frézy na trnu se zajišťuje rozpěracími kroužky. Kromě rozpěracích kroužků je na trnu vodící pouzdro, které je ustaveno v poloze, kde bude trn podepřen ložiskem.

Frézy s kuželovou stopkou se upínají redukčními pouzdry přímo do kužele ve vřetenu frézky. Redukční pouzdro se používá také tehdy, pokud se neshoduje kužel frézovacího trnu s kuželem vřetena. Frézy s válcovou stopkou se upínají do vřetena frézky sklíčidlem.

U číslicově řízených frézek se nástroje upínají do držáků, které kromě upnutí musí umožňovat axiální seřízení nástroje. Nástrojové držáky se upínají do vřetena za kuželovou nebo válcovou stopku. Poloha držáku je zajišťována nejčastěji kuličkovým nebo jiným uzávěrem [20].

Upínání obrobku

Současným záběrem několika zubů vznikají velké řezné síly, proto musí být obrobek řádně upnut. Při upínání nesmí být obrobek deformován. Obráběná bude i plocha co nejbližší vřetenu.

Menší obrobky se obvykle upínají do běžných strojních svěráků ovládaných ručně, pneumaticky nebo hydraulicky. K upínání větších obrobků se používá rozličných upínacích pomůcek, jako upínek, opěrek, podpěr apod. [19].

3 Procesní média

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 o 50 až 100% proti práci „za sucha“.

Procesním médiem mohou být kapaliny, plyny nebo přechod mezi kapalinou a plynem, kapalinové mlhy. Nejčastěji používaným médiem jsou však kapaliny [19].

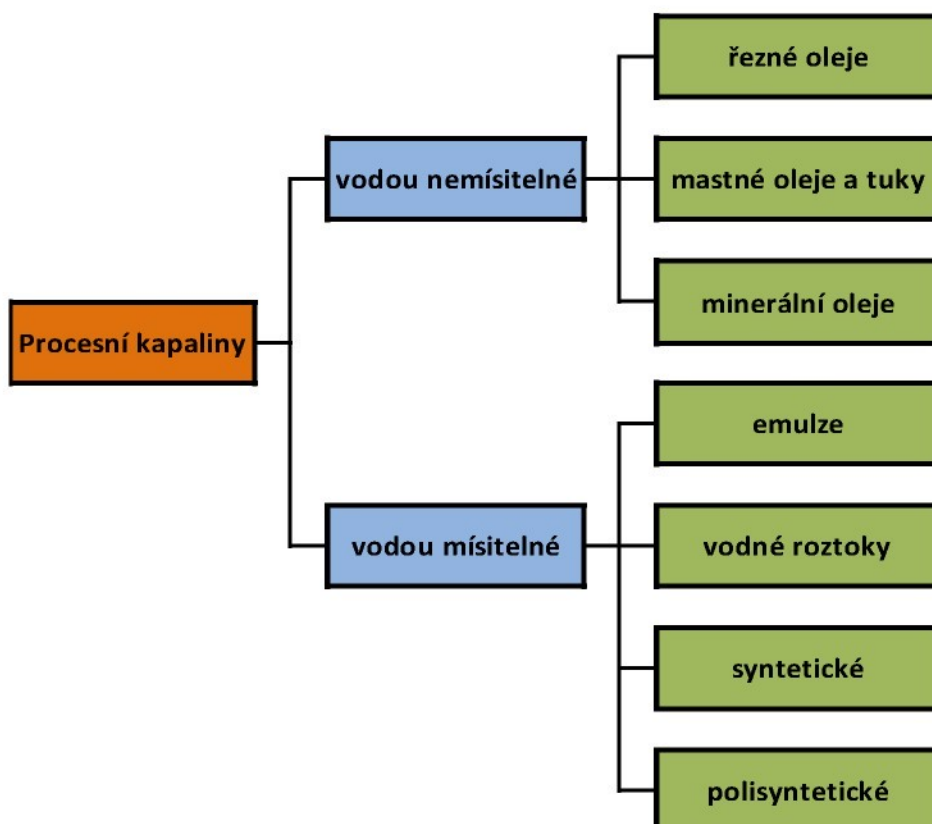
3.1 Druhy procesních kapalin a jejich vlastnosti.

Procesní kapaliny lze dělit podle různých hledisek. Podle charakteristických vlastností, určujících převážně účel použití, tj. podle mazacího a chladicího účinku, se procesní kapaliny třídí do těchto dvou skupin [5]:

- I. řezné oleje - tyto kapaliny mají převažující mazací účinek,
- II. chladicí kapaliny - tyto kapaliny mají převažující chladicí účinek.

Toto členění má však v současnosti nedostatky, jelikož je snaha zvětšit mazací účinek kapalin při zachování velkého účinku chladicího [5].

Další možností dělení procesních kapalin je podle mísitelnosti s vodou, které je znázorněno na obr. 8.



Obr. 8. Schéma dělení procesních kapalin podle mísitelnosti s vodou [2]

3.1.1 Minerální oleje

Minerální olej je výrobek z ropy vyznačující se dobrou mazací schopností, ochranným účinkem, odolností proti stárnutí a svou nepodléhavostí bakteriálnímu rozkladu. Jeho aktivita vůči kovu však není tak velká a má horší chladicí účinek, proto se minerální oleje používají jen pro vyhraněné případy [5].

3.1.2 Mastné oleje a tuky

Mastné oleje a tuky jsou látky rostlinného a živočišného původu s příměsí mastných kyselin. Mají velkou přilnavost ke kovu a dobrý mazací účinek. Na druhou stranu však mají nižší oxidační stálost než ropné látky s menší odolností proti stárnutí. Jejich použití je jen omezené [5], [4].

3.1.3 Řezné oleje

Řezné oleje vznikají zušlechtěním minerálních olejů za účelem zvýšení tlakové únosnosti a mazací schopnosti. Výhodou řezných olejů je dobrý chladicí účinek, mazací schopnost, ochrana proti korozi a nízká cena.

Mazací schopnost olejů se nejčastěji zušlechtuje organickými sloučeninami síry, chloru a fosforu, dále pak přísadami mastných látek a pevnými mazivy [5].

3.1.4 Emulzní kapaliny

Emulze je disperzní soustavou dvou vzájemně nerozpustných kapalin, z nichž jedna vytváří mikroskopické kapky, roztroušené v druhé kapalině. Nejčastěji používanou emulzní kapalinou při třískovém obrábění kovů je olej ve vodě. Minerální olej a voda emulze netvoří.

Emulzní kapaliny spojují přednosti vody a mazacích olejů. Jejich největším podílem je voda, proto mají velmi dobrý chladicí účinek a jsou levné. Mazací olej s emulgátorem jim dodává mazací schopnost a protikorozi vlastnosti. V současnosti patří k nejpoužívanějším procesním kapalinám [5].

3.1.5 Vodné roztoky

Základní složkou vodných roztoků je voda, která je nejlacinější a nejdostupnější kapalinou s velmi dobrým chladicím účinkem.

Použití neupravené vody není vhodné, jelikož má mnoho nedostatků. Tato voda má vysokou tvrdost danou vysokým obsahem různých solí, vápníku a hořčíku, které vytvářejí na povrchu strojů nerozpustné, po zaschnutí těžko odstranitelné usazeniny, usazující se v chladicí soustavě a na funkčních částech stroje. Voda také způsobuje korozi železných kovů, má malou smáčecí schopnost, je nositelkou bakterií a její odpařivost je nepříznivě vysoká.

Chceme-li proto použít vodu jako procesní kapalinu, musíme ji především zbavit nevhodného obsahu solí a také přidat přísady, které jí dají požadované vlastnosti [5], [4].

3.1.6 Syntetické kapaliny

Syntetické kapaliny jsou charakterizovány jako homogenní roztok vzájemně mísitelných látek, který neobsahuje olej. Jejich chladicí a vyplachovací účinek se uplatňuje u brousících operací.

Výhodou syntetických kapalin je špatná hořlavost, velká provozní stálost, dobrý chladicí a mazací účinek, delší životnost, biologická odolnost a lepší stabilita pH [5], [2].

3.1.7 Polysyntetické kapaliny

Polysyntetické kapaliny jsou minerální oleje doplněny syntetickými komponenty. Výroba spočívá v přidání určitého procenta syntetické složky do minerálního oleje [2].

Tato procesní kapalina svým ochranným filmem poskytuje účinnou protikorozi obranu mechanických částí. Velmi snadno odplavuje třísky. Ve srovnání s běžnými reznými kapalinami má prodlouženou provozní životnost [16].

3.2 Požadavky na procesní kapaliny

Hlavním úkolem procesní kapaliny je zajištění jakosti obráběného povrchu a trvanlivosti nástrojů při malé spotřebě energie, na což má vliv chladicí, mazací, čistící a ochranný účinek procesní kapaliny. Zdravotní nezávadnost, hospodárnost a provozní stálost jsou dalšími velmi důležitými faktory [5].

Chladicí účinek

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 [5].

Mazací účinek

Mazací účinek je schopnost kapaliny vytvořit na povrchu kovu přilnavou tlakovzdornou 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 s materiálem obrobku chemicky v mikroskopickou povrchovou mezní vrstvu o malém součiniteli tření [5].

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. Proto jsou kapaliny o viskozitě větší než cca 5°E/50°C pro třískové obrábění nevhodné [5].

Čistící účinek

Velmi důležitým úkolem procesní kapaliny je odstraňování třísek a pilin, které vznikají při obrábění. Shlukování a slepování kovových částic 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.

Čistící účinek se používá téměř u všech výrobních operací a je také jedním z důvodů použití kapalin při třískovém obrábění [5].

Provozní stálost

Cílem procesní kapaliny je co možná nejdéle setrvat v provozu bez změny vlastností. Čím delší jsou intervaly výměny, tím menší jsou prostoje strojů a tudíž i náklady na kapalinu samotnou. Dlouhodobost náplně je ovšem podmíněna zárukou fyzikální a chemické stálosti.

Stárnutí procesních kapalin olejného typu se projevuje zmenšením chladicího účinku, korozí a zvětšením pěnovitosti. Dalším projevem tohoto stárnutí je časté napadení bakteriemi, které způsobují hnilobný rozklad. To vše vede k zmenšení mazacího účinku, ke ztrátě ochranných schopností a ke korozi.

Základním předpokladem provozní stálosti je stálost již při uskladnění. Čím je stálost větší, tím déle většinou kapalina vydrží v provozu. Příznivý vliv mají velké nádrže, opatření proti pění, odstraňování nečistot vniklých do oběhu, odstraňování usazených kalů a pravidelná výměna náplně [5].

Ochranný účinek

Procesní kapalina nesmí zapříčinit vznik korozi. Neúčinkuje-li kapalina sama jako ochranný prostředek, který vytváří na povrchu vodotěsnou vrstvu, musejí se dodat potřebné vlastnosti přísadou proti korozi.

Důležitou podmínkou ochranného účinku je, že procesní kapaliny nesmějí rozpouštět nátěry obráběcích strojů a nesmějí být agresivní vůči gumovým těsněním [5].

Zdravotní nezávadnost

Obsluha strojů přichází často do styku s procesními kapalinami, proto je nezbytné, aby tyto kapaliny nebyly zdraví škodlivé nebo dokonce jedovaté. Nesmějí obsahovat látky

dráždicí sliznici a pokožku. Proto každá nově vyvinutá kapalina musí mít schválenou zdravotní nezávadnost hygienikem České republiky [5].

Nízké náklady

Spotřeba procesních kapalin je velmi značná, proto není možné přehlédnout náklady na ně vynaložené. Teprve po podrobném technickoekonomickém rozboru můžeme rozhodnout o vhodnosti použití určitého druhu kapaliny. Usuzovat podle cenových rozdílů je zcela nedostatečné, jelikož procesní kapaliny ovlivňují kritéria rozhodující o ekonomii obrábění v rozsahu vyšším než je hodnota spotřebovaných kapalin [5].

3.3 Vliv procesní kapaliny na frézovací proces

Jak již bylo uvedeno, řezný nástroj je během řezání namáhán tepelně, mechanicky a na otěr. Použití procesní kapaliny se projeví snížením teploty v okolí řezu a svým mazacím účinkem zmenší mechanické namáhání ostří nástroje [4].

Povrchově aktivní látky, které jsou obsaženy v procesní kapalině, jsou přiváděny do místa řezu a vytvářejí na obrobku i nástroji mezní vrstvu. Tato vrstva maziva ulpí ke kovu nástroje a neodstraňuje se při tření, takže brání přímému styku troucích se ploch. Zároveň se při tom snižuje i vnitřní tření, což se projeví ve zmenšení deformací obráběného materiálu i velikosti nárůstku (částic kovu obrobku usazujících se na čele nástroje) [5], [4].

Tvrdost nárůstku je v důsledku vysokých tlaků na čele o mnoho vyšší než obráběný materiál. Má podstatný vliv na průběh procesu řezání, na opotřebení nástroje a kvalitu povrchu obráběných ploch [4].

Procesní kapalina má zpravidla také čisticí účinek, který zmenšuje nalepování třísek na břity fréz a zlepšuje odvod třísek [20].

Vliv média při frézování nástrojem s vyměnitelnými břitovými destičkami

V současné době se velmi často používají nástroje ze slinutých karbidů, které nevyžadují při obrábění použití procesní kapaliny. Při velké řezné rychlosti, která je při používání těchto nástrojů dosahována, vzniká v oblasti řezu velmi vysoká teplota. Každá procesní kapalina, která by se dostala do blízkosti břitu, by se okamžitě změnila v páru a ztratila tak jakýkoliv chladicí efekt [17].

Použití chladicí kapaliny má za následek výkyv teploty v oblasti řezu. Přiváděná kapalina zvyšuje teplotní výkyv tím, že působí na břit jen v okamžiku, kdy břit není v záběru. Břit je opakovaně zahříván a následně ochlazován. Důsledkem tohoto tepelného šoku je vznik trhlin v břitové destičce, které jsou vyvolané napětím a které mohou způsobit otupení ostří břitu [17].

3.4 Způsoby přívodu procesní kapaliny do místa řezu

Procesní kapaliny prodlužují trvanlivost nástroje a zvyšuje jakost obrobené plochy. Jejich účinnost je možné zvýšit úpravou přívodu této kapaliny.

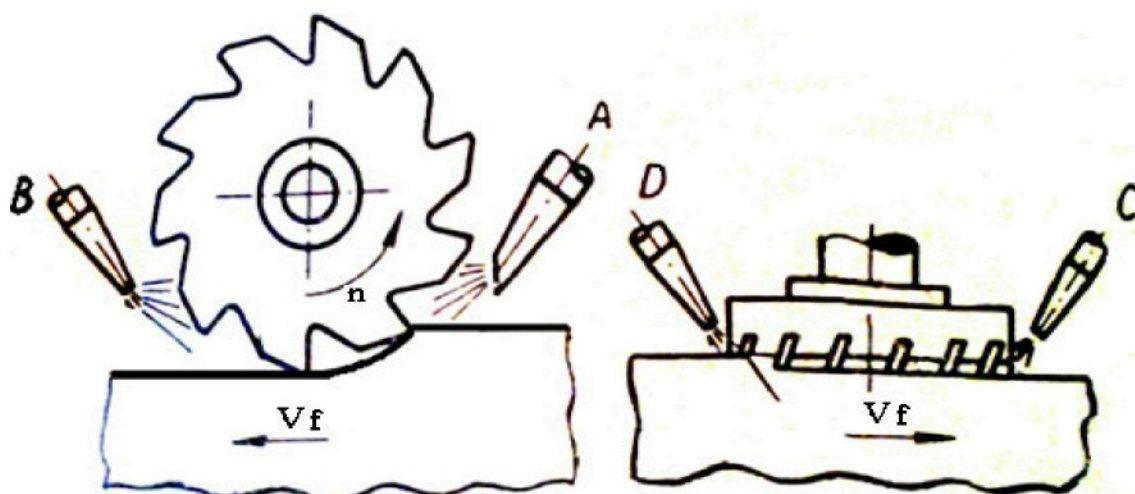
Rozeznáváme běžný způsob přívodu procesní kapaliny, tlakový přívod a chlazení mlhou. Podstata těchto metod je v užití poměrně vysokých tlaků, přiváděných do místa řezu, způsobujících zvýšení chladicího a mazacího účinku [5].

3.4.1 Běžný způsob přívodu procesní kapaliny

U většiny způsobů obrábění jsou procesní kapaliny přiváděny do místa řezu ze strany obrobku. Procesní kapalina zasahuje nejprve odcházející třísku, obrobek a pak teprve nástroj.

Výhodou tohoto způsobu je, že nevyžaduje žádnou úpravu přívodního potrubí a vystačí si s běžným vybavením obráběcího stroje. Skládá se z nádrže na procesní kapalinu, čerpadla a rozvodného potrubí. Potrubím můžeme měnit směr přívodu kapaliny. Množství kapaliny je redukováno škrcením průtoku výstupním ventilem.

Při frézování lze použít i přívodu kapaliny ze dvou stran, jak je zobrazeno na obrázku 9. Pokud použijeme pouze jeden přívod procesní kapaliny, pak dáváme přednost poloze A u válcového frézování a při čelním frézování v místě D [5].



Obr. 9. Varianty přívodu procesní kapaliny do místa řezu při frézování [5]

3.4.2 Tlakový způsob

U tlakového způsobu je do místa řezu přiváděna procesní kapalina pod vysokým tlakem. Průměr výstupní trysky a tlak proudící kapaliny jsou důležitými parametry.

Kapalina je přiváděna přímo do místa řezu zespodu na hřbet nástroje. Při styku rozprášené kapaliny se zahřátým kovem dochází k jejímu rychlému vypařování. Tím se dosáhne intenzivnějšího odvodu tepla než u normálního přívodu z vrchu. Rozprášená kapalina lépe proniká do narušeného materiálu, čímž přispívá ke snížení vnitřního tření.

Tento způsob chlazení lze doporučit všude tam, kde má teplota prokazatelný vliv na zmenšování trvanlivosti nástrojů. Nevýhodou je však rozstřík kapaliny a tvorba mlhy. Proto je třeba při aplikaci této metody použití krytů, zabráňujících rozstříku kapaliny do okolí stroje [5].

3.4.3 Metoda MQL

U této metody je dodávána procesní kapalina do oblasti řezu ve formě mlhy. Vzduch, který se rozpíná, obsahuje částičky chladicí kapaliny, čímž dosáhne lepší schopnosti přijímat teplo.

Zařízení určené pro použití metody MQL se skládá z nádrže, rozprašovače s výstupní tryskou a z přívodního potrubí. Tlak přiváděného vzduchu je určován průměrem výstupního otvoru trysky. Míšení vzduchu s emulzí se uskutečňuje v rozprašovači.

Velkou výhodou této metody je možnost použití v případech, kde chlazení běžným způsobem se uplatnit buď nedá, nebo má negativní účinky. Proto se využívá při práci nástrojů s destičkami slinutých karbidů, při práci na hoblovkách nebo pro broušení tenkých součástí [5].

3.5 Kontrola procesních kapalin

Optimálního účinku procesní kapaliny dosáhneme jen za předpokladu, že požadované vlastnosti zůstanou dlouhou dobu nezměněny. Ty jsou však vystaveny působení chemických i mechanických vlivů, které ovlivňují jejich původní vlastnosti. Jinak řečeno procesní kapaliny stárnou.

Provozní kontrola stárnutí se nejprve provádí posouzením vzhledu kapaliny v nádrži a oběhu, dále pak posouzením vzhledu kovových povrchů omývaných kapalinou. Nepostačí-li tento posudek, přejdeme ke zkouškám korozivnosti kapaliny.

Změnu jakosti emulzních kapalin poznáme podle souvislého povlaku na povrchu emulze, podle usazených kalů na dně i stěnách nádrže a lepkavého povlaku na stroji. Intenzita mléčného zabarvení, hnilobný zápach a rezavé skvrny na povrchu stroje jsou také známkou stárnutí kapaliny. Pokud se žádná ze zmíněných závad neprojeví, kontrolujeme indikačními papírky hodnotu pH. Klesne-li tvrdost na hodnotu 7,5 pH, přidáme ihned z důvodu nebezpečí koroze do emulze sodu. Kontrolu koncentrace provádíme laboratorní zkouškou obsahu olejnatých podílů.

U vodných roztoků je kontrola omezena na sledování povrchu strojů a na zkoušky pH. Z důvodu bezpečnosti pracovníků nesmí hodnota pH přesáhnout hodnotu 9,5.

Chceme-li posoudit stupeň zestárnutí řezného oleje, musíme provést laboratorní zkoušku. Řezné oleje však stárnou velmi pozvolna, proto kontrolujeme stárnutí olejů po dlouhých obdobích a to především u ústředního rozvodu kapaliny.

Procesní kapaliny je možné úspěšně čistit filtrací nebo zdlouhavým usazením [5].

3.6 Likvidace použitých kapalin

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 [4].

3.7 Plynné prostředí

Plynné látky používáme k chlazení tehdy, je-li nutné chladit nástroj jinak než přívodem procesní kapaliny. Z plynů se používá jako procesního prostředí téměř výhradně vzduchu. Ten má však ve srovnání s kapalinou menší chladicí účinek, vykazuje však určitý mazací účinek.

Dalším ze způsobů je chlazení stlačeným oxidem uhličitým. Tento způsob se používá pro chlazení těžkoobrobitelných materiálů a slitin. Tenký paprsek CO_2 je přiveden do oblasti řezu. V potrubí dochází k ulpívání pevných částic, které plyn obsahuje, na povrchu obrobku ve tvaru jinovatky o teplotě -79°C . Tím dochází k intenzivnímu odvodu tepla nástroje i obrobku.

Tato metoda má však i mnoho nevýhod, například nutnost použití odvětrávacího zařízení, vysoké náklady na CO_2 a jisté nebezpečí při jeho používání [4].

4 Charakteristika stroje a měřicího zařízení

4.1 Obráběcí stroj

Obráběcí operace byly uskutečněny na frézce FNG 32 od společnosti TOS Olomouc s.r.o. (obr. 10), která je součástí strojního vybavení laboratoře Katedry obrábění a montáže TU v Liberci. Hlavní technické parametry frézky jsou uvedeny v tabulce 1.

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	2070 x 2120	[mm]
Výška stroje	2115	[mm]

Tab. 1. Technické charakteristiky [21]



Obr. 10. Frézka FNG 32

4.2 Dynamometr KISTLER

K experimentálnímu měření řezné síly F_c , síly působící ve směru posuvu F_f a přísluvu F_p byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER typu 9265B.

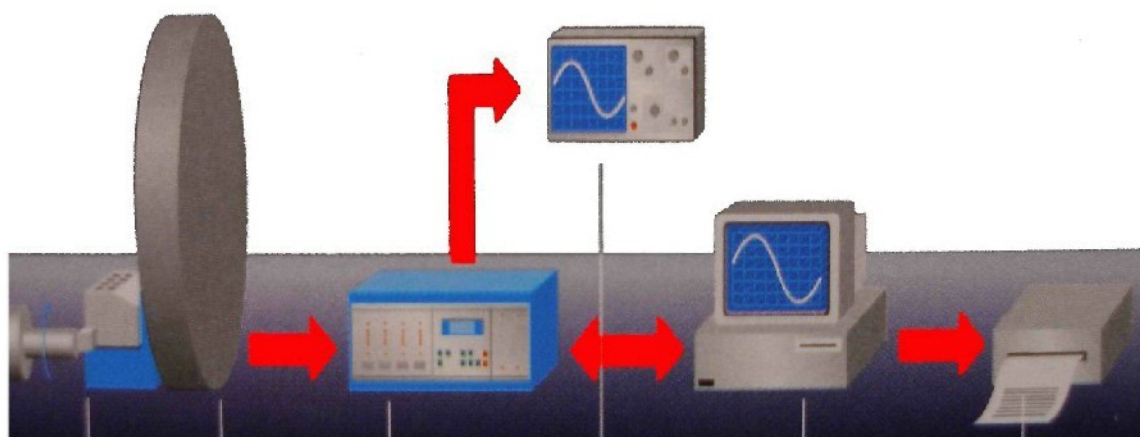
Dynamometr KISTLER má vysokou vlastní frekvenci. Obsahuje čtyři piezoelektrické snímače, z nichž každý je složen z piezoelektrických destiček, které jsou uspořádány tak, že každá zachycuje sílu v jiném směru. Konstrukce dynamometru je uzpůsobena tak, aby se náboje z jednotlivých snímačů sčítaly. Tudíž zde nemá na vlastní měření vliv, na kterém místě upínací části přístroje síla působí. Součet nábojů bude vždy stejný. Náboje z piezoelektrických snímačů jsou zesilovány nábojovým zesilovačem 5019 B. Dynamometr je schopen měřit staticky i dynamicky [2].

Dynamometr slouží k měření řezných sil při broušení, soustružení, frézování atd. Při použití dynamometru na frézce se toto zařízení připevňuje pomocí upínek k pracovní desce.

Správná funkce dynamometru je podmíněná dodržением těchto podmínek:

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

Pro změření jednotlivých složek řezné síly bylo nutno připravit měřicí soupravu (obr. 11), která se skládá z dynamometru KISTLER typ 9265 B, nábojového zesilovače KISTLER a osobního počítače s nainstalovaným programem LabVIEW 6.1.



Obr. 11. Schéma zapojení dynamometru Kistler [18]

K zaručení správné funkce celé soupravy byla provedena kalibrace pro všechny tři měřené síly (F_c , F_f a F_p). Kalibrace se provádí vyvoláním silového účinku známé velikosti a následnou kontrolou zobrazené hodnoty na monitoru počítače. Neshoda těchto hodnot je upravena korekcí konstant v programu LabVIEW 6.1.

4.3 Laboratorní profiloměr MITUTOYO

Laboratorní profiloměr MITUTOYO SV-2000 N2 je zařízení (obr. 12), které bylo použito k určení jakosti obrobenej plochy. Především z hlediska parametrů R_a , R_z , R_t a také

z hlediska určení nosného podílu plochy profilu. Použitým softwarem pro zpracování měřených údajů na profiloměru MITUTOYO se stal program SURFPAK 1.100, jehož výstupy mají textovou i grafickou formu.



Obr. 12. Laboratorní profiloměr MITUTOYO SV-2000 N2

4.4 Rentgenový difraktometr X'Pert PRO MPD

Rentgenový difraktometr X'Pert PRO MPD, který je součástí strojního vybavení laboratoře rentgenové difrakce na Katedře inženýrství pevných látek FJFI ČVUT Praha, byl použit k určení zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobených vzorků metodou rentgenové difrakční analýzy (obr. 13).

Ozáří-li se částí povrchu zkušební polykrystalického vzorku rentgenovými paprsky, dochází v určitých směrech k difrakci paprsků na vhodně orientovaných atomových rovinách jednotlivých krystalů. Pokud je rozdíl drah dvou rovnoběžných paprsků celočíselným násobkem vlnové délky použitého vlnového záření, tak rozptyl záření na sousedních mřížkových rovinách vede ke vzniku interferenčního maxima. Působením mechanického napětí nastane změna mezirovinné vzdálenosti nenapjatého materiálu, čímž dojde k úhlovému posunu interferenčního maxima [2].

4.5 Aplikátor Accu-Lube

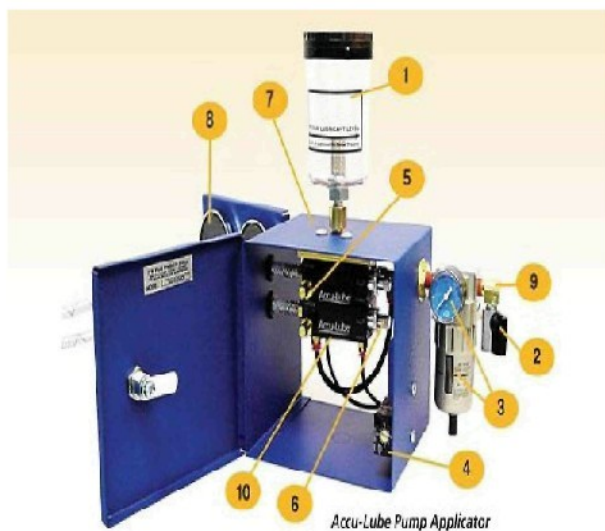
Aplikátory Accu-Lube jsou vyvinuty speciálně pro dávkování přesně řízeného množství některého z mazacích prostředků Accu-Lube. My jsme použili procesní kapalinu Accu-Lube LB 2000. Popis aplikátoru je uveden na obrázku 14.



Obr. 13. Rentgenový difraktometr X'Pert PRO MPD

Princip aplikátoru

Kapalina se z nádoby dostává do čerpadla, které ji dopravuje kapilárou, tenkou hadičkou, vedenou uvnitř vzduchové hadice k trysce. Zde ji strhává proud stlačeného vzduchu. Množství dávkovaného oleje se reguluje zdvihem čerpadla a frekvencí zdvihu. Tento systém strhávání kapaliny na konci trysky vytváří jemný aerosol [1].



- 1) Nádrž na procesní kapalinu
- 2) Zapínání/Vypínání
- 3) Vzduchový filtr
- 4) Pneumatický frekvenční generátor
- 5) Škrťací vzduchový ventil
- 6) Regulace průtoku kapaliny
- 7) Tělo aplikátoru
- 8) Magnetické přichytky
- 9) Vzduchový přívod aplikátoru
- 10) Čerpadla

Obr. 14. Popis aplikátoru Accu-Lube [2]

5 Experimentální část řešení

5.1 Příprava zkušebních vzorků

Pro experimentální část bakalářské práce byla použita ocel C45+N dle ČSN EN 10083-2+A1 /420932/. Toto značení odpovídá oceli 12 050.1 dle ČSN EN 10020. Důvodem volby této oceli je dobrá obrobiteľnosť materiálu (14b) a případná porovnatelnost výsledků s prací Miroslava Rejzka [18], ve které se zkoumal účinek procesní kapaliny na technologii soustružení.

Polotovarem byla zvolena TYČ PLOCHÁ 70 x 15 x 6000 ČSN 42 5522.1. Polotovár byl následně rozřezán v prostorách laboratoře katedry obrábění a montáže rámovou pilou na kusy o délce 70 mm a následně frézován ze čtyř stran frézku FNG 32 na rozměr 53 x 68 x 15 mm. Touto činností bylo zajištěno odstranění defektní vrstvy na povrchu vzorku. Posléze bylo provedeno sražení hran dílenským pilníkem.

5.2 Použitá procesní média

Pro experimentální řešení bakalářské práce bylo zvoleno šest odlišných řezných prostředí: Microcool 387+, Paramo SK 300, Accu-Lube LB 2000, Solgreen 540, okolní a podchlazený vzduch. Důvod použití těchto prostředí byl totožný jako u volby materiálu – komplexní porovnatelnost výsledků obou prací.

5.2.1 Accu-Lube LB 2000

Popis

Přípravek Accu-Lube LB 2000 je mazivo na bázi vysoce rafinovaných přírodních olejů [18].

Vlastnosti

Accu-Lube LB 2000 je procesní médium s velmi dobrou mazací schopností. Používá se v neředěném stavu a je zvláště vhodné pro použití v mikromazacích dávkovacích systémech. Toto médium je biodegradabilní a nedráždí pokožku, je vynikající pro železné a neželezné kovy. Před tepelným zpracováním musí být odstraněno [18]. Jeho technické parametry jsou uvedeny v tabulce 2.

ACCU-LUBE LB 2000		
VLASTNOSTI	HODNOTA	JEDNOTKY
Viskozita při 40°C	35	[mm ² /s]
Hustota při 15°C	920	[kg/m ³]
Barva	zelenomodrá	[-]

Tab. 2. Technické parametry [18]

Oblast použití

Accu-Lube LB 2000 se především používá u frézovacích operací, tvářecích operací, závitování a protlačování [18].

5.2.2 Microcool 387+

Popis

Microcool 387+ je semisyntetický, bakteriostatický a fungistatický koncentrát chladicí mazací kapaliny. S vodou vytváří průsvitnou zelenou mikroemulzi [13].

Vlastnosti

Microcool 387+ je velice dobře emulgovatelný, vytváří nemastnou tekutinu, což má význam především pro čistotu pracoviště. Voda, která je obsažena v emulzi, se odpařuje rychleji než koncentrát Microcool 387+. To se projeví v malém množství doplňovaného koncentrátu [13]. Technické parametry kapaliny Microcool jsou uvedeny v tabulce 3.

MICROCOOL 387+		
VLASTNOSTI	HODNOTA	JEDNOTKY
Velikost pH 5% roztoku v dest. vodě při 20°C	9,6	[-]
Hustota při 15°C	1020	[kg/m ³]
Koeficient refraktometru	2,7	[-]
Barva	tmavě zelená	[-]
Vzhled koncentrátu	čirá kapalina	[-]

Tab. 3. Technické parametry [13]

Použití

MICROCOOL 387+ je určen pro soustružení, vrtání a frézování ocelí a slitin hliníku. Doporučená koncentrace je od 5 % [13].

5.2.3 Paramo SK 300

Popis

Procesní kapalina tvořená směsí syntetických komponentů, vhodných inhibitorů a vody. Výhodou Parama SK 300 je šetrnost k životnímu prostředí. Biologická odbouratelnost mazací složky je vyšší než 80% [15].

Vlastnosti

Paramo SK 300 je dokonale rozpustné ve vodě. S vodou vytváří stabilní vodný roztok se značnou mikrobiální stabilitou, to znamená, že toto médium má dlouhou provozní životnost. PH je po dlouhou dobu udržováno na konstantní hodnotě. Má dobré protikorozní vlastnosti. Procesní médium má dokonalou smáčivost povrchu, penetrační schopnost, disponuje ideálním odvodem tepla z prostoru řezu a nízkou pěnivostí [18]. Technické

parametry procesní kapaliny Paramo jsou uvedeny v tabulce 4.

Oblast použití

Procesní kapalina Paramo SK 300 se používá v koncentraci 3 až 7 % ve vodě pro operace třískového obrábění a broušení tepelně zpracovaných železných i neželezných kovů [15].

PARAMO SK 300		
VLASTNOSTI	HODNOTA	JEDNOTKY
Viskozita při 40°C	6,7	[mm ² /s]
Velikost pH 5% roztoku v dest. vodě při 20°C	9,4	[-]
Hustota při 15°C	1105	[kg/m ³]
Koeficient refraktometru	2	[-]
Bod tuhnutí	-14	[°C]
Barva	modrofialová	[-]
Vzhled koncentrátu	fialová kapalina	[-]

Tab. 4. Technické parametry [15]

5.2.4 Solgreen 540

Popis

Syntetická, bistabilní, vodou mísitelná obráběcí kapalina vhodná zejména pro železné kovy [2].

Vlastnosti

Složení procesní kapaliny Solgreen 540 neobsahuje deriváty na bázi chlóru nebo síry, dusitany, boritany, fenoly, DEA, uhlovodíky a triazin. Kapalina je velmi odolná proti pění v měkké vodě. Použitím alkalických odmašťovačů je jednoduše omyvatelná. Produkt poskytuje mezioperační ochranu a je velmi odolný proti mikroorganismům [2]. Technické parametry kapaliny Solgreen jsou uvedeny v tabulce 5.

SOLGREEN 540		
VLASTNOSTI	HODNOTA	JEDNOTKY
Viskozita při 40°C	3,2	[mm ² /s]
Velikost pH 5% roztoku v dest. vodě při 20°C	9,2	[-]
Hustota při 15°C	1060	[kg/m ³]
Bod tuhnutí	-	[°C]
Koeficient refraktometru	2,44	[-]

Tab. 5. Technické parametry [2]

Oblast použití

Procesní kapalina Solgreen 540 je doporučena pro přebušovací procesy: vnitřní a vnější, rovinné a cylindrické. Je také vhodná pro pásové leštící stroje [2].

5.2.5 Podchlazený vzduch

Jako plynné médium byl použit vzduch z okolního prostředí, který byl podchlazen na teplotu 4°C. Této teploty jsme dosáhli zařízením Cold Air Gun od společnosti ITW Vortec, které používá filtrovaný stlačený vzduch a princip vírové trubice. Vírová trubice převádí stlačený vzduch do studeného proudu, jehož teplotu je možné regulovat polohovatelnou tryskou [7].

5.2.6 Okolní vzduch

Za účelem celkového porovnání vlivu procesního média byl použit při obrábění za sucha vzduch z okolí, u kterého byla naměřena teplota 21°C.

5.3 Metodika experimentu

5.3.1 Příprava experimentu a měřené parametry

Před vlastním měřením byl nejprve připraven stroj včetně nástroje. Na nástroj, čelní pětibřitou frézu, byly připevněny břity ze slinutých karbidů od firmy Pramet Tools s.r.o. Takto připravený nástroj pneumaticky upnutý do vřetena stroje byl podroben měření čelního a radiálního házení jednotlivých břitů nástroje. Na desku stolu byl poté připevněn dynamometr s již dříve upnutým svěrákem. Chlazení dynamometru zajišťovala uzavřená cirkulace vody.

Tabulka 6 nám uvádí zkratky, které byly použity při vyhodnocení experimentu. V tabulce 7 jsou pak uvedeny řezné podmínky. K určení materiálových konstant, nutných pro výpočet řezných podmínek, byla použita literatura [9].

Zkratka	Použité médium
Mic	Procesní kapalina Microcool 387+
Par	Procesní kapalin Paramo SK 300
MQL	Procesní kapalina Accu-Lube LB 2000
Sol	Procesní kapalina Solgreen 540
PV	Podchlazený vzduch
OV	Okolní vzduch

Tab. 6. Zkratky použité při vyhodnocování experimentu

Použity byly tyto kapaliny: Microcool 387+, Paramo SK 300, Accu-Lube LB 2000 a Solgreen 540. Kapalina Accu-Lubbe LB 2000 byla aplikována ve formě mlhy (metoda MQL) pomocí speciálního aplikátoru Accu-Lube, který byl připevněn ke stroji pomocí

magnetů. Přívod ostatních kapalin zajišťoval chladicí systém stroje. Jako plynné médium byl použit nijak neupravený vzduch z okolí a vzduch podchlazený na 4 °C. Podchlazení vzduchu zajišťovalo zařízení Cold Air Gun, které bylo magnety upnuto k vřeteníku stroje.

Obráběný materiál	Ocel 12 050.1 (C45+N)				
Rozměry polotovaru	70 x 15 x 6000 [mm]				
Stroj	Frézka FNG 32				
Způsob obrábění	Čelní frézování				
Nástroj	Břitová destička		SPEW 1204ADSN		
	Čelní pětibřitá fréza Φ 80 mm				
Řezná rychlost	135,4		[m/min]		
Otáčky vřetene	540		[s ⁻¹]		
Experiment 1	Posuv	0,6	[mm/ot.];	hloubka záběru	1 [mm]
Experiment 2	Posuv	0,6	[mm/ot.];	hloubka záběru	3,5 [mm]
Experiment 3 (5)	Posuv	1,5	[mm/ot.];	hloubka záběru	1 [mm]
Experiment 4	Posuv	1,5	[mm/ot.];	hloubka záběru	2 [mm]
Řezné prostředí	Solgreen 540 Microcool 387+ Paramo SK 300 Accu-Lube LB 2000 (přívod MQL) Okolní vzduch Podchlazený vzduch o teplotě 4°C				
Metoda přívodu procesního média	Tryska chladicího systému stroje	225			[l/hod]
	Tryska pro metodu přívodu MQL	0,5			[l/hod]
	Chlazení vzduchem				
Měřené parametry	Řezná síla	F _c		[N]	
	Posuvová síla	F _f		[N]	
	Přisuvová síla	F _p		[N]	
	Drsnost povrchu	Ra, Rt, Rz		[μm]	
	Nosný podíl profilu	Abbottova křivka c _{tp50}		[μm]	
	Zbytkové napětí v povrchu	σ		[MPa]	
Měřicí přístroje	Řezná síla	Dynamometr Kistler			
	Drsnost povrchu	Profiloměr MITUTOYO			
	Zbytkové napětí	Rentgenový difraktometr			

Tab. 7. Metodika experimentu

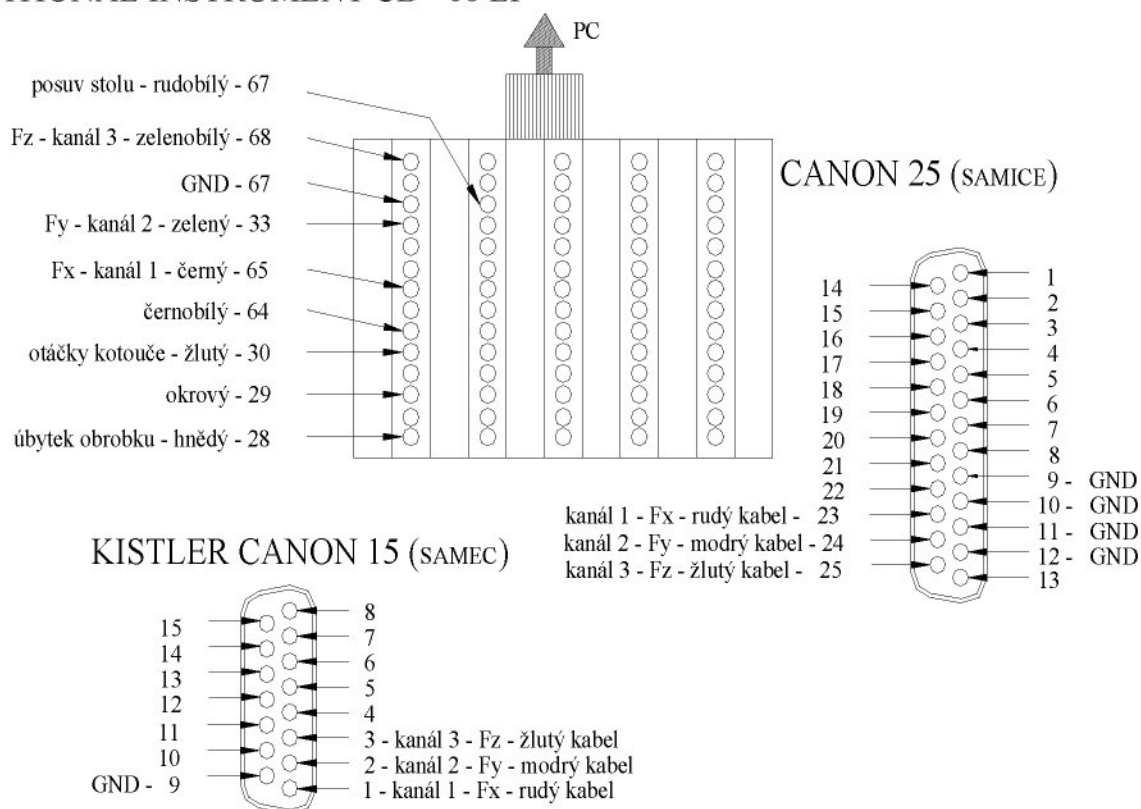
Jak již bylo uvedeno výše, cílem experimentálního řešení bakalářské práce je zhodnotit vliv použitých procesních médií z hlediska drsnosti, zbytkového napětí a sil vznikajících při čelním frézování.

5.3.2 Měření sil

K měření sil byl použit dynamometr Kistler, který umožňuje měření ve směru posuvu (F_f), přísmu (F_p) a řezné síly (F_c). Jeho předchozí konfigurace však umožňovala měření síly pouze ve směru posuvu (F_f) a řezné síly (F_c). Proto bylo nutno upravit zapojení měřicí sestavy.

Schéma zapojení nového propojovacího kabelu je zobrazeno na obr. 15. Tento kabel slouží k propojení nábojového zesilovače typu 5019B140 (sériové číslo 10 80215) s kabelem, který vede do propojovací desky NATIONAL INSTRUMENT.

NATIONAL INSTRUMENT CB - 68 LP



Obr. 15. Schéma zapojení nového propojovacího kabelu

Dalším krokem byla úprava softwaru pro měření sil vytvořená ve vývojovém prostředí LabVIEW a kalibrace měřicí soustavy. Těmito změnami bylo umožněno měření sil i ve směru přísmu (F_p).

Vlastní měření probíhalo dle tohoto postupu:

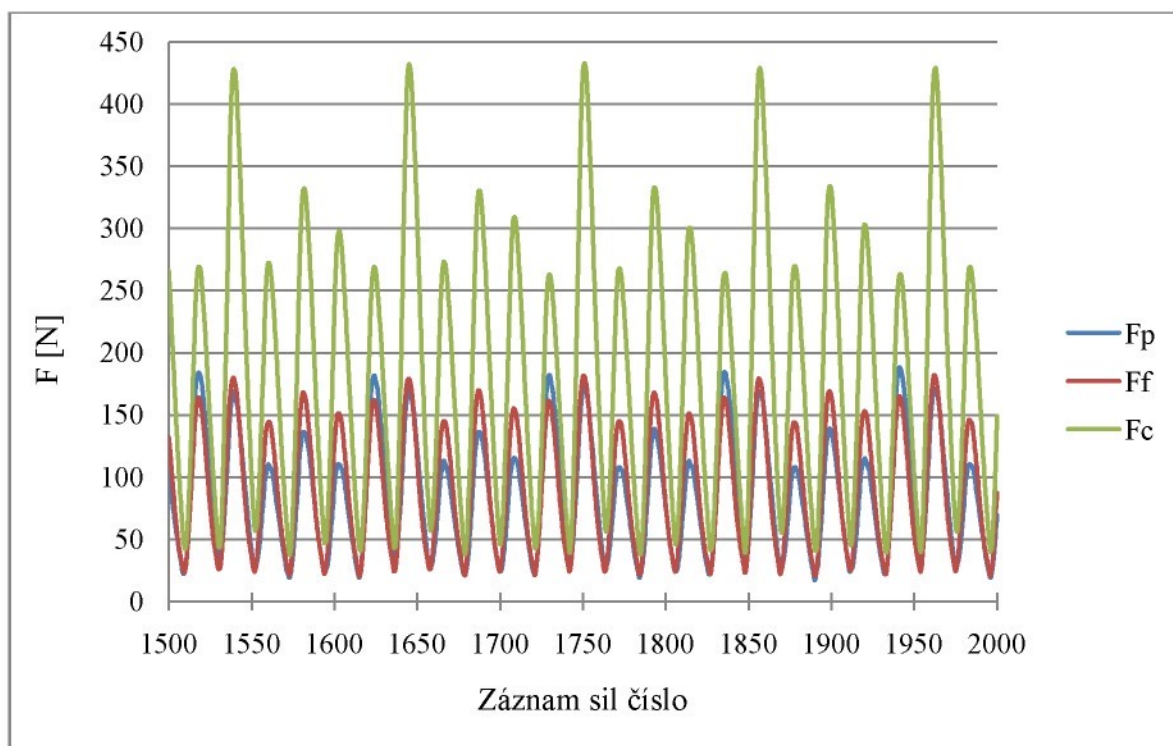
- naplnění chladicího systému stroje konkrétní procesní kapalinou,
- výměna břitové destičky na nástroji,
- příprava třech vzorků (pojmenujme je vzorky A), které byly následně postupně frézovány z jedné strany za podmínek Experimentu 3,
- příprava dalších tří vzorků (pojmenujme je vzorky B), které byly postupně frézovány za podmínek Experimentu 1,

- označení obrobené plochy všech šesti vzorků důlčíkem a sražení hran dílenským pilníkem,
- otočení těchto šesti obrobků o 180°,
- frézování vzorků A za podmínek Experimentu 2,
- frézování vzorků B za podmínek Experimentu 4,
- výměna použité procesní kapaliny.

Tento postup se pro každé procesní médium opakoval.

Experiment 5 proběhl dodatečně za stejných řezných podmínek jako Experiment 3. Vzorky však byly před vlastním měřením vyžihány.

V okamžiku, kdy se břit dostal do záběru, začaly růst síly F_f , F_c a F_p . Po překročení síly 30 N spustil program LabVIEW zápis hodnot, který trval 2 sekundy. Za tuto dobu software zaznamenal 2000 hodnot, z nichž se následně vytvářelo grafické zobrazení průběhu sil. Z důvodu nutnosti vyloučení počátečního skokového nárůstu sil bylo pro vyhodnocení vybráno posledních 500 hodnot, které byly již ustálené. Příklad grafického zobrazení naměřených hodnot je uveden v grafu 1.



Graf 1. Ukázka záznamu posledních 500 hodnot sil naměřených při frézování

Grafický průběh jednotlivých sil lze popsat jako křivku, která neustále nabývá maximální a minimální hodnoty. Maximum je však vždy rozdílné.

Při vyhodnocení velikosti sil F_f , F_c a F_p bylo postupováno následovně. Pro každou sílu byly vybrány všechny hodnoty lokálního maxima, z nichž byla následně vytvořena pomocí

statistických funkcí střední hodnota. Ta byla pro každé médium zapsána do tabulky a vnesena do grafů (závislost F_f , F_c a F_p).

5.3.3 Měření drsnosti

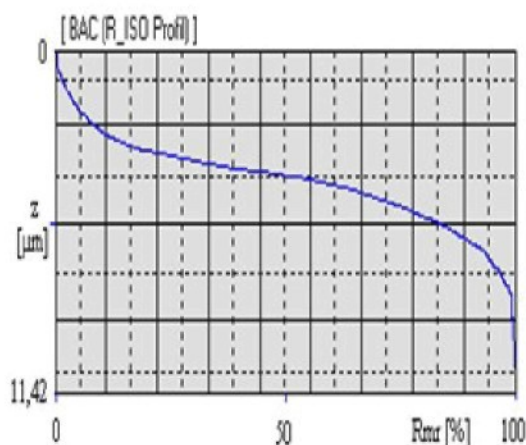
Drsnost povrchu je definována jako část geometrických odchylek s relativně malou vzdáleností nerovností [3].

K měření drsnosti povrchu obrobených vzorků byl použit laboratorní profiloměr MITUTIYO podporovaný softwarem Surfpak. Měřenými parametry byly R_a , R_z , R_t a také nosný podíl profilu.

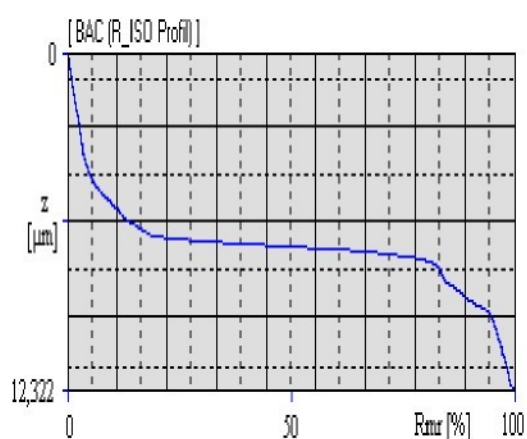
Střední směrodatná odchylka profilu R_a se nejčastěji používá k hodnocení drsnosti povrchu. Jde o průměrnou aritmetickou hodnotu absolutních odchylek profilu v rozsahu základní délky. Parametr R_z je výškovou charakteristikou drsnosti určenou vzdáleností mezi nejvyšší výškou profilu a hloubkou nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky. Parametr R_t je součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky [3].

Vlastní měření probíhalo na třech různých místech vzorku, čímž bylo dosaženo směrodatnosti výsledků. Zjištěné hodnoty byly statisticky zpracovány (drsnost R_a , R_z , R_t), vneseny do tabulky a do grafu (pouze závislost drsnosti R_a na médiu).

Nosný podíl profilu zkušebních vzorků byl vyhodnocen programem Surfpak a je graficky vyjádřen Abbottovou křivkou. Na vodorovnou osu této křivky se obvykle zaznamenává parametr R_{mr} , který je definován poměrem nosné délky profilu a skutečné délky, a na svislou osu hloubková souřadnice bodů v povrchové vrstvě. Poloha křivky a její průběh jsou hlavními hodnotícími parametry. Křivka položená výše s nižším sklonem reprezentuje profil s větším podílem kovového materiálu těsně pod povrchem a naopak [3], [8]. Příklady Abbottových křivek uvádí obrázek 16 a 17.



Obr. 16. Abbottova křivka kvalitnějšího povrchu



Obr. 17. Abbottova křivka méně kvalitního povrchu

Nosný podíl profilu lze také vyjádřit číselně pomocí parametru c_{tp50} , jenž značí hloubku, ve které je podíl materiálu a vzduchu 1:1 (50% kovového materiálu a 50 %

vzduchu). Čím je hodnota c_{tp50} menší, tím je povrch kvalitnější. Tento parametr byl zapsán do tabulky a znázorněn do grafu (závislost parametru c_{tp50} na procesním médiu).

U Experimentu 3 bylo provedeno podrobné statické vyhodnocení tohoto parametru. U ostatních experimentů byl opticky vybrán charakteristický průběh Abbottovy křivky, z něž byl následně parametr c_{tp50} určen.

1.1.1 Měření zbytkových napětí

Posledním vyhodnocovaným parametrem byla zbytková napětí v povrchové vrstvě obrobených vzorků.

Zbytková napětí jsou mechanická napětí existující v tělese bez působení vnějších sil a momentů. Jsou vždy důsledkem nehomogenních elastických nebo elasticko-plastických deformací [10]. Při číselném vyjádření hodnoty této fyzikální veličiny platí zásada, že hodnota tahového napětí je prezentována kladným číslem a hodnota tlakového napětí číslem záporným [18].

Z důvodu náročnosti měření bylo pro měření zbytkových povrchových napětí vybráno pouze 6 vzorků frézovaných s posuvem 1,5 mm/ot. a s hloubkou záběru 1 mm (Experiment 3).

Vlastní měření bylo prováděno za použití θ - θ goniometru X'Pert PRO MPD firmy PANalytical se zářením rentgenky s chromovou anodou. Byla analyzována difrakční linie $\{211\}$ α -Fe. Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací stanovených z experimentálních závislostí $2\theta(\sin^2\psi)$, za předpokladu dvojsového stavu zbytkové napjatosti (θ je difrakční úhel, ψ – úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími mřížkovými rovinami). Závislosti $2\theta^{211}(\sin^2\psi)$ byly měřeny ve dvou azimutech σ_L a σ_T . Difrakční úhel $2\theta^{211}$ byl stanoven jako těžiště difraktovaného dubletu $CrK\alpha$ na mřížkových rovinách $\{211\}$ α -Fe. Při výpočtu napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty $\frac{1}{2}s_2 = 5,76 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$, $s_1 = 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ [12]. Experimentální chyba uvedená u jednotlivých naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou dle algoritmu výpočtu zbytkových napětí metodou “ $\sin^2\psi$ ”.

Veličina $\bar{W}$ je průměrnou integrální šířkou difrakční linie $\{211\}$ α -Fe z měření σ_L , σ_T při $\psi = 0^\circ$ a reprezentuje míru plastické deformace povrchové vrstvy analyzovaných vzorků. Experimentální chyba jejího stanovení nepřevyšuje $0,05^\circ 2\theta$ [12].

Z výsledků byla vypočtena průměrná hodnota zbytkového napětí. K vyloučení výrazně odlišné hodnoty byla použita metoda nejmenších čtverců. Výsledné hodnoty byly zapsány do tabulky a zaznamenány do grafů (závislost σ_L a σ_T na procesním médiu).

6 Vyhodnocení experimentu

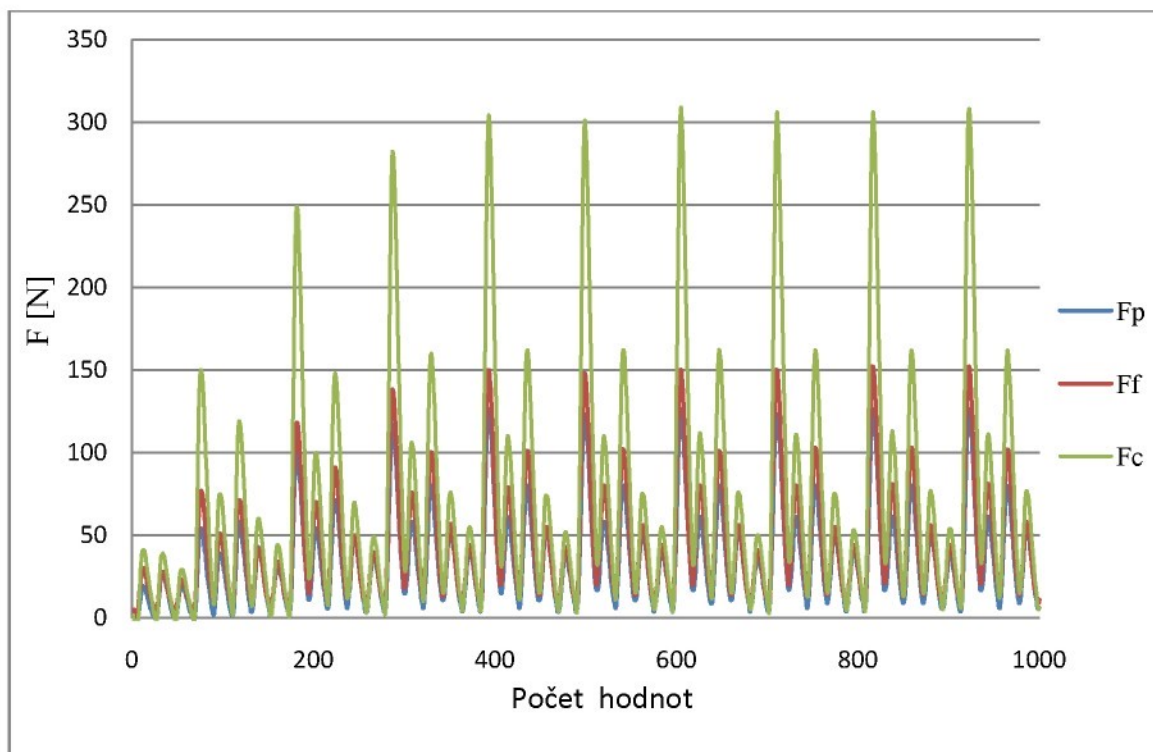
Vliv obráběcího prostředí na proces čelního frézování byl zkoumán při použití následujících procesních médií: kapalina Microcool 387+ (značena Mic), kapalina Paramo SK 300 (značena Par), kapalina Accu-Lube LB 2000 (značena MQL), kapalina Solgreen 540 (značena Sol), podchlazený vzduch o teplotě 4°C (značen PV) a okolní vzduch (značen OV).

Účinek procesního média na čelní frézování byl hodnocen podle:

- velikosti řezných sil,
- dosažené drsnosti povrchu,
- nosného podílu profilu obrobených povrchů,
- velikosti zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobených vzorků.

7.1 Posouzení velikosti středních hodnot řezných sil

U experimentu byl zkoumán vliv média na velikost řezné síly F_c , posuvové síly F_f a přísmuvové síly F_p . Hodnoty těchto sil byly naměřeny dynamometrem a vyhodnoceny programem LabVIEW 6.1, jehož výstupy mají grafickou (viz graf 2.) a tabulkovou podobu.



Graf 2. Ukázka záznamu naměřených řezných sil

Z grafu je možné vyčíst, jak se jednotlivé břity postupně dostávají do záběru a vycházejí z něj. Jeden z pěti břitů je vždy namáhán více než ostatní. Tyto rozdíly

v namáhání jsou především způsobeny nepřesnostmi nástroje, což dokazuje tabulka 8.

Břit	Čelní házení nástroje [μm]	Obvodové házení nástroje [μm]
1	0	0
2	40	0
3	15	0
4	5	10
5	30	0

Tab. 8. Velikost obvodového a čelního házení frézy

7.1.1 Experiment 1

Celkové pořadí procesních médií, které byly seřazeny vzestupně dle velikosti středních hodnot sil (dále jen síla) F_c , je uvedeno v grafu 3. Číselné velikosti sil jsou zaznamenány v tabulce 9. Hodnoty přísluvových a posuvových sil jsou vyneseny v grafu 4.

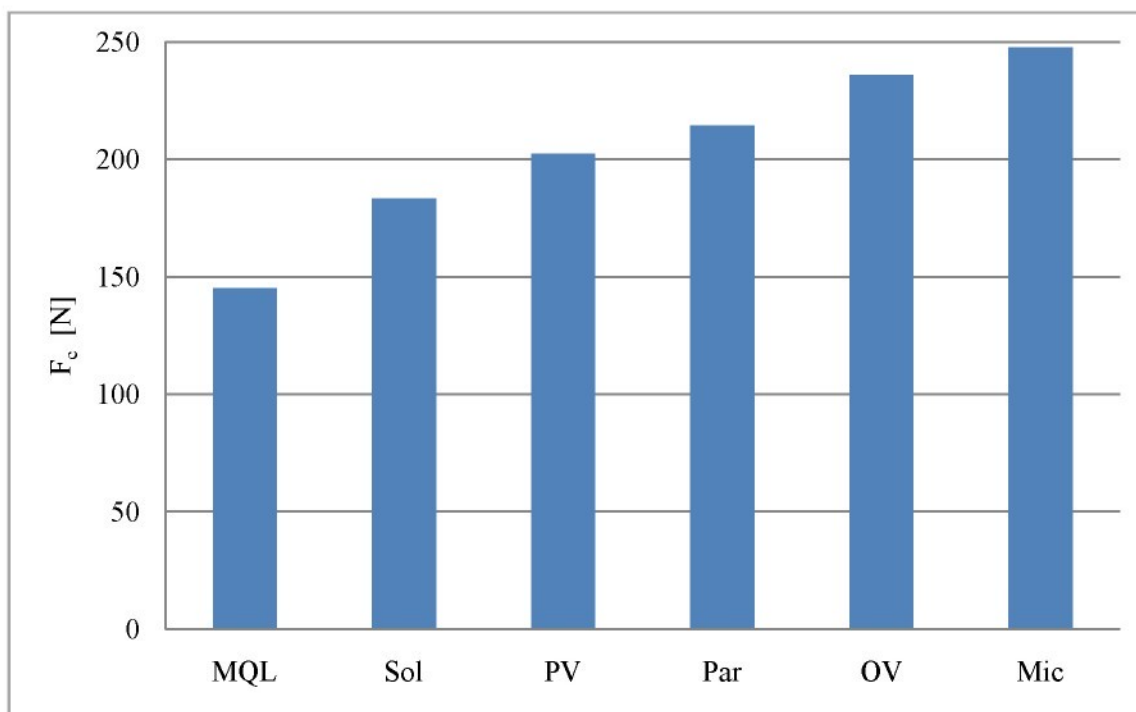
Při frézování posuvem 0,6 mm/ot. a hloubce záběru 1 mm bylo dosaženo nejnižších řezných sil použitím metody MQL s procesní kapalinou Accu-Lube. Naopak procesní kapalina Microcool 387+ vykazovala při obrábění síly F_c nejvyšší. Rozdíl mezi maximální a minimální naměřenou hodnotou řezných sil činil 41,1% z nejvyšší hodnoty. Podchlazením vzduchu na teplotu 4°C bylo docíleno o 14,2 % nižších sil F_c než při obrábění bez chlazení.

Procesní médium	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]
Accu-Lube	145,1	85,4	72,7
Solgreen 540	183,3	132,1	198,5
Podchlazený vzduch o teplotě 4°C	202,3	156,4	208,5
Paramo SK 300	214,4	199,5	253,3
Okolní vzduch	235,9	216,3	302,1
Microcool 387+	247,5	230,3	301,3

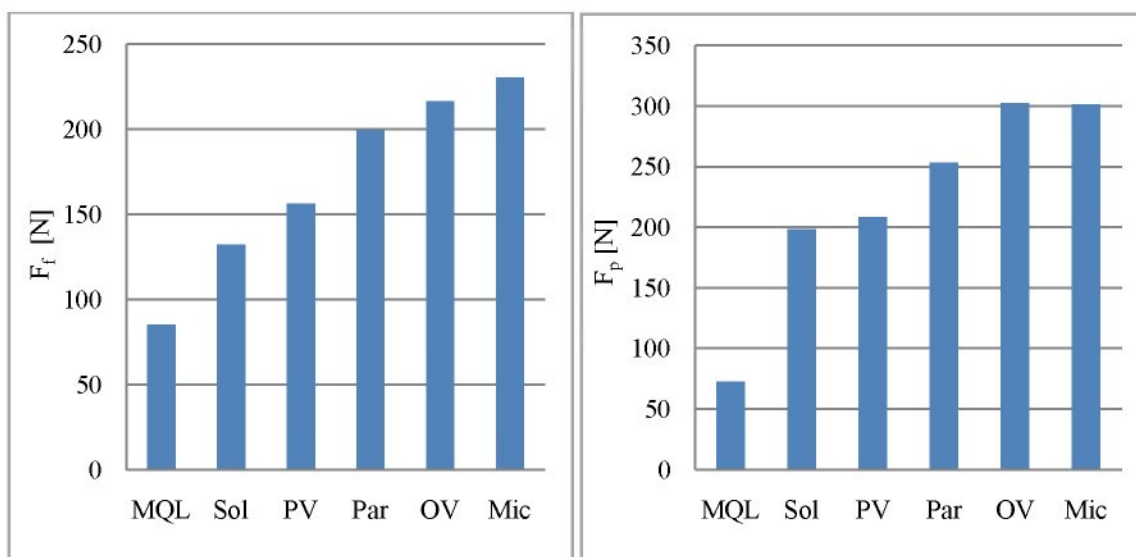
Tab. 9. Experiment 1 – střední hodnoty naměřených sil

U procesního média Accu Lube byly naměřeny také nejnižší posuvové a přísluvové síly. Procesní médium Microcool 387+ vykazovalo nejvyšší posuvové síly. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou sil F_f činil 62,9 % z nejvyšší hodnoty.

Nejvyšší přísluvové síly byly naopak naměřeny při obrábění bez chlazení. U metody MQL byly hodnoty přísluvových sil o 75,9 % nižší.



Graf 3. Experiment 1 – střední hodnoty sil F_c



Graf 4. Experiment 1 – střední hodnoty sil F_p a F_f

7.1.2 Experiment 2

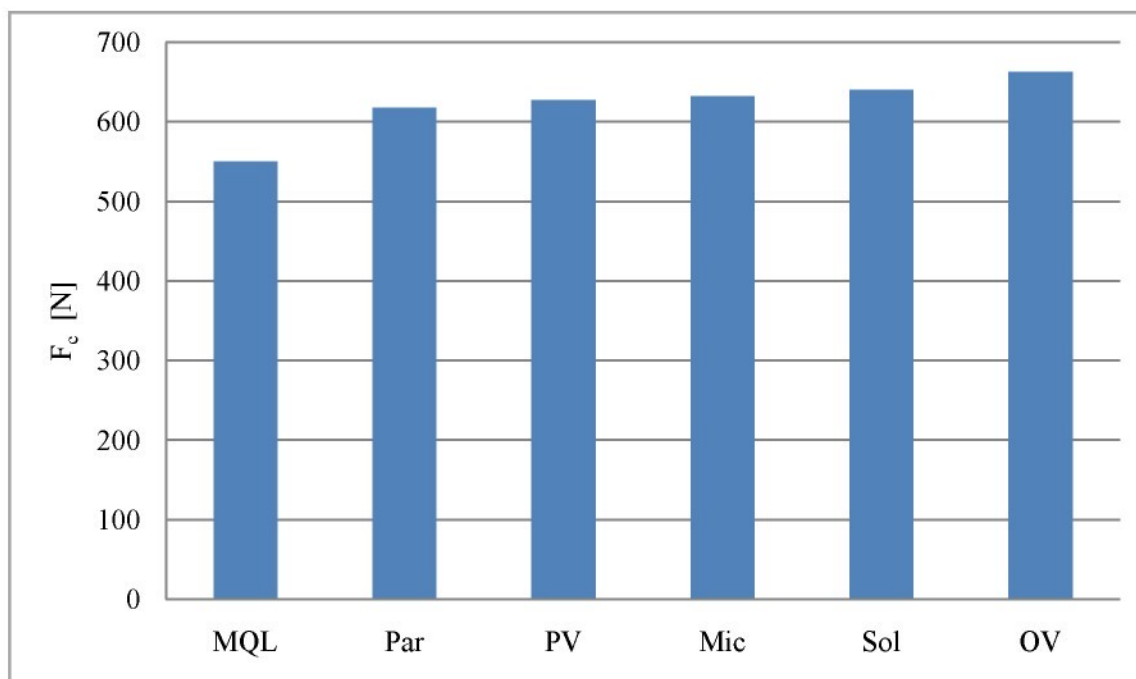
Výsledky naměřených středních hodnot sil (dále jen síla) F_c , F_p a F_f jsou zapsány v tabulce 10. Seřadíme-li jednotlivá procesní média vzestupně podle hodnoty řezné síly, získáme pořadí uvedené v grafu 5. Hodnoty přísluvových a posuvových sil jsou zaneseny do grafu 6.

Měřením bylo zjištěno, že procesní médium Microcool 387+ dosahuje nejvyšších hodnot řezných sil při frézování posuvem 0,6 mm/ot. a hloubce záběru 3,5 mm. Použití metody MQL mělo za daných podmínek vliv na velikost sil F_c nejlepší. Hodnoty řezných sil byly o 17 % nižší než u Microcoolu. Podchlazený vzduch o teplotě 4°C vykazoval o 5,3 % nižší síly F_c než okolní vzduch.

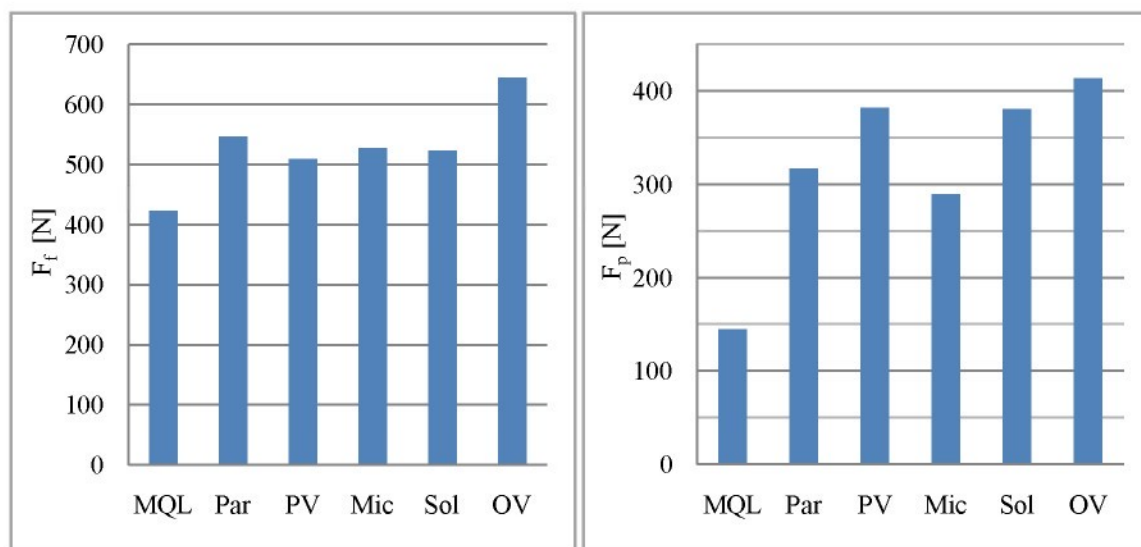
Procesní médium	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]
Accu-Lube	549,8	422,8	144,4
Paramo SK 300	617,5	546,8	316,8
Podchlazený vzduch o teplotě 4°C	627,4	508,6	381,8
Microcool 387+	632,4	527,6	289,2
Solgreen 540	640,4	522,6	380,4
Okolní vzduch	662,6	643,8	413,3

Tab. 10. Experiment 2 – střední hodnoty naměřených sil

Nejnižších posuvových a příusuvových sil bylo docíleno použitím procesního média Accu-Lube. Nejvyšší posuvové a příusuvové síly byly naopak zaznamenány při frézování bez chlazení. Mezi maximální a minimální hodnotou sil F_f byl naměřen rozdíl 34,3 % z nejvyšší hodnoty. Rozdíl ve velikosti příusuvových sil u metody MQL a u obrábění bez chlazení činil 65,1 % z vyšší hodnoty.



Graf 5. Experiment 2 – střední hodnoty sil F_c

Graf 6. Experiment 2 – střední hodnoty sil F_p a F_f

7.1.3 Experiment 3

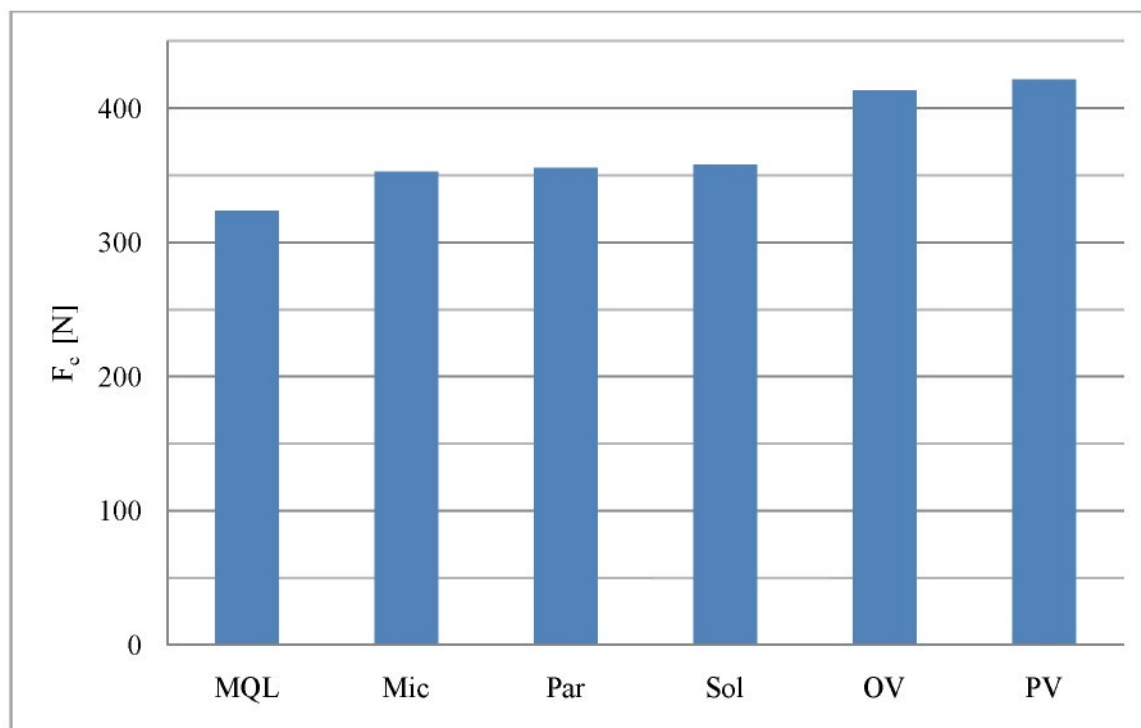
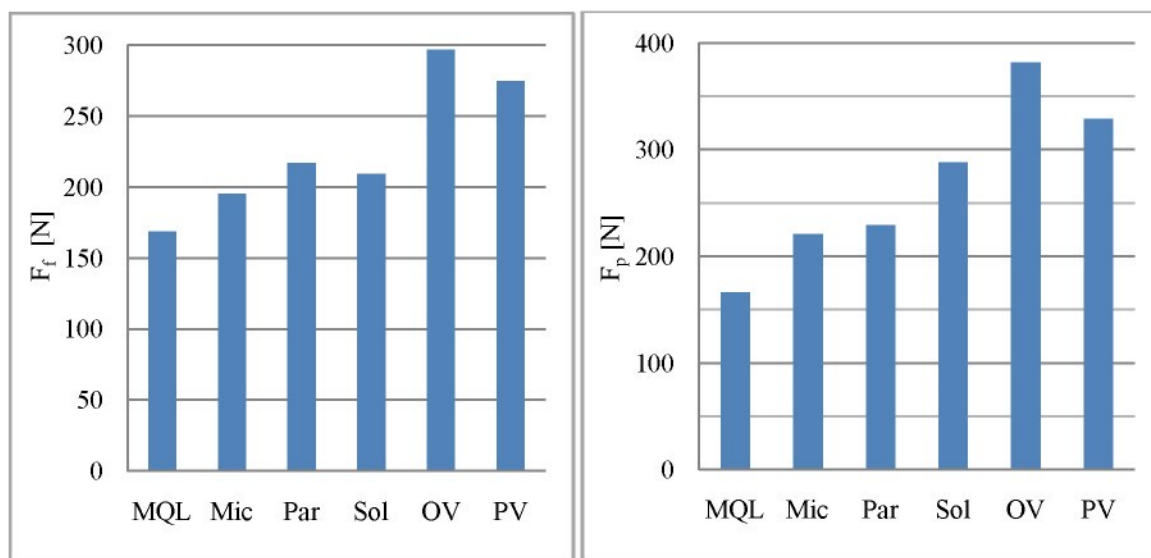
Procesní média jsou vzestupně seřazena dle velikosti středních hodnot sil (dále jen síla) F_c v grafu 7. Tabulka 11 pak uvádí číselné velikosti řezných sil. V grafu 8 jsou zaznamenány hodnoty posuvových a přísuvových sil.

Při obrábění posuvem 1,5 mm/ot. a hloubce záběru 1 mm bylo zjištěno, že nástroj je nejméně namáhán silami F_c , F_p a F_f při použití procesní kapaliny Accu-Lube. Nejvyšší hodnoty sil F_c byly naopak naměřeny při frézování v podchlazeném vzduchu, při obrábění bez chlazení byly tyto síly o 1,9 % nižší. Rozdíl mezi maximální a minimální naměřenou hodnotou řezných sil činil 23,3% z nejvyšší hodnoty.

Procesní médium	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]
Accu-Lube	323,3	168,5	166,1
Microcool 387+	352,5	195,4	220,5
Paramo SK 300	355,2	216,7	229,1
Solgreen 540	357,9	209,0	288,1
Okolní vzduch	413,2	296,9	381,4
Podchlazený vzduch o teplotě 4°C	421,3	274,8	328,7

Tab. 11. Experiment 3 - střední hodnoty naměřených sil

Nejvyšší posuvové a přísuvové síly byly naměřeny při frézování bez chlazení. Hodnoty přísuvových sil procesního média Accu-Lube byly o 56,4 % nižší, posuvové síly byly o 43,2% menší.

Graf 7. Experiment 3 - střední hodnoty sil F_c Graf 8. Experiment 3 – střední hodnoty sil F_p a F_f

7.1.4 Experiment 4

Procesní média byla seřazena vzestupně dle velikosti střední hodnoty sil (dále jen síla) F_c v grafu 9. Číselné velikosti řezných sil jsou uvedeny v tabulce 12. Hodnoty přírůbových a posuvových sil jsou zakresleny do grafu 10.

Měřením bylo zjištěno, že procesní médium Accu-Lube dosahuje při frézování posuvem 1,5 mm/ot. a hloubce záběru 2 mm nejnižších hodnot řezných sil. Nástroj byl naopak podroben největšímu namáhání silami F_c při obrábění s procesní kapalinou

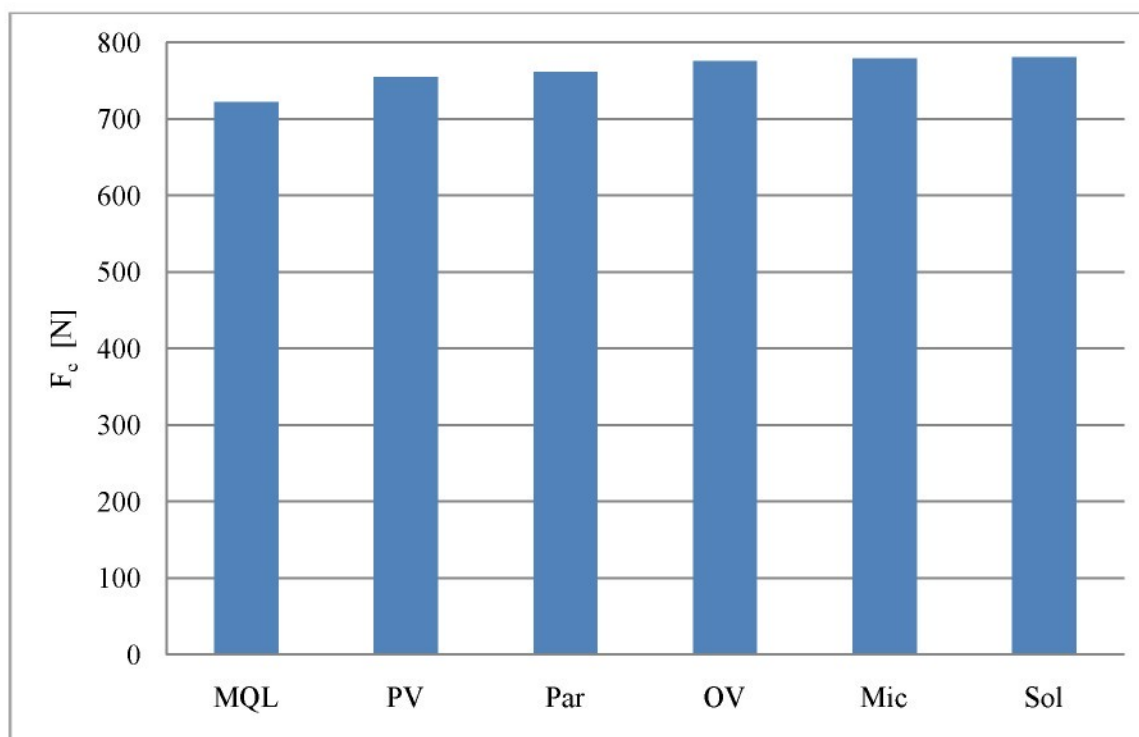
Solgreen 540. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou řezných sil činí 7,5% z vyšší hodnoty.

Podchlazením vzduchu na teplotu 4°C bylo docíleno o 2,6 % nižších sil F_c než při obrábění bez chlazení.

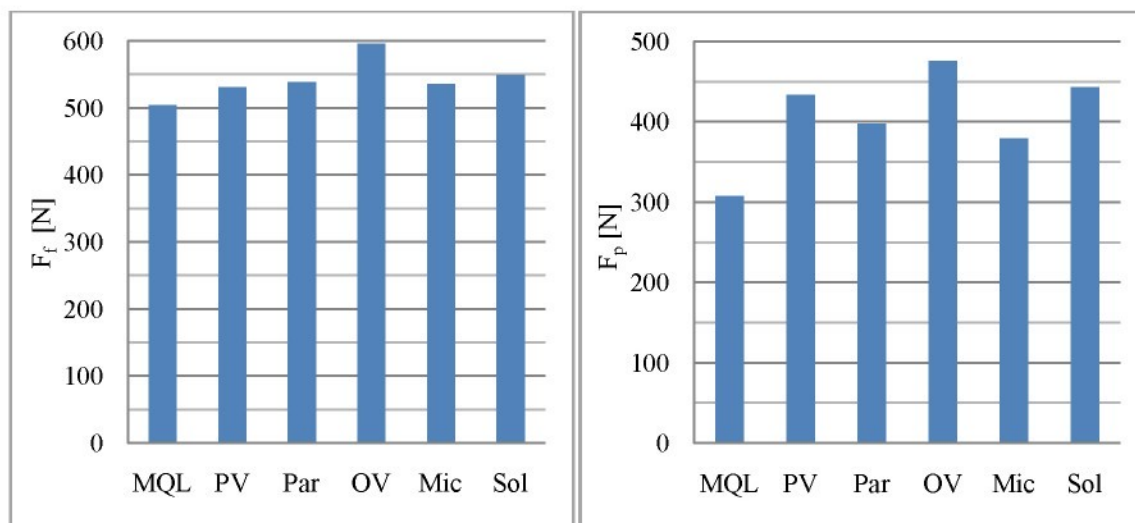
Procesní médium	F_c [N]	F_f [N]	F_p [N]
Accu-Lube	722,4	503,5	307,2
Podchlazený vzduch o teplotě 4°C	755,0	530,6	433,4
Paramo SK 300	761,4	538,2	397,2
Okolní vzduch	775,1	595,2	475,5
Microcool 387+	778,5	535,6	379,2
Solgreen 540	780,9	548,5	443,1

Tab. 12. Experiment 4 – střední hodnoty naměřených sil

Použití metody MQL vykazovalo nejnižší hodnoty posuvových a přísuových sil. Při obrábění bez chlazení byly síly F_f a F_p nejvyšší. Procesní médium Accu-Lube dosahovalo při frézování o 15,4% nižších hodnot posuvových sil a o 35,4 % menších hodnot přísuových sil.



Graf 9. Experiment 4 – střední hodnoty sil F_c

Graf 10. Experiment 4 – střední hodnoty sil F_p a F_f

6.2 Porovnání procesních médií z hlediska dosažené drsnosti

Procesní média byla dále hodnocena podle svého vlivu na výslednou drsnost povrchu obrobeného vzorku. Na každém obrobeném vzorku byla provedena tři měření. Výsledná data byla statisticky zpracována. Hodnoceny byly tyto parametry R_a , R_z a R_t .

6.2.1 Experiment 1

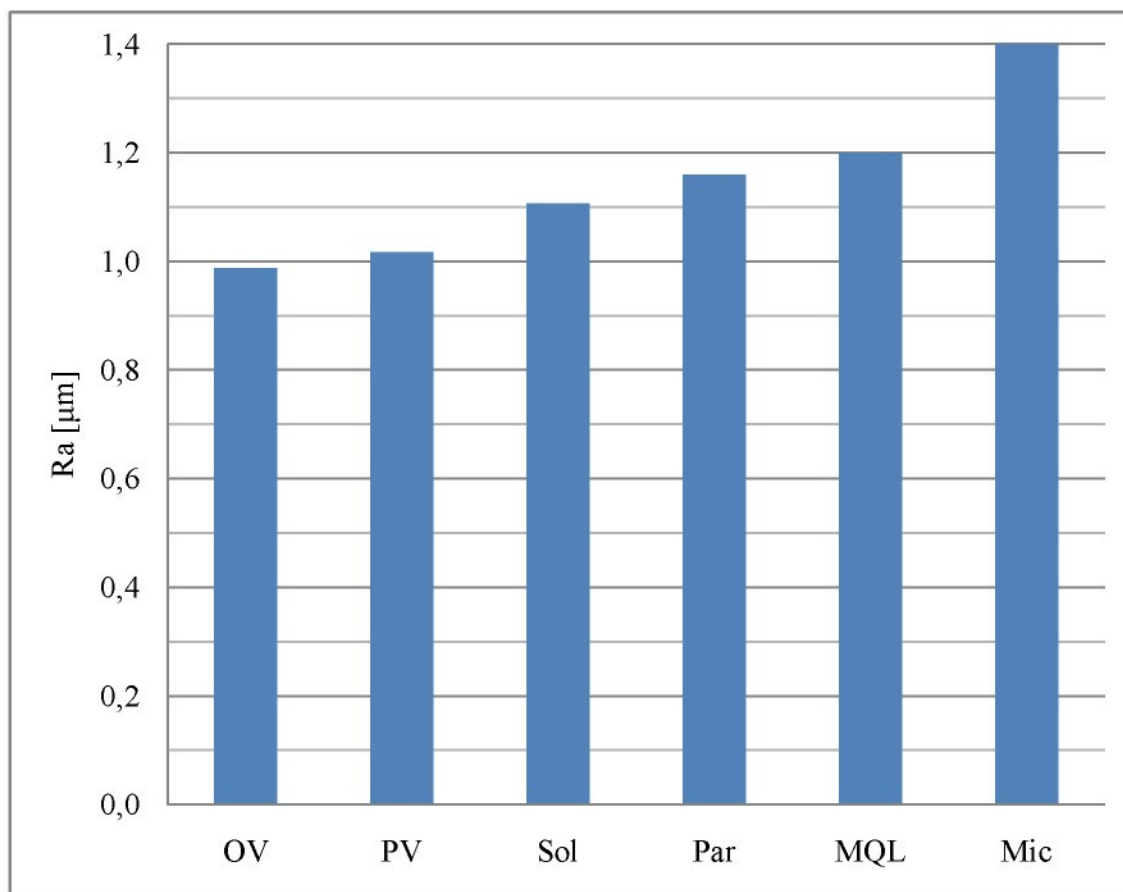
Číselné hodnoty naměřených parametrů R_a , R_t a R_z uvádí tabulka 13. Celkové pořadí procesních médií seřazených vzestupně dle velikosti drsnosti R_a je zakresleno do grafu 11.

Při frézování za sucha posuvem 0,6 mm/ot. a hloubce záběru 3,5 mm bylo dosaženo nejnižší drsnosti povrchu. Naopak aplikace procesní kapaliny Microcool 387+ měla za daných podmínek nejhorší vliv na velikost drsnosti R_a . Při obrábění bez chlazení byla výsledná drsnost o 29,6 % nižší než u kapaliny Microcool.

Procesní médium	R_a [μm]	R_t [μm]	R_z [μm]
Okolní vzduch	0,99 $\pm$ 0,13	8,62 $\pm$ 1,51	6,57 $\pm$ 1,19
Podchlazený vzduch na teplotu 4°C	1,02 $\pm$ 0,19	10,81 $\pm$ 1,68	7,42 $\pm$ 0,79
Solgreen 540	1,11 $\pm$ 0,08	9,97 $\pm$ 0,64	7,35 $\pm$ 0,44
Paramo SK 300	1,16 $\pm$ 0,10	9,68 $\pm$ 1,08	6,82 $\pm$ 0,79
Accu-Lube	1,20 $\pm$ 0,09	8,22 $\pm$ 0,61	6,70 $\pm$ 0,45
Microcool 387+	1,40 $\pm$ 0,05	10,53 $\pm$ 1,22	7,66 $\pm$ 0,35

Tab. 13. Experiment 1 – střední hodnoty drsnosti povrchu

Vyhodnocením experimentu bylo zjištěno, že za těchto podmínek dosáhneme nejvyšší jakosti povrchu obrobku frézováním v plynném řezném prostředí. Nejnižší hodnota R_a byla dosažena při obrábění bez chlazení. U podchlazeného vzduchu byla drsnost R_a o 3 % vyšší. Při použití procesního média Accu-Lube byla výsledná drsnost obrobeného vzorku o 21,6 % vyšší než při aplikaci vzduchu z okolí.



Graf 11. Experiment 1 – střední hodnota drsnosti R_a

6.2.2 Experiment 2

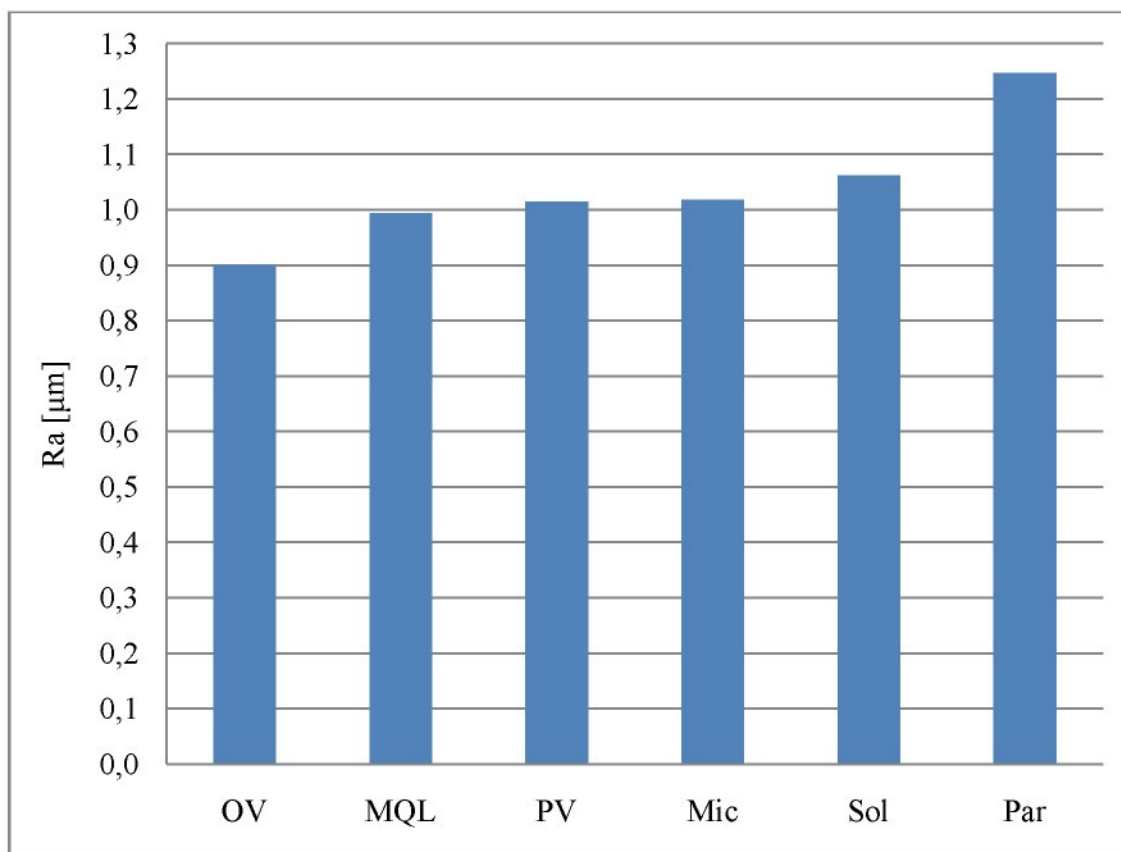
Výsledné číselné hodnoty naměřených parametrů drsnosti R_a , R_t a R_z uvádí tabulka 14. V grafu 12 jsou pak vzestupně seřazeny procesní média dle velikosti drsnosti R_a .

Při posuvu 0,6 mm/ot. o hloubce záběru 3,5 mm dosahovaly nejlepší jakosti povrchu vzorky, které byly frézovány bez chlazení. Naopak největší drsnost R_a byla dosažena při obrábění s procesní kapalinou Paramo. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou drsnosti činil 27,8 %.

Při obráběním s procesní kapalinou Accu-Lube bylo dosaženo o 10 % vyšší drsnosti R_a než při obrábění bez chlazení. Vzorky frézované v podchlazeném vzduchu měly drsnost o 12,2 % vyšší.

Procesní médium	Ra [μm]	Rt [μm]	Rz [μm]
Okolní vzduch	0,90 $\pm$ 0,15	9,37 $\pm$ 1,63	6,12 $\pm$ 0,81
Accu-Lube	0,99 $\pm$ 0,11	8,58 $\pm$ 2,03	5,64 $\pm$ 0,72
Podchlazený vzduch na teplotu 4°C	1,01 $\pm$ 0,11	11,83 $\pm$ 2,52	7,57 $\pm$ 1,17
Microcool 387+	1,02 $\pm$ 0,11	8,19 $\pm$ 0,35	6,16 $\pm$ 0,16
Solgreen 540	1,06 $\pm$ 0,16	7,41 $\pm$ 1,20	5,70 $\pm$ 1,00
Paramo SK 300	1,25 $\pm$ 0,16	8,66 $\pm$ 1,05	6,79 $\pm$ 0,82

Tab. 14. Experiment 2 - střední hodnoty drsnosti povrchu



Graf 12. Experiment 2 - střední hodnota drsnosti Ra

6.2.3 Experiment 3

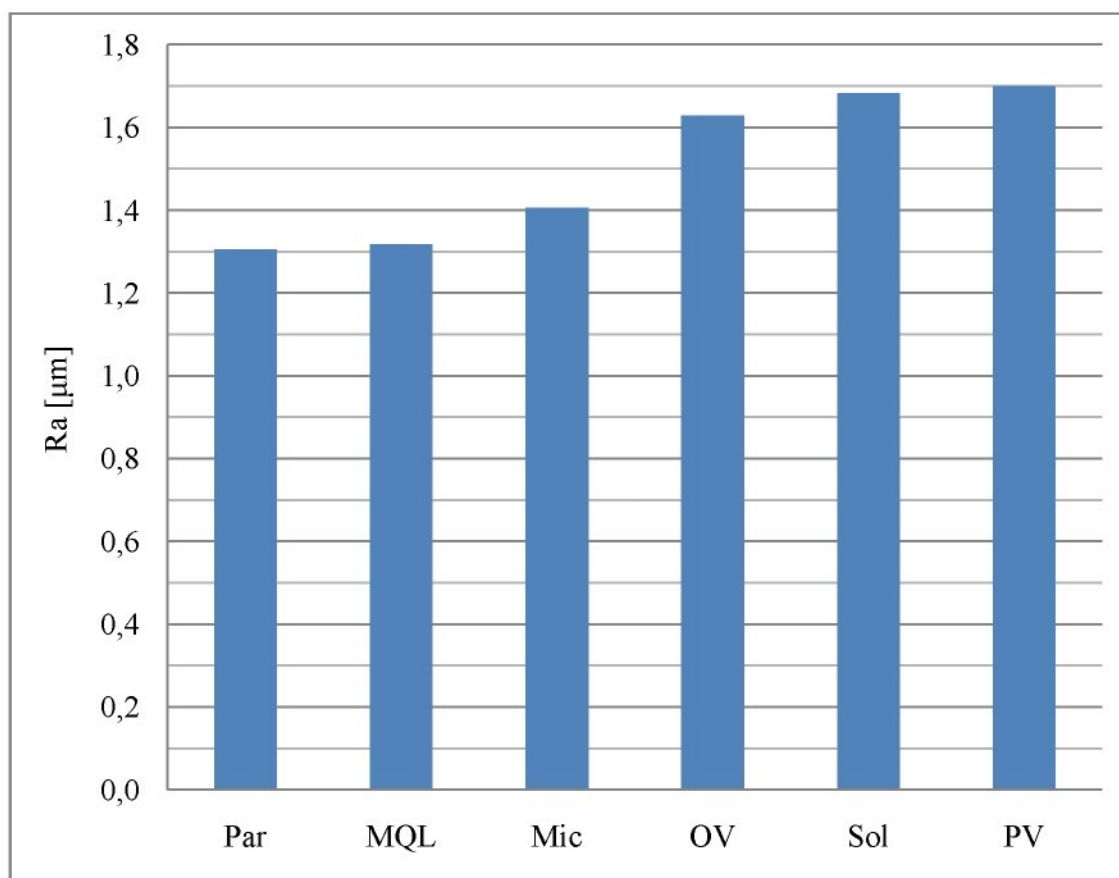
Číselné hodnoty naměřených parametrů drsnosti Ra, Rt a Rz jsou zaznamenány v tabulce 15. Procesní média jsou pak vzestupně seřazena podle velikosti parametru Ra, který byl dosažen při frézování, v grafu 13.

Při frézování posuvem 1,5 mm/ot. a hloubce záběru 1 mm bylo dosaženo nejnižší drsnosti povrchu vzorku použitím Parama jako procesního média. Nejvyšší drsnost Ra byla naopak naměřena při obrábění na vzduchu, který byl podchlazen na teplotu 4°C. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou drsnosti činil 23,2 %.

Procesní médium	Ra [μm]	Rt [μm]	Rz [μm]
Paramo SK 300	1,31 $\pm$ 0,15	12,58 $\pm$ 0,88	8,38 $\pm$ 0,88
Accu-Lube	1,32 $\pm$ 0,17	13,03 $\pm$ 1,97	8,71 $\pm$ 1,33
Microcool 387+	1,41 $\pm$ 0,18	13,62 $\pm$ 2,06	9,01 $\pm$ 0,81
Okolní vzduch	1,63 $\pm$ 0,34	16,26 $\pm$ 1,49	10,64 $\pm$ 1,56
Solgreen 540	1,68 $\pm$ 0,20	17,22 $\pm$ 1,55	11,43 $\pm$ 1,22
Podchlazený vzduch na teplotu 4°C	1,70 $\pm$ 0,40	16,06 $\pm$ 3,15	11,19 $\pm$ 2,33

Tab. 15. Experiment 3 - střední hodnoty drsnosti povrchu

U metody MQL, kde je procesním médiem kapalina Accu-Lube, byla drsnost obrobených vzorků o 0,8 % vyšší než u obrobků kapaliny Paramo, což je jen nepatrný rozdíl.



Graf 13. Experiment 3 – střední hodnota drsnosti Ra

U plynných řezných prostředí bylo dosaženo nejlepších výsledků při obrábění bez chlazení. Vzorky frézované v podchlazeném vzduchu měly drsnost ještě o 4,3 % vyšší.

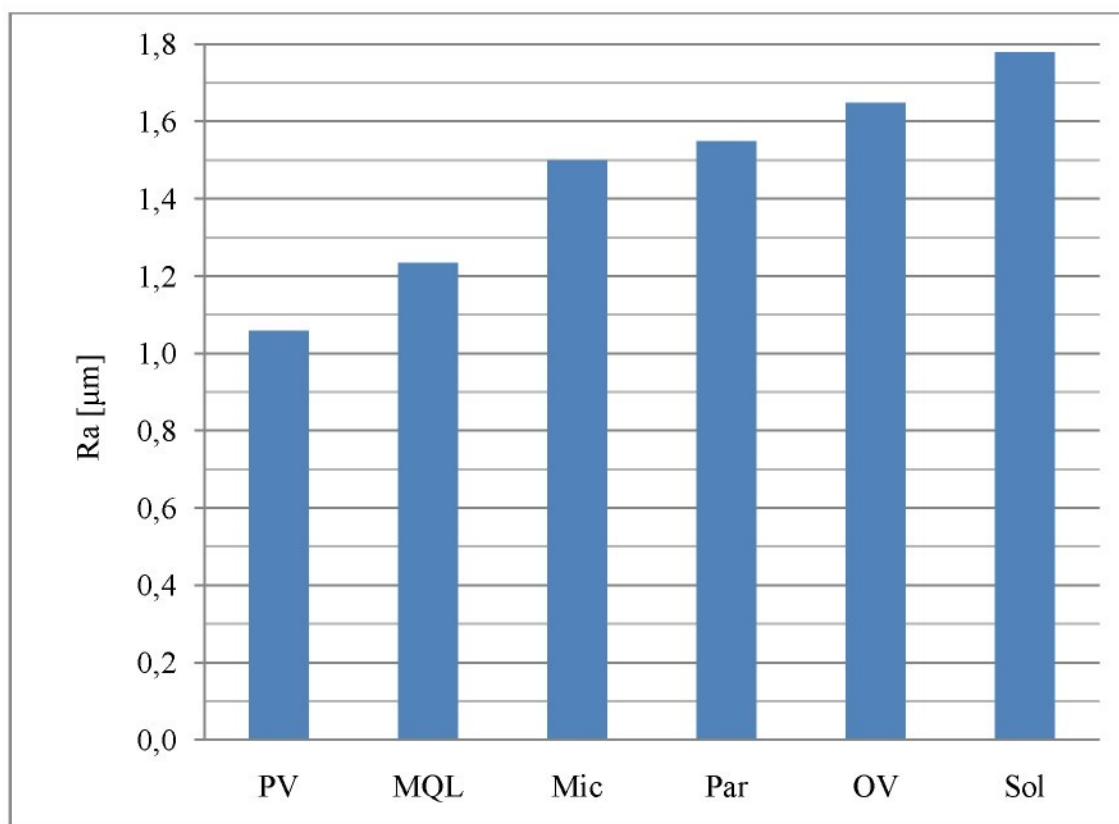
6.2.4 Experiment 4

Číselné velikosti jednotlivých parametrů Ra, Rt a Rz jsou uvedeny v tabulce 16. Parametr Ra je pak vzestupně vnesen v grafu 14.

Při frézování s posuvem 1,5 mm/ot. a s hloubkou záběru 2 mm bylo dosaženo nejnižší drsnosti povrchu zkušební vzorku při aplikaci podchlazeného vzduchu jako procesního média. Nejvyšší drsnost obrobeného povrchu byla naměřena u procesní kapaliny Solgreen. Vzorky frézované v podchlazeném vzduchu měly drsnost o 40,5 % nižší.

Procesní médium	Ra [μm]	Rt [μm]	Rz [μm]
Podchlazený vzduch na teplotu 4°C	1,06 $\pm$ 0,17	10,54 $\pm$ 2,01	7,10 $\pm$ 1,03
Accu-Lube	1,23 $\pm$ 0,18	13,69 $\pm$ 2,03	8,08 $\pm$ 1,15
Microcool 387+	1,50 $\pm$ 0,21	13,83 $\pm$ 1,65	9,44 $\pm$ 1,34
Paramo SK 300	1,55 $\pm$ 0,23	16,08 $\pm$ 1,90	10,36 $\pm$ 1,80
Okolní vzduch	1,65 $\pm$ 0,26	16,51 $\pm$ 3,30	11,11 $\pm$ 1,69
Solgreen 540	1,78 $\pm$ 0,27	18,39 $\pm$ 2,64	11,18 $\pm$ 1,63

Tab. 16. Experiment 4 - střední hodnoty drsnosti povrchu



Graf 14. Experiment 4 – střední hodnota drsnosti Ra

Měřením bylo zjištěno, že za těchto podmínek dosáhneme nejlepšího povrchu obrobku frézováním v podchlazeném plynném prostředí. Procesní médium Accu-Lube vykazovalo výslednou drsnost obrobeného vzorku o 16 % vyšší a vzorky frézované bez chlazení měly drsnost horší o 55,7 %.

6.3 Porovnání procesních médií z hlediska nosného podílu profilu

Vliv procesního média na proces čelního frézování byl dále posuzován podle účinku, který mají jednotlivá média na velikost nosného podílu profilu obrobeného vzorku. Ten byl diagnostikován profiloměrem MITUTOYO, jehož součástí je i program Surfpak.

Výsledkem měření nosného podílu materiálu je Abbottova křivka. Ta je vyjádřena buď graficky, jako poměr materiálu a vzduchu v oblasti nerovností na povrchu měřeného vzorku, nebo číselně pomocí parametru c_{tp50} .

Charakteristické grafy Abbottovy křivky, které byly pro každé médium vybrány ze všech měření, jsou uvedeny v příloze 1.

Frézování posuvem 1,5 mm/ot. s hloubkou záběru 1 mm

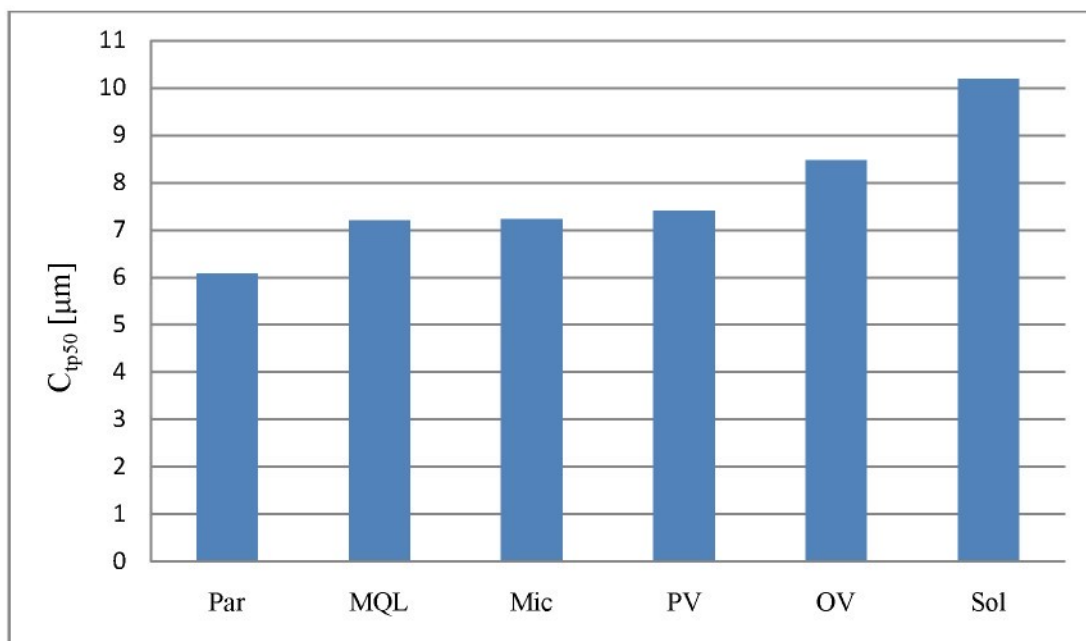
Tato kapitola je specializována na vyhodnocení parametru c_{tp50} pro čelní frézování s posuvem 1,5 mm/ot. s hloubkou záběru 1 mm. Další vyhodnocení pro frézování posuvem 1,5 mm/ot. s hloubkou záběru 2 mm a frézování posuvem 0,6 mm/ot. s hloubkami záběru 1 mm a 3,5 mm jsou uvedeny v příloze 2.

Nejkvalitnější povrch obrobeného vzorku byl dosažen při použití procesní kapaliny Paramo. Naopak nejvyšší parametr c_{tp50} , tedy nejnížší poměr kovového materiálu vůči vzduchu, byl naměřen při frézování v prostředí procesní kapaliny Solgreen. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou činil 40,3 %. Hodnoty parametru c_{tp50} jsou uvedeny v tabulce 17. V grafu 15 je pak zaznamenán parametr c_{tp50} dle velikosti.

Média	c_{tp50} [μm]
Solgreen 540	$10,19 \pm 1,29$
Okolní vzduch	$8,48 \pm 0,89$
Podchlazený vzduch na 4°C	$7,40 \pm 2,05$
Microcool 387+	$7,23 \pm 1,40$
Accu-Lube LB 2000	$7,21 \pm 1,14$
Paramo SK 300	$6,08 \pm 1,12$

Tab. 17. Experiment 3 – hodnoty parametru c_{tp50}

Měřením bylo zjištěno, že plynná média dosahují vysokých hodnot parametru c_{tp50} . Obráběním v podchlazeném vzduchu bylo docíleno o 12,7 % nižších hodnot c_{tp50} než při aplikaci vzduchu z okolí.

Graf 15. Parametr c_{p50} obrobků frézovaných v různých procesních médiích

6.4 Porovnání procesních médií z hlediska zbytkového napětí

Zbytkové napětí bylo změřeno na rentgenovém difraktometru X'Pert PRO MPD. Vlastní měření je značně časově náročné, proto bylo provedeno pouze na šesti vzorcích, které byly frézovány posuvem 1,5 mm/ot. a hloubkou záběru 1 mm (Experiment 3).

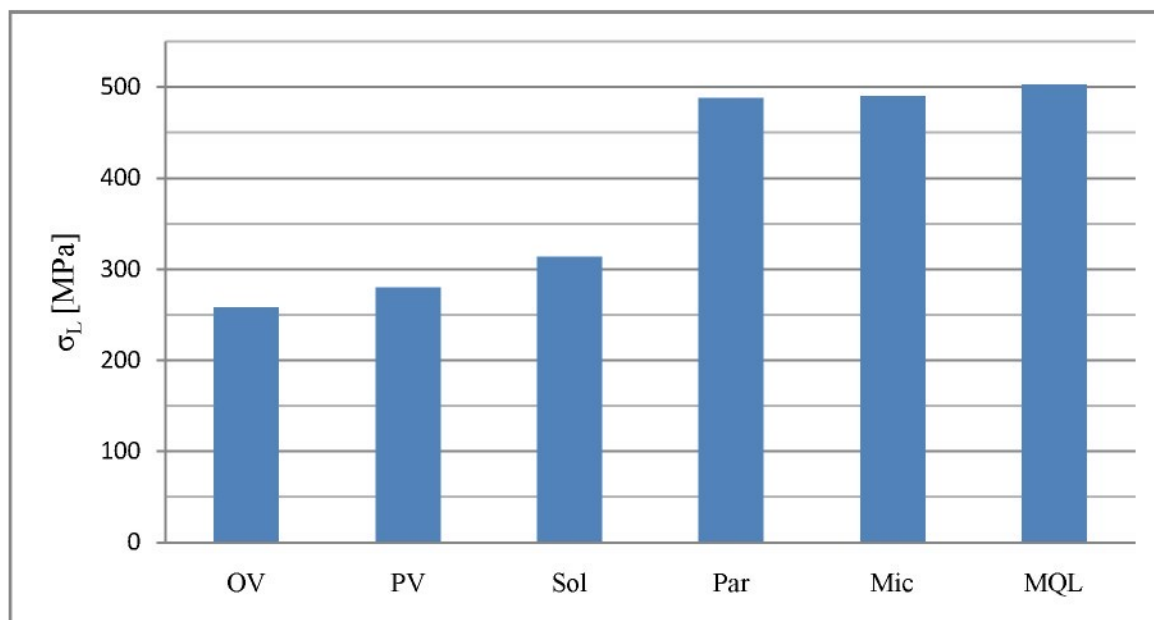
Hodnoty tahového napětí, které byly dosaženy frézováním v různých procesních médiích, ve směru posuvu (σ_L) a ve směru kolmém na směr posuvu (σ_T) jsou uvedeny v tabulce 18. Do grafu 16 jsou pak zaneseny hodnoty napětí σ_L a do grafu 17 hodnoty napětí σ_T .

Ve směru posuvu bylo naměřeno nejnižší tahové napětí při frézování bez chlazení. Nejvyšší tahové napětí bylo naopak dosaženo při použití metody MQL. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou napětí σ_L činil 48,7 %.

Médium	σ_L [MPa]	$\Delta\sigma_L$ [MPa]	σ_T [MPa]	$\Delta\sigma_T$ [MPa]	W [°]
Okolní vzduch	258	12	325	31	2,617
Podchlazený vzduch na 4 °C	280	18	401	25	2,708
Solgreen 540	314	12	303	50	2,696
Paramo SK 300	488	21	518	47	2,781
Microcool 387+	490	20	575	66	2,892
Accu-Lube LB 2000	503	12	551	64	2,818

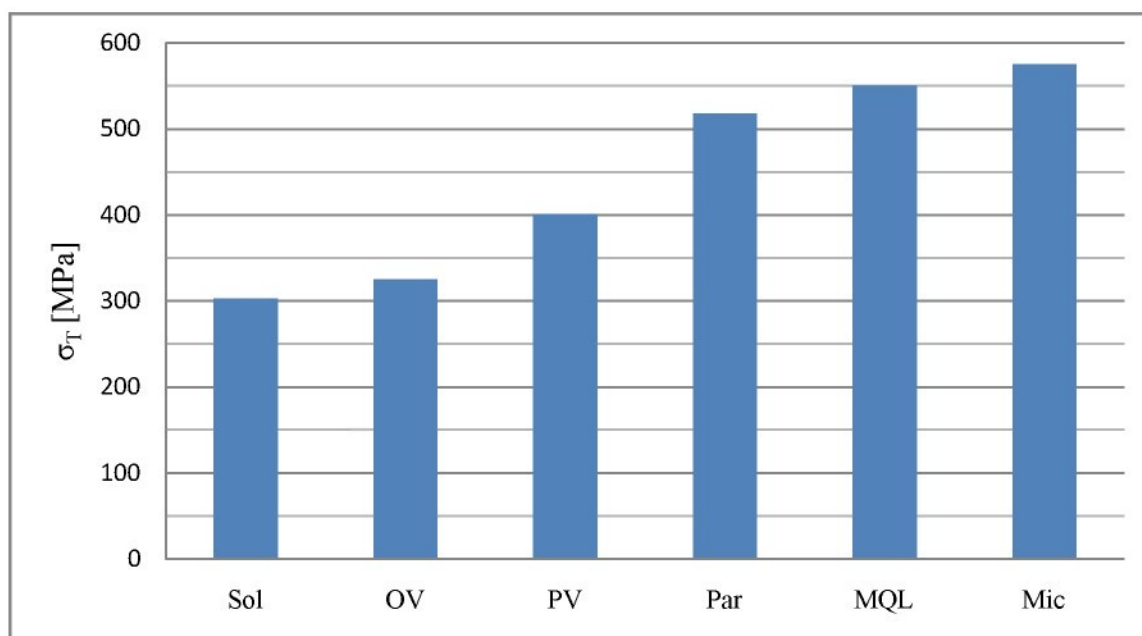
Tab. 18. Experiment 3 – hodnoty zbytkového napětí σ_L a σ_T

Při obrábění v podchlazeném vzduchu bylo dosaženo o 8,5 % vyššího napětí ve směru posuvu než u frézování bez chlazení.



Graf 16. Experiment 3 – zbytkové napětí ve směru posuvu

Nejnižší napětí ve směru kolmém na směr posuvu bylo naměřeno při frézování s procesní kapalinou Solgreen. Naopak nejvyšší hodnoty σ_t byly dosaženy při obrábění s procesní kapalinou Microcool. Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou zbytkového napětí činil 47,3 %.



Graf 17. Experiment 3 - zbytkové napětí ve směru kolmém na směr posuvu

Při obrábění bez chlazení byly naměřeny hodnoty napětí σ_t o 7,3 % vyšší než u Solgreenu a u mlhy o 81,8 % vyšší. Vzorky, které byly frézovány v pochlazeném vzduchu o teplotě 4 °C, vykazovaly zbytkové napětí σ_t o 32,3 % vyšší než u Solgreenu.

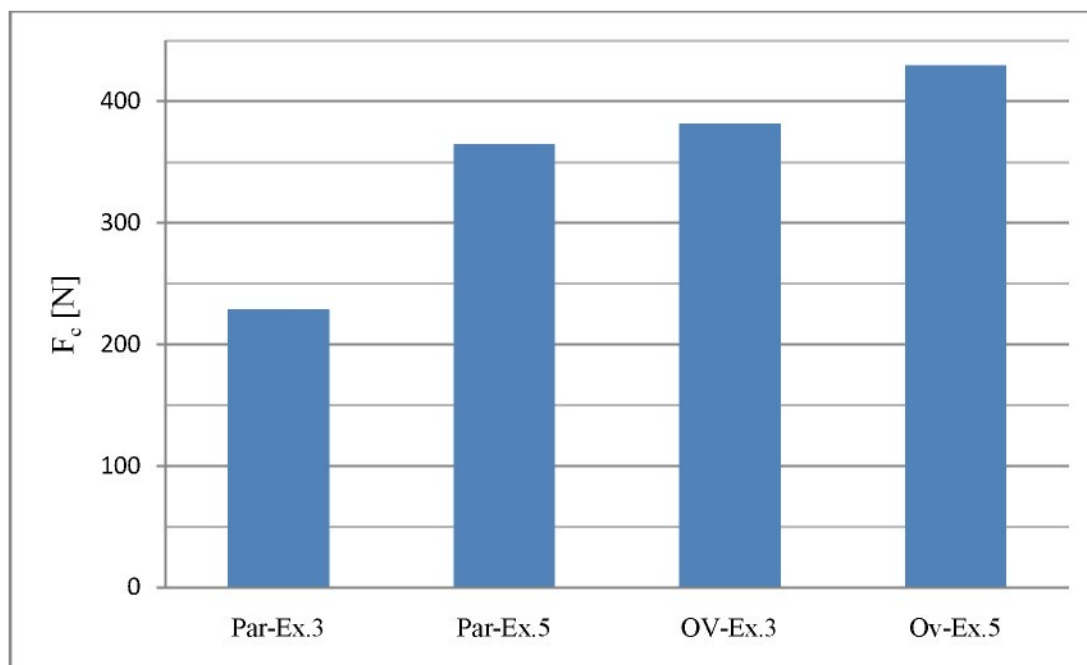
6.5 Opakované měření

Naměřené hodnoty zbytkového napětí v Experimentu 3 byly velmi překvapivé (velmi vysoké hodnoty tahového napětí, aplikace procesní kapaliny zvyšuje zbytkové napětí), proto jsme se rozhodli pro vybrané dva případy provést opakované měření (značeno Experiment 5). Měření proběhlo na čtyřech vzorcích. Všechny čtyři vzorky byly před vlastním měřením žihány na odstranění vnitřního pnutí (teplota 550°C, výdrž 2 hodiny, ochlazen v peci), čímž byla zajištěna eliminace napětí v materiálu. Dva byly frézovány s procesní kapalinou Paramo SK 300 (značeno Par-Ex.5) posuvem 1,5 mm/ot. a s hloubkou záběru 1 mm. Zbývající dva byly frézovány za stejných podmínek bez chlazení (značeno OV-Ex.5). Měření a vyhodnocení všech parametrů probíhalo totožně jako u ostatních měření (viz metodika). Celkové zhodnocení bude uvedeno v závěru.

Vliv procesní kapaliny na velikost střední hodnoty řezných sil

Naměřené hodnoty sil jsou uvedeny v tabulce 19. Graf 18 pak zaznamenává hodnoty sil F_c , které byly dosaženy při obrábění s jednotlivými procesními médii.

Nejnižší hodnoty řezných sil byly dosaženy při frézování s procesní kapalinou Paramo. U Experimentu 5 byly naměřeny síly F_c o 59,2 % vyšší než u Experimentu 3.



Graf 18. Opakované měření – střední hodnoty sil F_c

Nevyšší hodnoty řezných sil byly naměřeny při frézování bez chlazení. U Experimentu 5 byly dosaženy síly F_c o 12,6 % vyšší než u Experimentu 3.

Řezné síly, které byly naměřeny při frézování žíhaných vzorků s procesní kapalinou Paramo, dosahovaly o 15,1 % nižších hodnot než síly naměřené u tepelně zpracovaných vzorků frézovaných bez chlazení.

Médium	F_c [N]	F_p [N]	F_r [N]
Par-Ex.3	229,0	355,2	216,7
Par-Ex.5	364,5	159,7	198,2
OV-Ex.3	381,4	413,2	296,9
OV-Ex.5	429,5	273,6	286,7

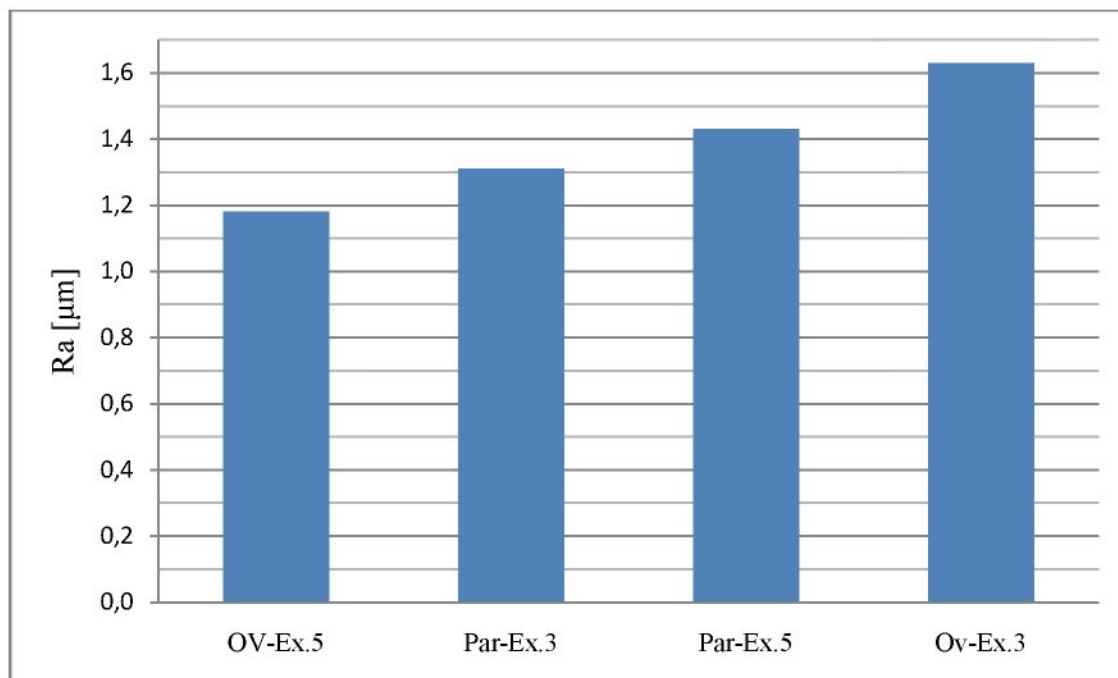
Tab. 19. Opakované měření – střední hodnota naměřených řezných sil

Porovnání procesních médií z hlediska dosažené jakosti povrchu

Hodnoty parametrů jakosti, které byly naměřeny při frézování vzorků s různými procesními médii, jsou zapsány v tabulce 20. V grafu 19 jsou pak tyto hodnoty zaneseny dle velikosti parametru R_a . Do grafu 20 jsou naopak zaznamenány hodnoty parametru c_{tp50} .

Médium	R_a [μm]	R_z [μm]	R_t [μm]	c_{tp50} [μm]
OV-Ex.5	$1,18 \pm 0,13$	$8,56 \pm 1,19$	$14,69 \pm 2,40$	$7,79 \pm 1,95$
OV-Ex.3	$1,63 \pm 0,34$	$10,64 \pm 1,50$	$16,26 \pm 1,49$	$8,48 \pm 0,89$
Par-Ex.5	$1,43 \pm 0,19$	$8,76 \pm 1,60$	$13,20 \pm 2,63$	$7,48 \pm 1,28$
Par-Ex.3	$1,31 \pm 0,15$	$8,38 \pm 0,88$	$12,58 \pm 0,88$	$6,08 \pm 1,12$

Tab. 20. Opakované měření – střední hodnoty parametrů jakosti povrchu



Graf 19. Opakované měření – střední hodnoty parametru R_a

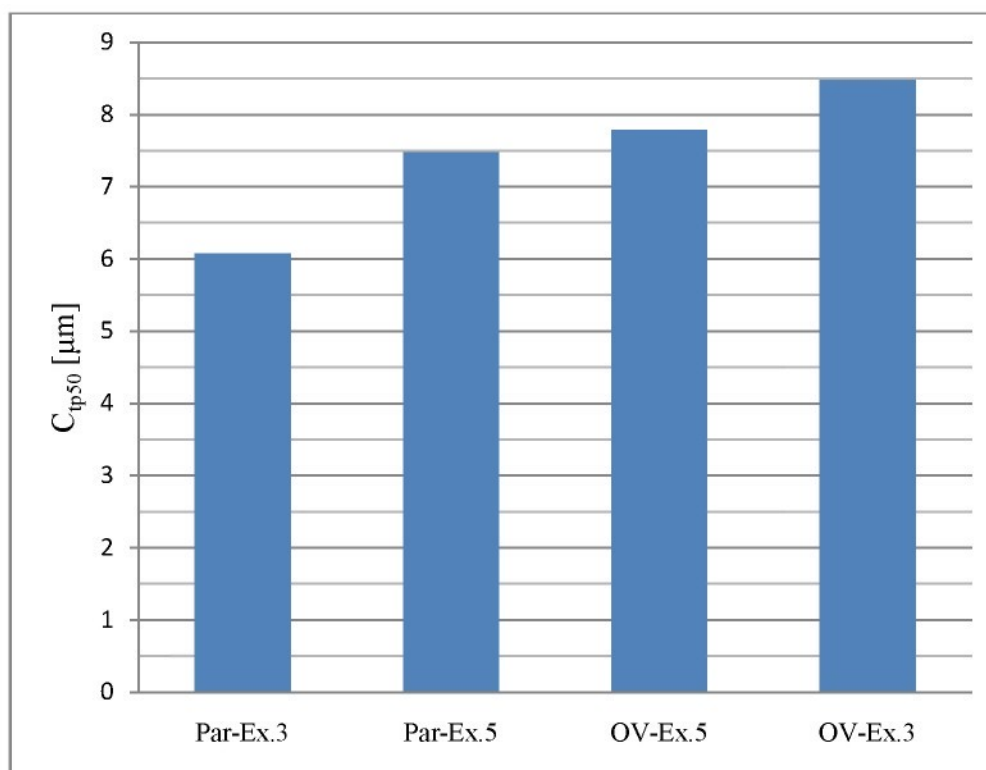
Nejnižší parametr R_a vykazovaly vzorky, které byly frézovány bez chlazení za podmínek Experimentu 5. U obrobků, které byly obráběny s procesní kapalinou Paramo za podmínek Experimentu 3, byla naměřena drsnost R_a o 11 % vyšší.

Nejvyšší drsnosti R_a dosahovaly vzorky, které byly frézovány bez chlazení za podmínek Experimentu 3. Naopak u obrobků, které byly obráběny s procesní kapalinou Paramo za podmínek Experimentu 5, byla naměřena drsnost R_a o 14 % nižší.

Drsnost R_a , která byla naměřena u žíhaných vzorků frézovaných s procesní kapalinou Paramo, dosahovala o 17,5 % nižších hodnot než drsnost, která byla změřena u tepelně zpracovaných vzorků frézovaných bez chlazení.

Nejkvalitnější povrch z hlediska parametru c_{tp50} vykazovaly vzorky, které byly frézovány s procesní kapalinou Paramo za podmínek Experimentu 3. Naopak vzorky, které byly obráběny za podmínek Experimentu 5, dosahovaly o 8,9 % vyšší hodnoty parametru c_{tp50} .

Nejméně kvalitního povrchu dosahovaly vzorky, které byly frézovány bez chlazení za podmínek Experimentu 3. Obrobky, které byly obráběny za podmínek Experimentu 5, vykazovaly parametr c_{tp50} o 8,1 % nižší.



Graf 20. Opakované měření – střední hodnoty parametru c_{tp50}

Parametr c_{tp50} , který byl naměřen u žíhaných vzorků frézovaných s procesní kapalinou Paramo, dosahoval o 4,1 % nižší hodnoty než parametr, který byl změřen u žíhaných vzorků obráběných bez chlazení.

Porovnání procesních médií z hlediska zbytkových napětí

Hodnoty zbytkového napětí v povrchové vrstvě vzorků, které byly frézovány v různých procesních médiích, jsou zapsány v tabulce 21. V grafu 21 jsou pak znázorněny tyto hodnoty dle velikosti.

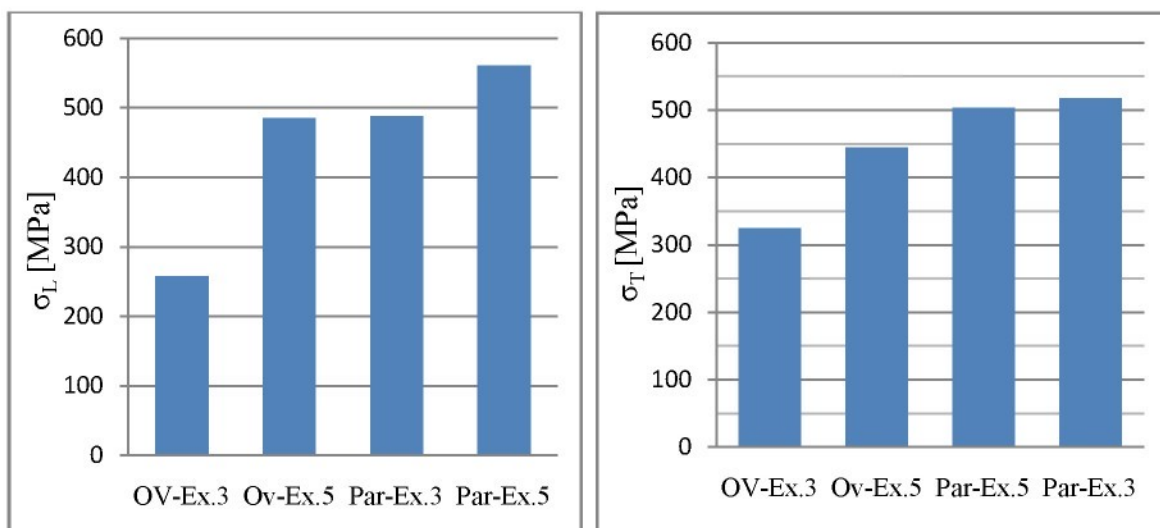
Nejnižší napětí ve směru posuvu vykazovaly vzorky, které byly frézovány bez chlazení za podmínek Experimentu 3. Obrobky, které byly před měřením vyžihány, vykazovaly napětí σ_L o 88 % vyšší.

Nejvyšší napětí ve směru posuvu vykazovaly vzorky, které byly frézovány s procesní kapalinou Paramo za podmínek Experimentu 5. Obrobky, které nebyly tepelně zpracovány, dosahovaly o 13 % nižší hodnoty napětí σ_L .

Zbytkové napětí ve směru posuvu, které bylo naměřeno u žíhaných vzorků frézovaných bez chlazení, dosahovalo o 13,5 % nižší hodnoty než napětí, jež bylo změřeno u tepelně zpracovaných vzorků obráběných s procesní kapalinou Paramo.

Médium	σ_L [MPa]	σ_T [MPa]	W [°]
OV-Ex.3	258 ± 12	325 ± 31	2,62
OV-Ex.5	485 ± 17	444 ± 45	2,70
Par-Ex.3	488 ± 21	518 ± 47	2,78
Par-Ex.5	561 ± 22	503 ± 68	2,76

Tab. 21. Opakované měření – střední hodnoty parametrů zbytkového napětí



Graf 21. Opakované měření – střední hodnoty parametrů σ_T a σ_L

Nejnižší zbytkové napětí ve směru kolmém na posuv bylo naměřeno u vzorků, které byly frézovány bez chlazení za podmínek Experimentu 3. Vyžíhané obrobky vykazovaly napětí σ_T o 36,6 % vyšší.

Nejvyššího napětí ve směru kolmém na posuv naopak dosahovaly vzorky, které byly

frézovány s procesní kapalinou Paramo za podmínek Experimentu 3. Žíhané obrobky dosahovaly o 2,9 % nižší hodnoty napětí σ_L .

Zbytkové napětí σ_L žíhaných vzorků, které byly frézovány bez chlazení, dosahovalo o 11,7 % nižší hodnoty než napětí, jež bylo naměřeno u tepelně zpracovaných vzorků obráběných s procesní kapalinou Paramo.

7 Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo porovnání vlivu vybraných procesních médií na technologii čelního frézování a vlastnosti obráběného vzorku.

Pro tento účel bylo vybráno pět různých procesních médií, čtyři kapalného skupenství a jedno plynného skupenství. Ta byla porovnána s obráběním „za sucha“.

Vliv prostředí na čelní frézování byl zkoumán za těchto řezných podmínek:

- posuv 0,6 mm/ot. a hloubka záběru 1 mm (značeno Experiment 1),
- posuv 0,6 mm/ot. a hloubka záběru 3,5 mm (značeno Experiment 2),
- posuv 1,5 mm/ot. a hloubka záběru 1 mm (značeno Experiment 3),
- posuv 1,5 mm/ot. a hloubka záběru 2 mm (značeno Experiment 4),
- posuv 1,5 mm/ot. a hloubka záběru 1 mm (značeno Experiment 5) – vzorek žíhaný na odstranění vnitřního pnutí.

Jednotlivé Experimenty byly hodnoceny podle těchto hledisek:

- velikost řezných sil F_c , F_f a F_p ,
- drsnost povrchu R_a , R_z a R_t obrobených vzorků,
- nosný podíl profilu povrchu obrobených vzorků,
- zbytková napětí v povrchové vrstvě u vzorků frézovaných s posuvem 1,5 mm/ot. s hloubkou záběru 1 mm.

Z výsledků měření, které byly získány při frézování posuvem 0,6 mm/ot. a hloubce záběru 1 mm (Experiment 1), je možno učinit tyto závěry:

- nejnižší řezné síly F_c , F_f a F_p byly dosaženy při frézování s procesní kapalinou Accu-Lube LB 2000,
- nejkvalitnější drsnost povrchu, tedy nejnižší parametr R_a , vykazovaly vzorky, které byly frézovány bez chlazení,
- nejlepší výsledky z hlediska nosného podílu profilu, tedy nejnižší parametr c_{tp50} , vykazovaly vzorky frézované bez chlazení.

Z výsledků, které byly naměřeny při frézování posuvem 0,6 mm/ot. a hloubce záběru 3,5 mm (Experiment 2), lze učinit tyto závěry:

- nejnižší hodnoty řezných sil F_c , F_f a F_p vznikajících během procesu obrábění byly naměřeny při frézování s procesní kapalinou Accu-Lube LB 2000,
- nejlepší drsnost povrchu, tedy nejnižší hodnoty parametru R_a , dosahovaly vzorky, které byly frézovány bez chlazení,
- nejnižší parametr c_{tp50} , tedy nejkvalitnější povrch z hlediska nosného podílu profilu, vykazovaly vzorky frézované s procesní kapalinou Solgreen 540.

Z hodnot, které byly naměřeny při frézování posuvem 1,5 mm/ot. a hloubce záběru 1 mm (Experiment 3), je možné učinit následující závěry:

- nejlepší výsledky z hlediska velikosti sil F_c , F_f a F_p byly dosaženy při aplikaci procesní kapaliny ve formě mlhy (Accu-Lube LB 2000),
- nejnižší parametr R_a , tedy nejlepší drsnost povrchu, vykazovaly vzorky, které byly frézovány s procesní kapalinou Paramo SK 300,
- nejkvalitnějšího povrchu z hlediska nosného podílu profilu, tedy nejnižšího parametru c_{tp50} , dosáhly vzorky frézované s procesní kapalinou Paramo Sk 300,
- nejlepších výsledků z hlediska zbytkového napětí ve směru posuvu, tedy nejnižšího tahového napětí σ_L , dosáhly vzorky, které byly obráběny bez chlazení,
- nejlepších výsledků z hlediska zbytkového napětí ve směru kolmém na posuv, tedy nejnižšího tahového napětí σ_T , dosáhly vzorky, které byly obráběny bez chlazení.

Z výsledků, které byly získány při frézování posuvem 1,5 mm/ot. a hloubce záběru 2 mm (Experiment 4), lze určit následující závěry:

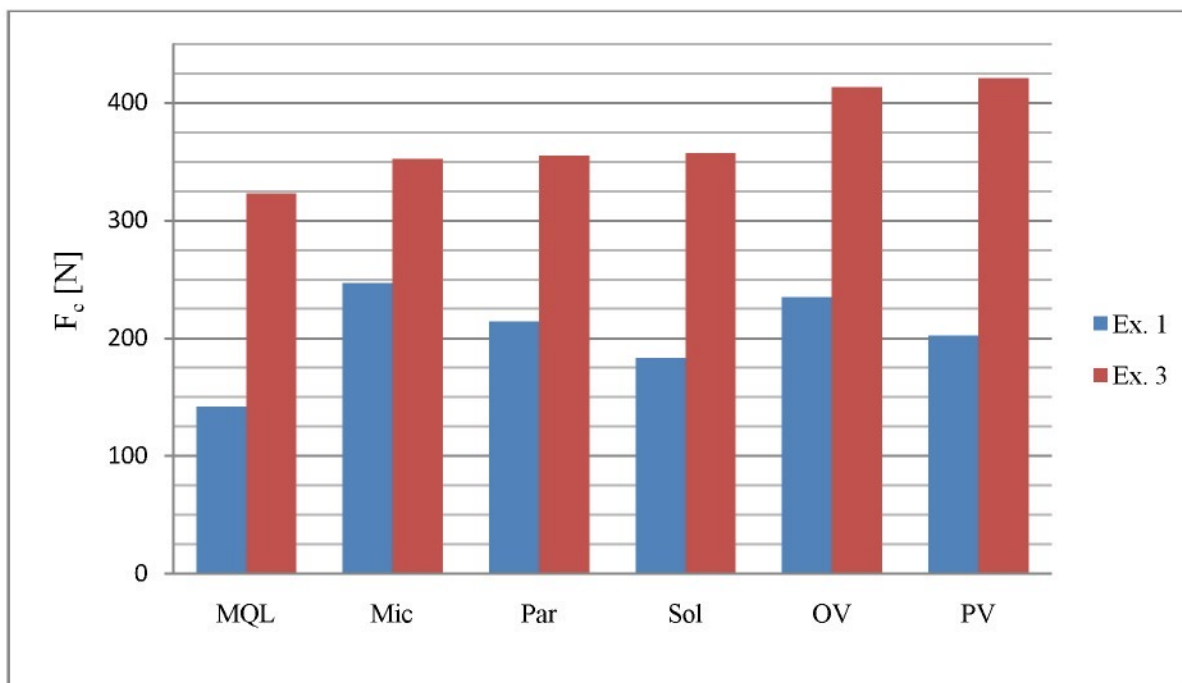
- nejnižší hodnoty sil F_c , F_f a F_p vznikaly během procesu obrábění v případě, kdy byla procesní kapalina aplikována ve formě mlhy (Accu-Lube),
- nejnižší drsnost povrchu, tedy nejnižší parametr R_a , byla dosažena u vzorků, které byly frézovány v podchlazeném vzduchu o teplotě 4°C,
- nejnižší parametr c_{tp50} , tedy nejlepší jakost povrchu obrobených vzorků, byl dosažen při frézování v podchlazeném vzduchu teplotě 4°C.

Z hodnot, které byly získány při frézování žíhaných vzorků posuvem 1,5 mm/ot. a hloubce záběru 1 mm (Experiment 5), lze určit následující závěry:

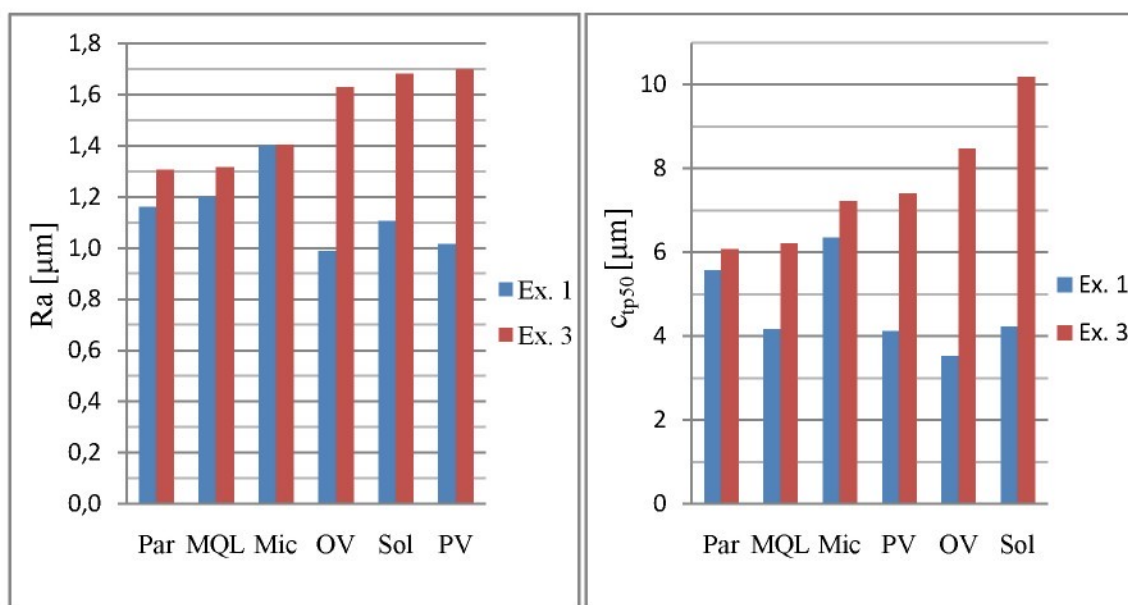
- nejnižší hodnoty sil F_c , F_f a F_p vznikajících během procesu obrábění byly naměřeny při frézování s procesní kapalinou Paramo SK 300,
- nejkvalitnější drsnost povrchu, tedy nejnižší parametr R_a , vykazovaly vzorky, které byly frézovány bez chlazení,
- nejlepší jakost povrchu obrobených vzorků, tedy nejnižší parametr c_{tp50} , byla dosažena při frézování s procesní kapalinou Paramo SK 300,
- nejlepších výsledků z hlediska zbytkového napětí, tedy nejnižšího tahového napětí σ_L a σ_T , dosáhly vzorky, které byly obráběny bez chlazení.

Dalším hodnotícím parametrem byl vliv řezných podmínek na čelní frézování. Pro tento účel bylo provedeno porovnání dokončovacích metod frézování (Experiment 1 a Experiment 3). Z grafu 22 je patrné, že posuv má výrazný vliv na velikost řezné síly. Síly

F_c , které byly naměřeny při frézování za podmínek Experimentu 3, dosahovaly u většiny procesních médií dvojnásobné hodnoty než síly naměřené za podmínek Experimentu 1. Dále je možné konstatovat, že nízký posuv měl příznivý vliv na jakost obrobků, jak je patrné z grafu 23 a 24. Tyto výsledky potvrdily naše očekávání.



Graf 22. Řezná síla u Ex. 1 a Ex. 3



Graf 23. Parametr Ra u Ex. 1 a Ex. 3

Graf 24. Parametr c_{tp50} u Ex. 1 a Ex. 3

Výsledky zbytkových napětí u Experimentu 3 byly zajímavé a vyvolávaly otázky, proto jsme se rozhodli podniknout opakované měření s jedinou změnou – vzorky byly vyžíhány (Experiment 5). Opakované měření potvrdilo výsledky z Experimentu 3

(jak je uvedeno v tabulkách 19, 20 a 21 obsažených v kapitole 6.5). Nejnižší tahové napětí vykazovaly vzorky, které byly frézovány bez chlazení. Literatura číslo [14] vysvětluje tvorbu tahového napětí takto: je-li poměr ($R_m/R_{p0,2}$) větší než 1,25, tak u obrobku vzniká tahové napětí. Vzorky, které byly použity při experimentálním řešení bakalářské práce, tuto podmínku splňují, protože poměr ($R_m/R_{p0,2}$) je 1,82.

Z výsledků je dále patrné, že čím více mazací složky má procesní kapalina, tím více se zvyšuje hodnota zbytkového napětí. Tvorba zbytkového napětí je ovlivněna množstvím faktorů. Zde pravděpodobně měly největší účinek teplotní šoky, které vznikají při chlazení v obrobku a na břitové destičce. Velký vliv měla také přilnavá tlakovzdorná vrstva mazací kapaliny, která bránila odvodu tepla.

Tepelné zpracování mělo také výrazný vliv na vlastnosti obrobku. Lze konstatovat, že vyžihání zkušebních vzorků mělo negativní vliv na velikost řezné síly i zbytkového napětí a pozitivní vliv na jakost povrchu.

Porovnáme-li výsledky této práce s výsledky prací T. Bartuška a M. Rejzka, tak odhalíme odlišnost v případě použití aplikace metody MQL. Tato metoda vykazovala při soustružení velmi dobré výsledky z hlediska jakosti povrchu. Jakost broušených vzorků byla také dobrá, brousící kotouče se však značně zanášely a ztrácely schopnost odebírat třísku. Vliv této inovační metody na technologii čelního frézování byl také značný. Projevil se především ve výrazném snížení řezných sil a dobré jakosti povrchu. Tento druh přívodu procesního média měl však také negativní vliv na velikost zbytkového napětí – vzorky vykazovaly nepříznivé tahové napětí. Použití MQL mělo pozitivní i negativní účinek na technologii frézování, je proto nutné podrobit tuto metodu podrobnějšímu výzkumu.

Výsledky této bakalářské dokazují, že procesní médium má velký vliv na samotnou technologii frézování a na vlastnosti obrobku. Je možné konstatovat, že při frézování pozitivně působí na velikost řezných sil, drsnost povrchu, velikost parametru c_{tp50} a negativně na velikost zbytkového napětí.

Tuto práci by bylo vhodné do budoucna rozšířit o další druhy materiálu (křehký materiál, houževnatý materiál atd.). Dále by bylo vhodné vykonat výzkum vlivu procesního média na válcové frézování. Zajímavý by byl také výzkum vlivu teplot vznikajících při frézování na velikosti zbytkového napětí v obráběné součásti (termovize).

Seznam použité literatury

- [1] *Accu-Lube: Mikromazací systémy*. REXIM. [cit. 11. března 2010]. Dostupné na: <http://www.rexim.cz/docs/Accu-Lube-prospekt.pdf>.
- [2] BARTUŠEK, T. *Účinek procesní kapaliny na technologii broušení a kvalitu obrobených součástí. [Diplomová práce]*. Liberec: TU v Liberci, 2008. 67 s.
- [3] BÁTORA, B., VASILKO, K. *Obrobené povrchy – technologická dědičnost, funkčnost*. Rec. K. Kocman, S. Adamczak. 1. vyd. Trenčín: TU v Trenčíně a GC Tech, 2000. 184 s. ISBN 80-88914-19-1.
- [4] BENZINOL. *Rezné kapaliny a ich použitie pri obrábani kovov*. – vyd. Bratislava: Svépomoc Praha, 1990. 80s. ISBN 80-85168-12-X.
- [5] BUMBÁLEK, B., OŠTÁDAL, B., ŠAFR, E. *Řezné kapaliny*. 1. vyd. Praha: SNTL- Nakladatelství technické literatury, 1963. 136 s.
- [6] *C07_Technol-DEFIN-GEO* (podklad pro výuku TECHNOLOGIE III). [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, katedra obrábění a montáže, [cit. 15. dubna 2010]. Dostupné na: <http://www.kom.tul.cz/download.php>.
- [7] *Cold Air Gun – chlazení nástrojů při obrábění a další aplikace*. VORTEC, 2008. [cit. 18. března 2010]. Dostupné na: http://www.lontech.cz/files/virove_trubice/cold_air_gun_-_specifikace.pdf.
- [8] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 1999. Praha: Český normalizační institut.
- [9] DEGNER, W., LUTZE, H., SMEJKAL, E. *Spanende Formung, Theorie, Berechnung, Richtwerte*. 15. Auflage. München-Wien: Carl Hanser Verlag, 2002. 396 s. ISBN 3- 446-22138-7.
- [10] GANEV, Nikolaj. *Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí*. Praha : ES ČVUT, 2010.
- [11] GAZDA, Jaromír; aj. *Teorie obrábění : Řezné síly při obrábění*. 1. vyd. Liberec : Ediční středisko VŠST Liberec, 1993. 123 s. ISBN 80-7083-110-3.

- [12] Kraus I., Ganev N.: *Technické aplikace difrakční analýzy*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2004.
- [13] *Microcool 387 A*. FUCHS, 2005. [cit. 3. duben 2010]. Dostupné na: http://www.hazmioil.cz/PI/2006/peu_PI-W-0063.pdf.
- [14] NECKÁŘ, F., KVASNIČKA, I. *Vybrané statě z úběru materiálu*. Rec. J. Gazda. 1. vyd. Praha: ES ČVUT, 1991. 88 s. ISBN 80-01-00696-4.
- [15] *Paramo SK 300*. PARAMO. [cit. 1. duben 2010]. Dostupné na: <http://eshop.paramo.cz/produkty/KatalogovyList.aspx?kodproduktu=V032427>.
- [16] *Průmyslové produkty*. CRC Industries Europe. [cit. 3. duben 2010]. Dostupné na: <http://www.czechstar.cz/crc/CRC%20IND%202008.pdf>.
- [17] *Příručka obrábění* : kniha pro praktiky / [ze švédštiny přeložil Miroslav Kudela]. Praha : Sandvik CZ : 1997. [800] s. ISBN 91-972299-4-6.
- [18] REJZEK, M. *Účinek procesní kapaliny na technologii soustružení a kvalitu obroběných součástí*. [Bakalářská práce]. Liberec: TU v Liberci, 2009. 55 s.
- [19] VINGER, M.; PŘIKRYL, Z. *Technický průvodce 61 : Obrábění*. 1. vydání. Praha : SNTL, 1984. 800 s.
- [20] VLACH, B. *Technologie obrábění a montáží*. 1. vyd. Praha: SNTL – skladatelství technické literatury, n. p., 1990. 472 s. ISBN 80-03-00143-9.
- [21] *Výrobní program*. TOS Olomouc. [cit. 8. března 2010]. Dostupné na: <http://www.tos-olomouc.cz/cz/vyrobní-program/>.

Seznam příloh

Příloha 1 – Abbottovy křivky

6 stran

Příloha 2 – nosný podíl profilu

3 strany

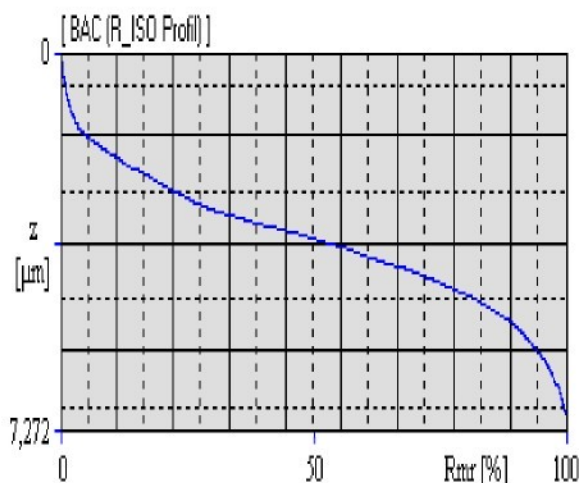
PŘÍLOHA 1

ABOTTOVY KŘIVKY

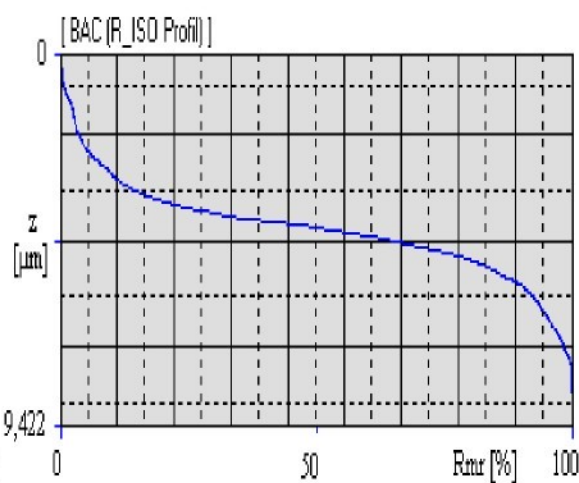
Frézování bez přívodu chlazení

Experiment číslo	Posuv [mm/ot.]	Hloubka záběru [mm]	Ra [μm]	Rt [μm]	Rz [μm]	C _{tp50} [μm]
1	0,6	1	0,99 $\pm$ 0,13	8,62 $\pm$ 1,51	6,57 $\pm$ 1,20	3,52
2		3,5	0,90 $\pm$ 0,15	9,37 $\pm$ 1,63	6,12 $\pm$ 0,81	4,38
3	1,5	1	1,63 $\pm$ 0,34	16,26 $\pm$ 1,49	10,64 $\pm$ 1,56	8,48
4		2	1,65 $\pm$ 0,26	16,51 $\pm$ 3,30	11,11 $\pm$ 1,69	6,63

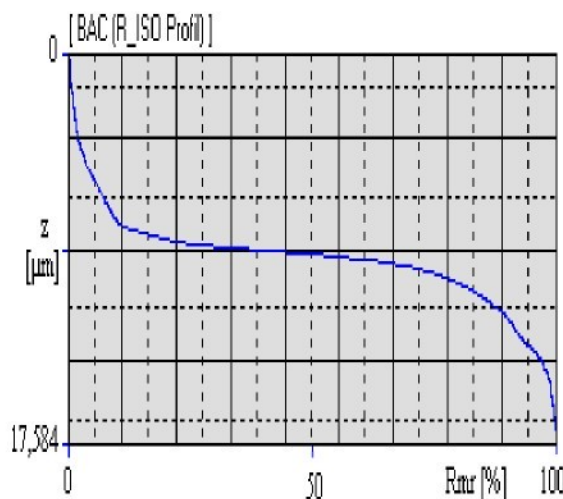
Tab. 1. Jakost povrchu vzorků obrobených v prostředí okolního vzduchu



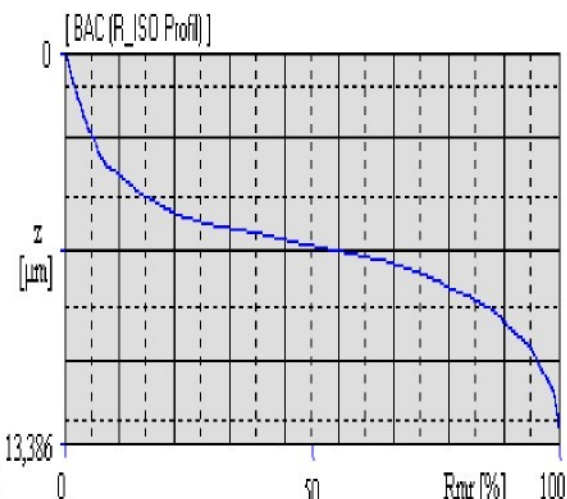
Graf 1. Experiment 1 - charakteristický průběh Abbottovy křivky



Graf 2. Experiment 2 - charakteristický průběh Abbottovy křivky



Graf 3. Experiment 3 - charakteristický průběh Abbottovy křivky

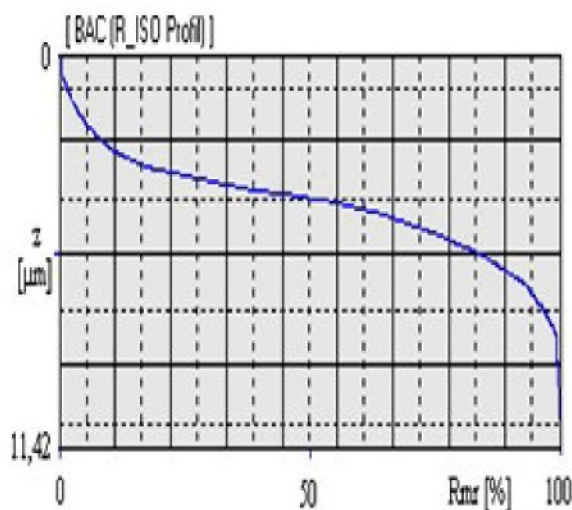


Graf 4. Experiment 4 - charakteristický průběh Abbottovy křivky

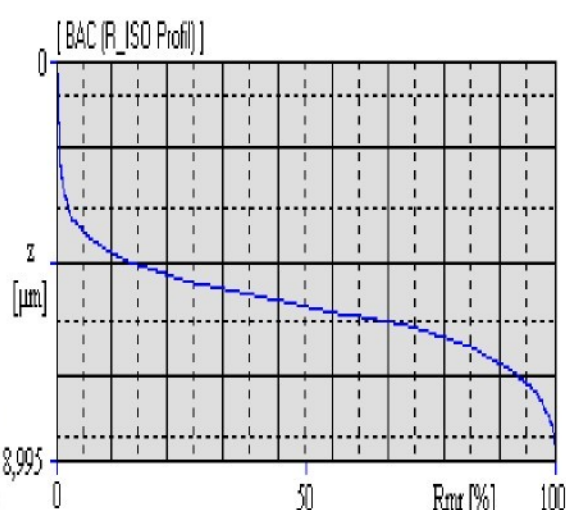
Frézování na vzduchu, který byl podchlazen na teplotu 4°C

Experiment číslo	Posuv [mm/ot.]	Hloubka záběru [mm]	Ra [μm]	Rt [μm]	Rz [μm]	C _{tp50} [μm]
1	0,6	1	1,02 $\pm$ 0,19	10,81 $\pm$ 1,68	7,42 $\pm$ 0,79	4,12
2		3,5	1,01 $\pm$ 0,17	11,83 $\pm$ 2,52	7,57 $\pm$ 1,17	5,43
3	1,5	1	1,70 $\pm$ 0,40	16,06 $\pm$ 3,15	11,19 $\pm$ 2,33	7,40
4		2	1,06 $\pm$ 0,17	10,54 $\pm$ 2,01	7,10 $\pm$ 1,03	5,09

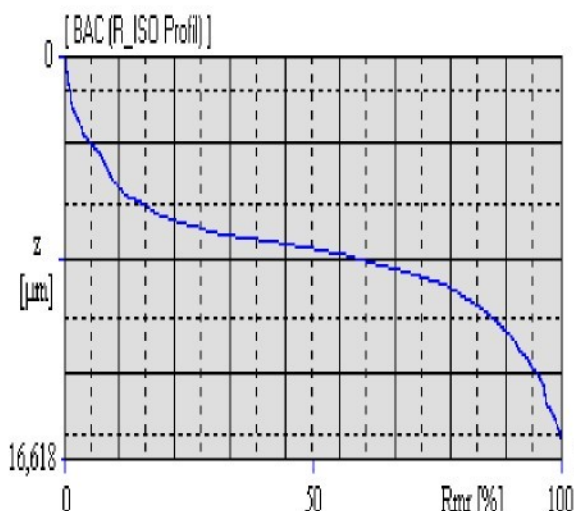
Tab. 2. Jakost povrchu vzorků obrobených na vzduchu, který byl podchlazen na teplotu 4°C



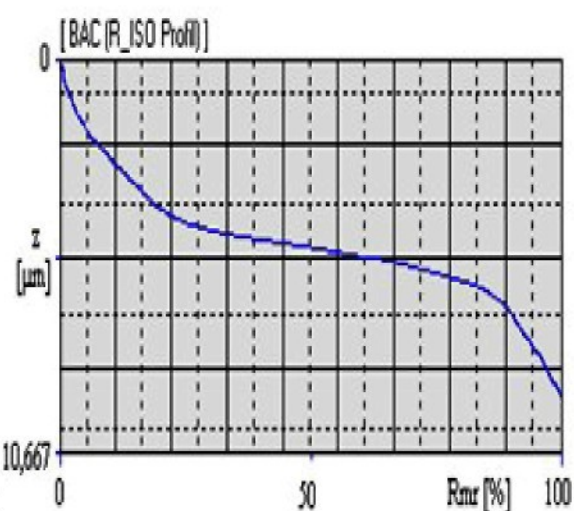
Graf 5. Experiment 1 - charakteristický průběh Abbottovy křivky



Graf 6. Experiment 2 - charakteristický průběh Abbottovy křivky



Graf 7. Experiment 3 - charakteristický průběh Abbottovy křivky

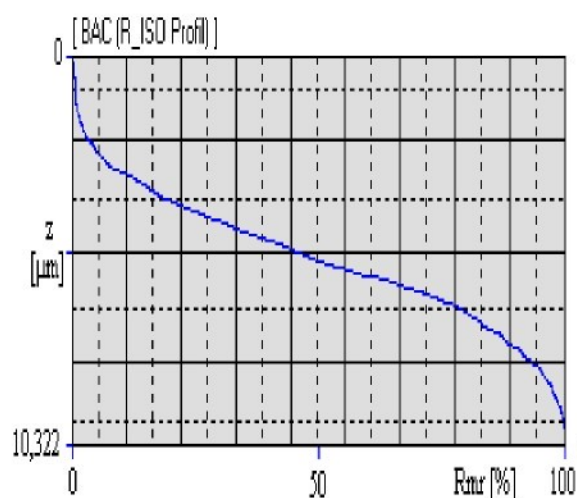


Graf 8. Experiment 4 - charakteristický průběh Abbottovy křivky

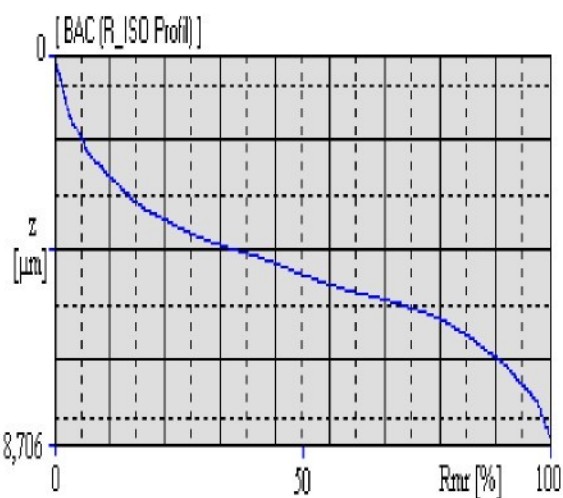
Frézování v prostředí procesní kapaliny Microcool 387+

Experiment číslo	Posuv [mm/ot.]	Hloubka záběru [mm]	Ra [μm]	Rt [μm]	Rz [μm]	C _{tp50} [μm]
1	0,6	1	1,40 $\pm$ 0,05	10,53 $\pm$ 1,22	7,66 $\pm$ 0,35	5,40
2		3,5	1,02 $\pm$ 0,11	8,19 $\pm$ 0,35	6,16 $\pm$ 0,17	4,80
3	1,5	1	1,41 $\pm$ 0,18	13,62 $\pm$ 2,06	9,01 $\pm$ 0,81	7,23
4		2	1,50 $\pm$ 0,21	13,83 $\pm$ 1,65	9,44 $\pm$ 1,34	7,85

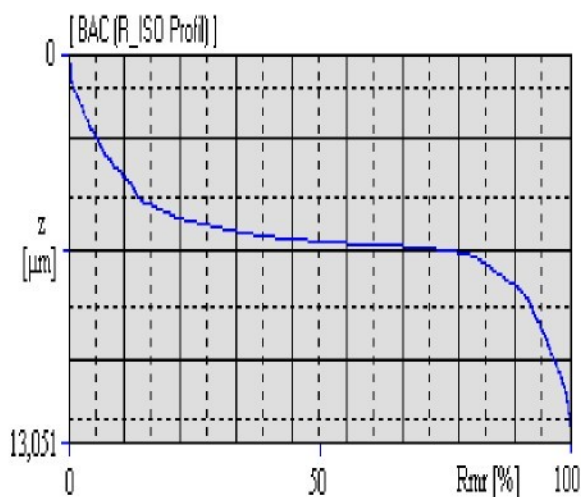
Tab. 3. Jakost povrchu vzorků obrobených v prostředí kapaliny Microcool 387+



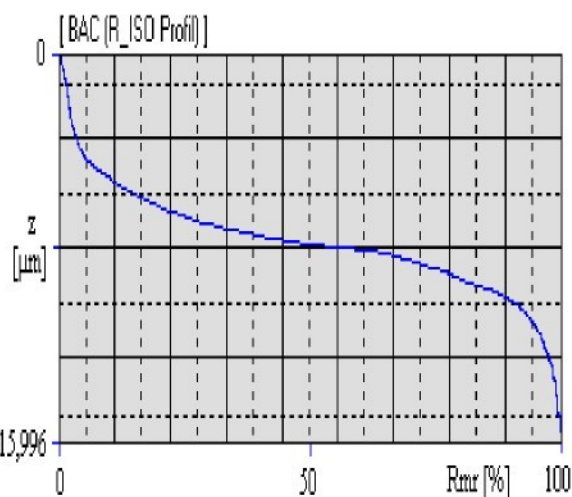
Graf 9. Experiment 1 - charakteristický průběh Abbottovy křivky



Graf 10. Experiment 2 - charakteristický průběh Abbottovy křivky



Graf 11. Experiment 3 - charakteristický průběh Abbottovy křivky

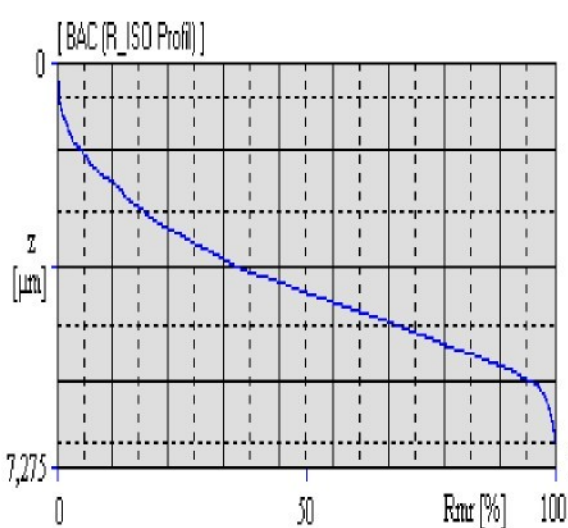


Graf 12. Experiment 4 - charakteristický průběh Abbottovy křivky

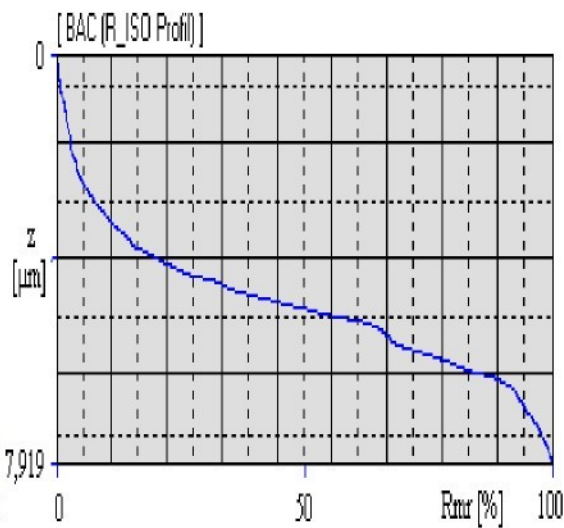
Frézování v prostředí procesní kapaliny Accu-Lube LB 2000

Experiment číslo	Posuv [mm/ot.]	Hloubka záběru [mm]	Ra [μm]	Rt [μm]	Rz [μm]	C _{tp50} [μm]
1	0,6	1	1,20 $\pm$ 0,09	8,22 $\pm$ 0,61	6,70 $\pm$ 0,45	4,16
2		3,5	0,99 $\pm$ 0,11	8,58 $\pm$ 2,03	5,64 $\pm$ 0,72	4,91
3	1,5	1	1,32 $\pm$ 0,17	13,03 $\pm$ 1,97	8,71 $\pm$ 1,33	7,21
4		2	1,23 $\pm$ 0,18	13,69 $\pm$ 2,03	8,08 $\pm$ 1,15	7,09

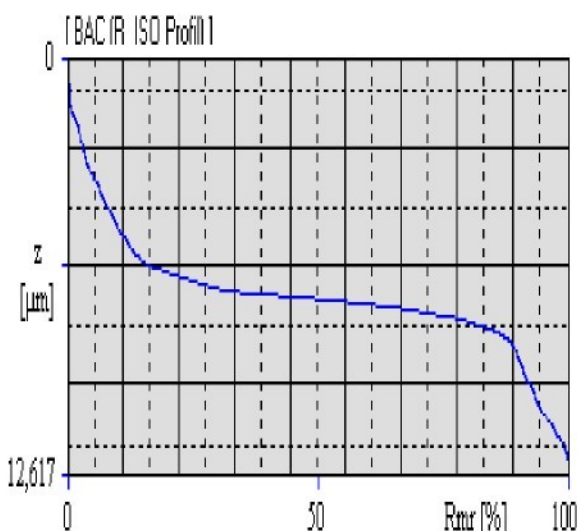
Tab. 4. Jakost povrchu vzorků obrobených v prostředí kapaliny Accu-Lube LB 2000



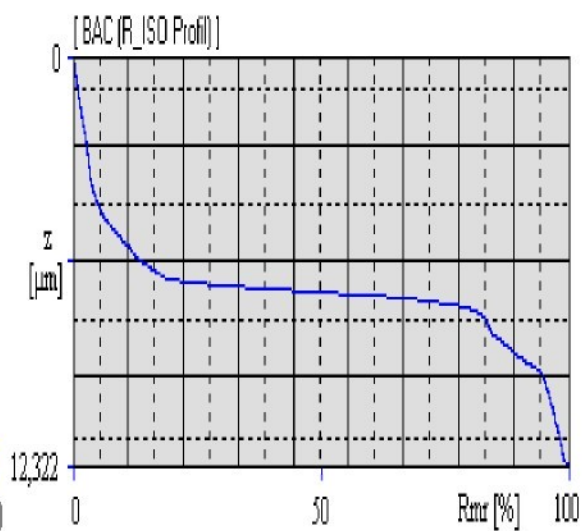
Graf 13. Experiment 1 - charakteristický průběh Abbottovy křivky



Graf 14. Experiment 2 - charakteristický průběh Abbottovy křivky



Graf 15. Experiment 3 - charakteristický průběh Abbottovy křivky

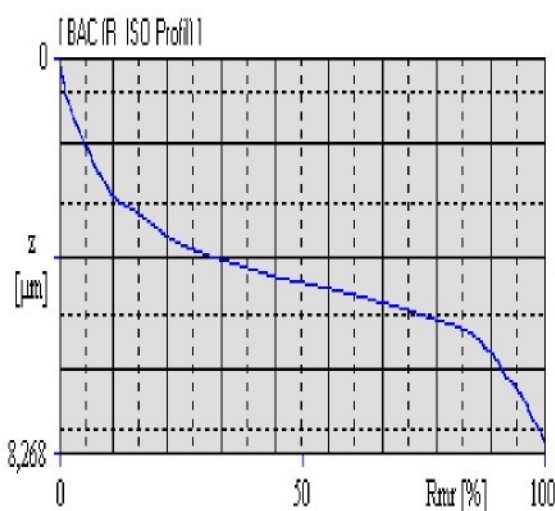


Graf 16. Experiment 4 - charakteristický průběh Abbottovy křivky

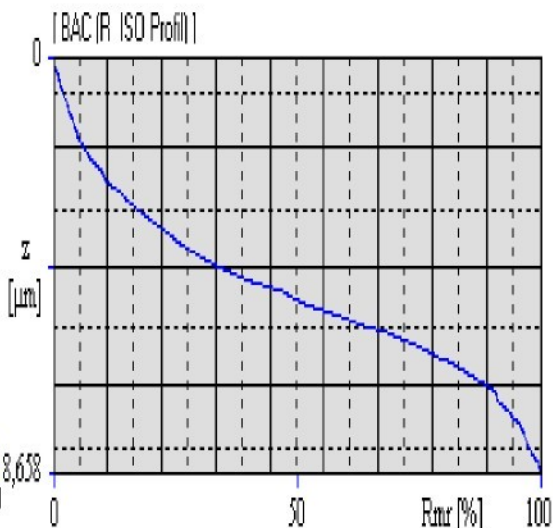
Frézování v prostředí procesní kapaliny Paramo SK 300

Experiment číslo	Posuv [mm/ot.]	Hloubka záběru [mm]	Ra [μm]	Rt [μm]	Rz [μm]	C _{tp50} [μm]
1	0,6	1	1,16 $\pm$ 0,10	9,68 $\pm$ 1,08	6,82 $\pm$ 0,79	4,70
2		3,5	1,25 $\pm$ 0,13	8,66 $\pm$ 1,05	6,79 $\pm$ 0,82	5,06
3	1,5	1	1,31 $\pm$ 0,15	12,58 $\pm$ 0,88	8,38 $\pm$ 0,88	6,08
4		2	1,55 $\pm$ 0,23	16,08 $\pm$ 1,90	10,36 $\pm$ 1,80	7,60

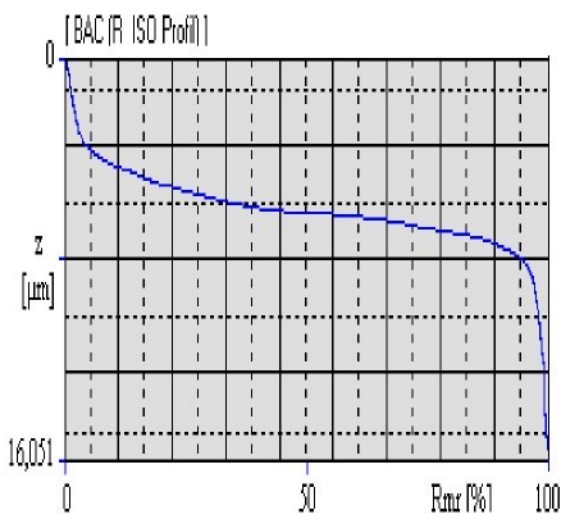
Tab. 5. Jakost povrchu vzorků obrobených v prostředí kapaliny Paramo SK 300



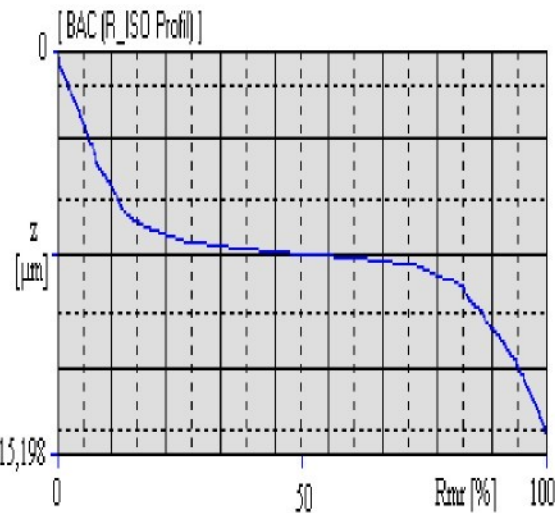
Graf 17. Experiment 1 - charakteristický průběh Abbottovy křivky



Graf 18. Experiment 2 - charakteristický průběh Abbottovy křivky



Graf 19. Experiment 3 - charakteristický průběh Abbottovy křivky

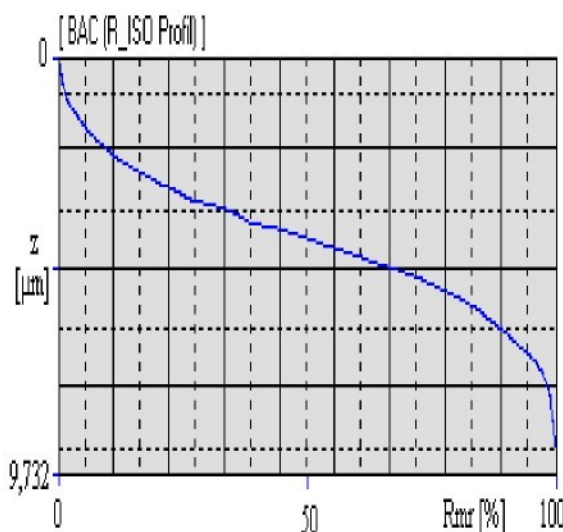


Graf 20. Experiment 4 - charakteristický průběh Abbottovy křivky

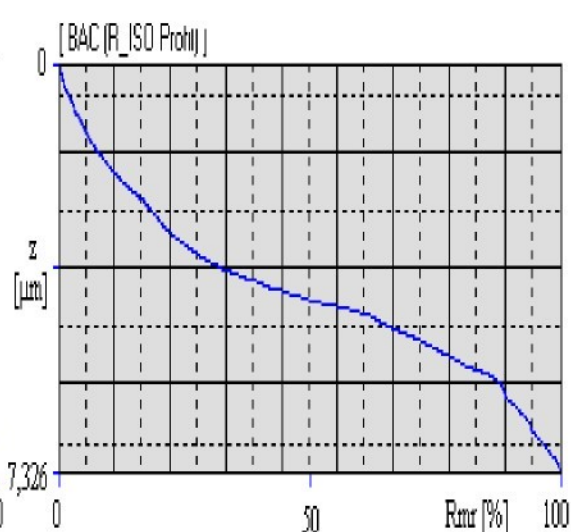
Frézování v prostředí procesní kapaliny Solgreen 540

Experiment číslo	Posuv [mm/ot.]	Hloubka záběru [mm]	Ra [μm]	Rt [μm]	Rz [μm]	C _{tp50} [μm]
1	0,6	1	1,11 $\pm$ 0,08	9,97 $\pm$ 0,64	7,35 $\pm$ 0,44	4,17
2		3,5	1,06 $\pm$ 0,16	7,41 $\pm$ 1,20	5,70 $\pm$ 1,00	4,23
3	0,15	1	1,68 $\pm$ 0,20	17,22 $\pm$ 1,55	11,43 $\pm$ 1,22	10,19
4		2	1,78 $\pm$ 0,27	18,39 $\pm$ 2,64	11,18 $\pm$ 1,63	9,97

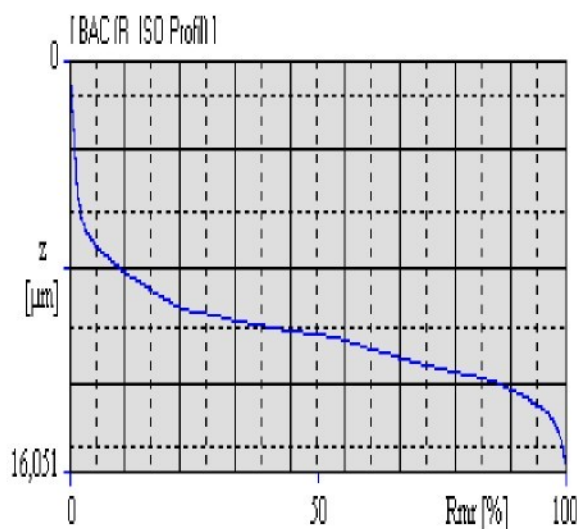
Tab. 6. Jakost povrchu vzorků obrobků v prostředí kapaliny Solgreen 540



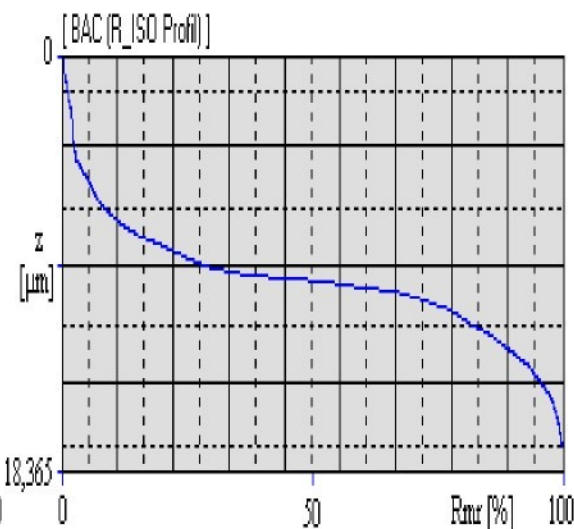
Graf 21. Experiment 1 - charakteristický průběh Abbottovy křivky



Graf 22. Experiment 2 - charakteristický průběh Abbottovy křivky



Graf 23. Experiment 3 - charakteristický průběh Abbottovy křivky



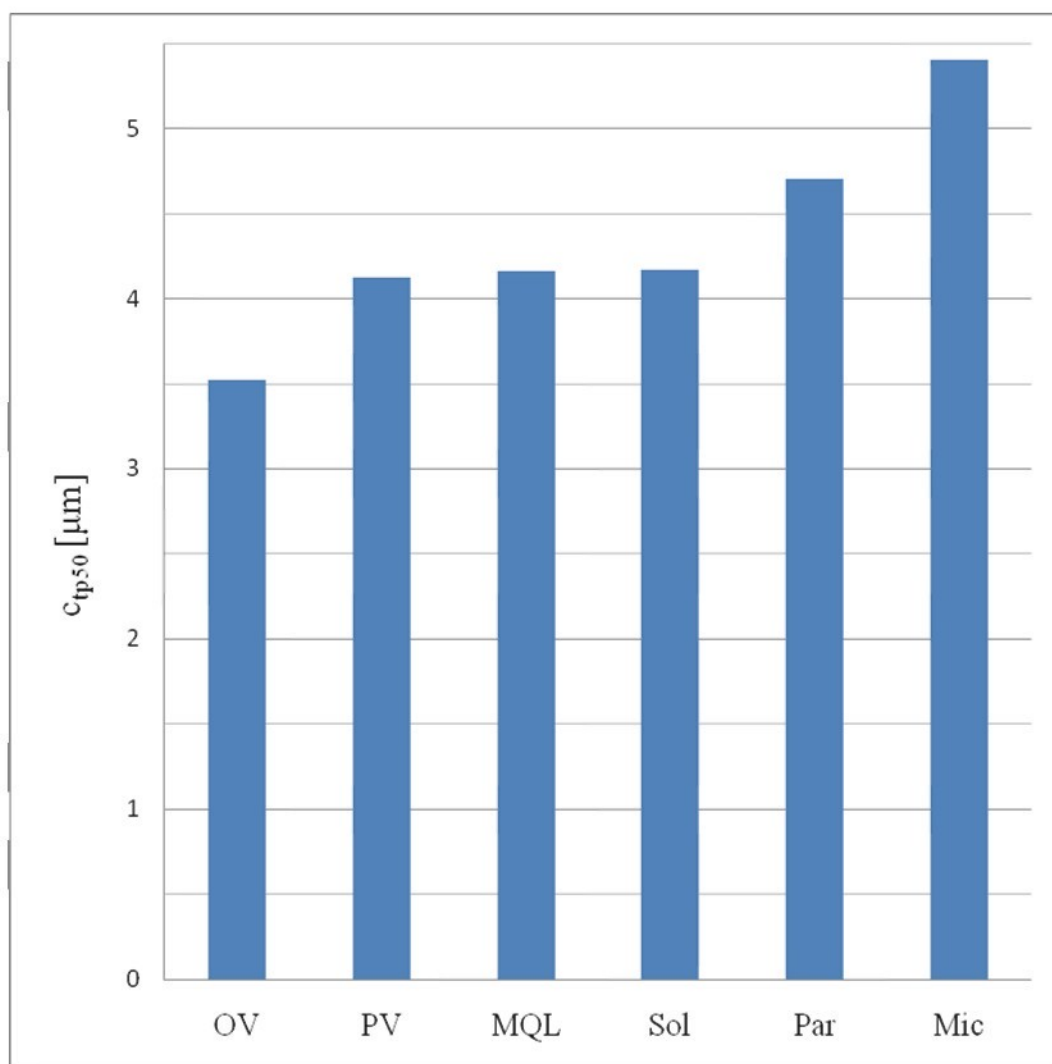
Graf 24. Experiment 4 - charakteristický průběh Abbottovy křivky

PŘÍLOHA 2

NOSNÝ PODÍL PROFILU

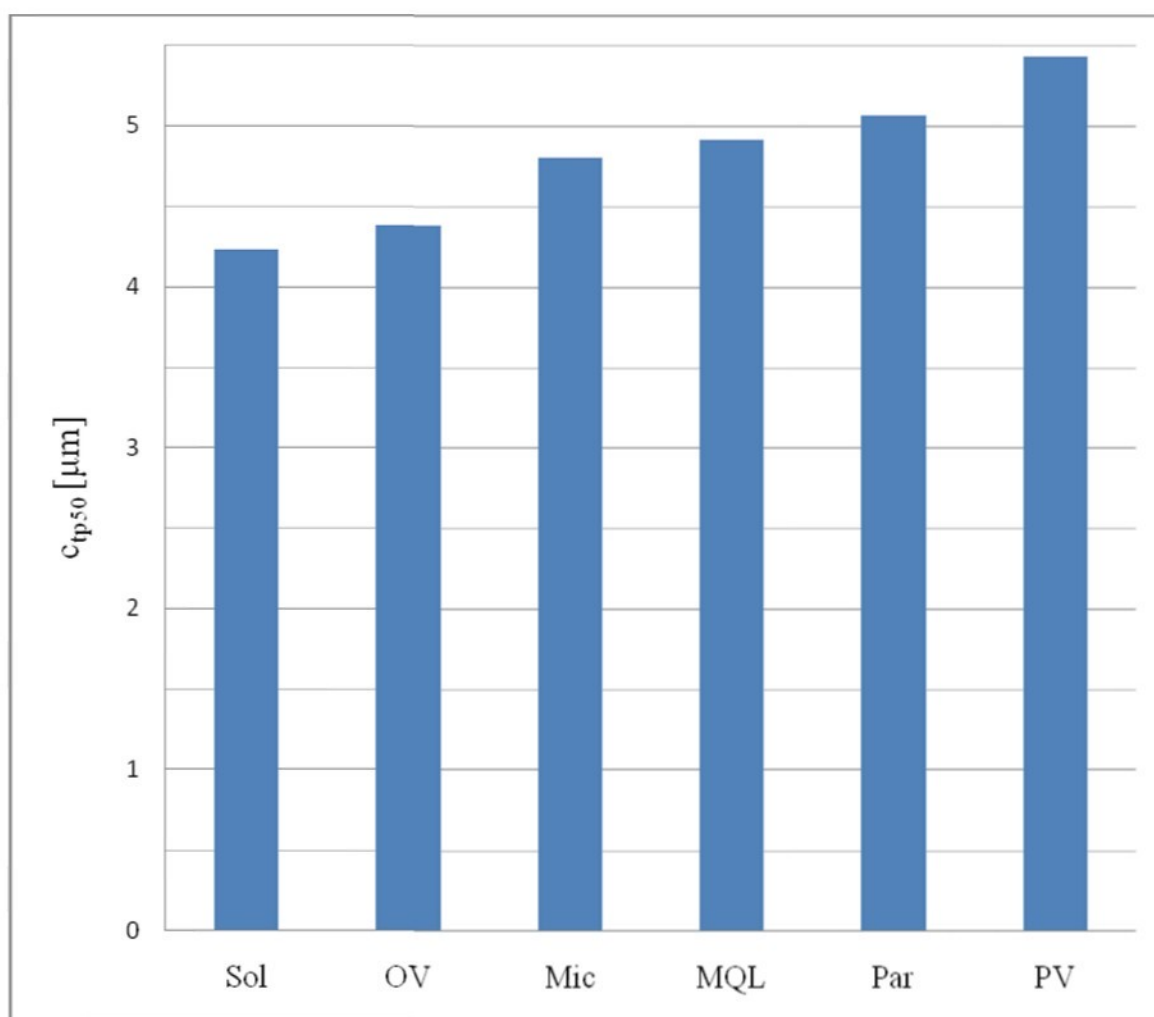
Frézování s posuvem 0,6 mm/ot. a s hloubkou záběru 1 mm

Média	c_{tp50} [μm]
Microcool 387+	5,40
Paramo SK 300	4,70
Solgreen 540	4,17
Accu-Lube LB 2000	4,16
Podchlazený vzduch na 4°C	4,12
Okolní vzduch	3,52

Tab. 1. Experiment 1 – hodnoty parametru c_{tp50} Graf 1. Parametr c_{tp50} obrobků frézovaných v různých procesních médiích

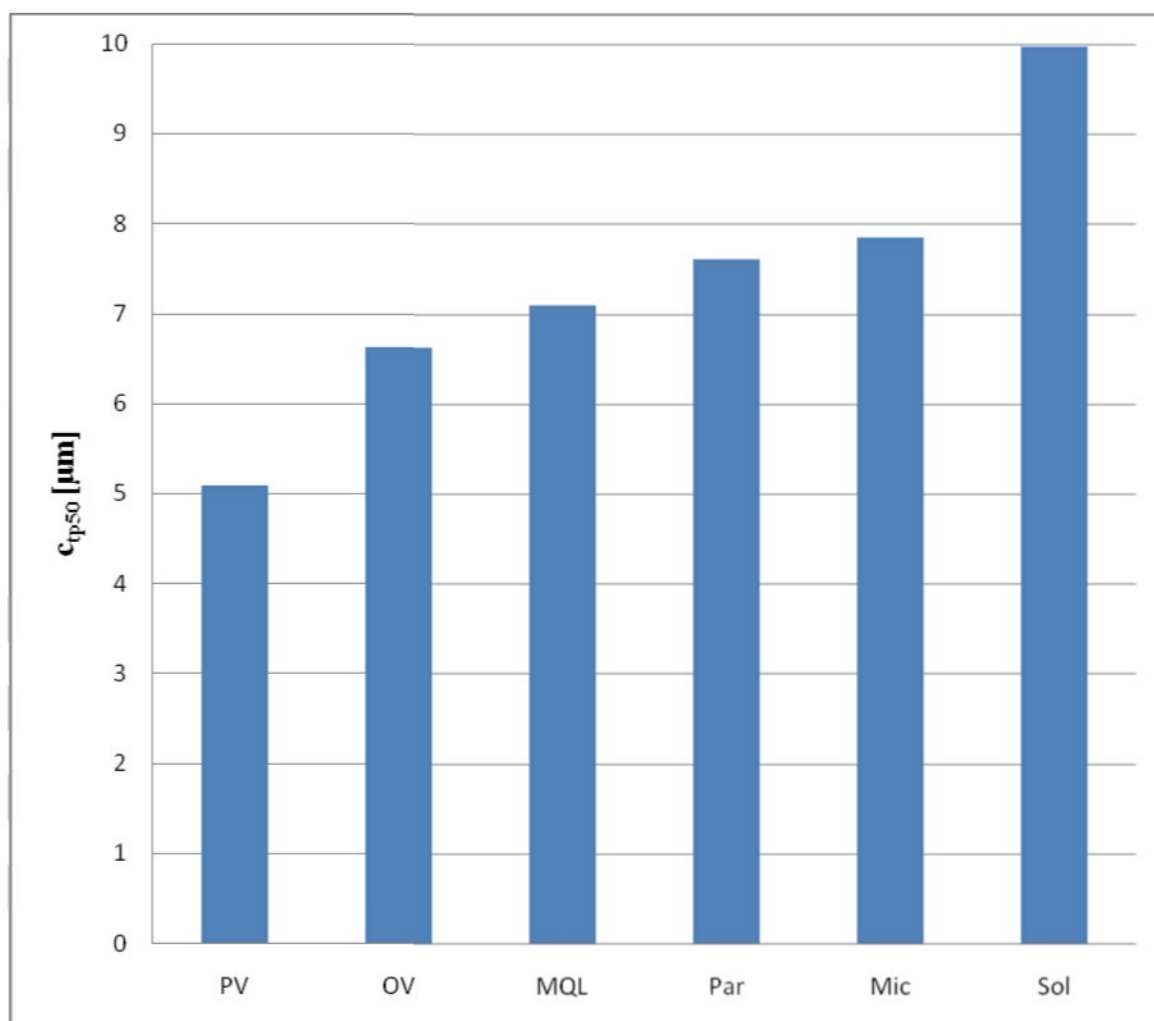
Frézování s posuvem 0,6 mm/ot. a s hloubkou záběru 3,5 mm

Média	c_{tp50} [μm]
Podchlazený vzduch na 4°C	5,43
Paramo SK 300	5,06
Accu-Lube LB 2000	4,91
Microcool 387+	4,80
Okolní vzduch	4,38
Solgreen 540	4,23

Tab. 2. Experiment 2 - hodnoty parametru c_{tp50} Graf 2. Parametr c_{tp50} obrobků frézovaných v různých procesních médiích

Frézování s posuvem 1,5 mm/ot. a s hloubkou záběru 2 mm

Média	c_{tp50} [μm]
Solgreen 540	9,97
Microcool 387+	7,85
Paramo SK 300	7,60
Accu-Lube LB 2000	7,09
Okolní vzduch	6,63
Podchlazený vzduch na 4°C	5,09

Tab. 3. Experiment 2 - hodnoty parametru c_{tp50} Graf 4. Parametr c_{tp50} obrobků frézovaných v různých procesních médiích

Obráběný materiál	Ocel 12 050.1 (C45+N)				
Rozměry polotovaru	70 x 15 x 6000 [mm]				
Stroj	Frézka FNG 32				
Způsob obrábění	Čelní frézování				
Nástroj	Břitová destička		SPEW 1204ADSN		
	Čelní pětibřitá fréza Φ 80 mm				
Řezná rychlost	135,4	[m/min]			
Otáčky vřetene	540	[ot ⁻¹]			
Experiment 1	Posuv	0,6	[mm/ot.];	hloubka záběru	1 [mm]
Experiment 2	Posuv	0,6	[mm/ot.];	hloubka záběru	3,5 [mm]
Experiment 3 (5)	Posuv	1,5	[mm/ot.];	hloubka záběru	1 [mm]
Experiment 4	Posuv	1,5	[mm/ot.];	hloubka záběru	2 [mm]
Řezné prostředí	Solgreen 540 Microcool 387+ Paramo SK 300 Accu – Lube LB 2000 (přívod MQL) Okolní vzduch Podchlazený vzduch o teplotě 4°C				
Metoda přívodu procesního média	Tryska chladicího systému stroje	225	[l/hod]		
	Tryska pro metodu přívodu MQL	0,5	[l/hod]		
	Chlazení vzduchem				
Měřené parametry	Řezná síla	F_c	[N]		
	Posuvová síla	F_f	[N]		
	Přísuvová síla	F_p	[N]		
	Drsnost povrchu	Ra, Rt, Rz	[μm]		
	Nosný podíl profilu	Abbottova křivka c_{tp50}	[μm]		
	Zbytkové napětí v povrchu	σ	[MPa]		
Měřicí přístroje	Řezná síla	Dynamometr Kistler			
	Drsnost povrchu	Profiloměr MITUTOYO			
	Zbytkové napětí	Rentgenový difraktometr			

This precision dosing machine
developed for the cutting lubrication
Warning: The use of other cutting
cause irreparable damages and
complete lapse of any legal claim to



Mikromazací Systémy

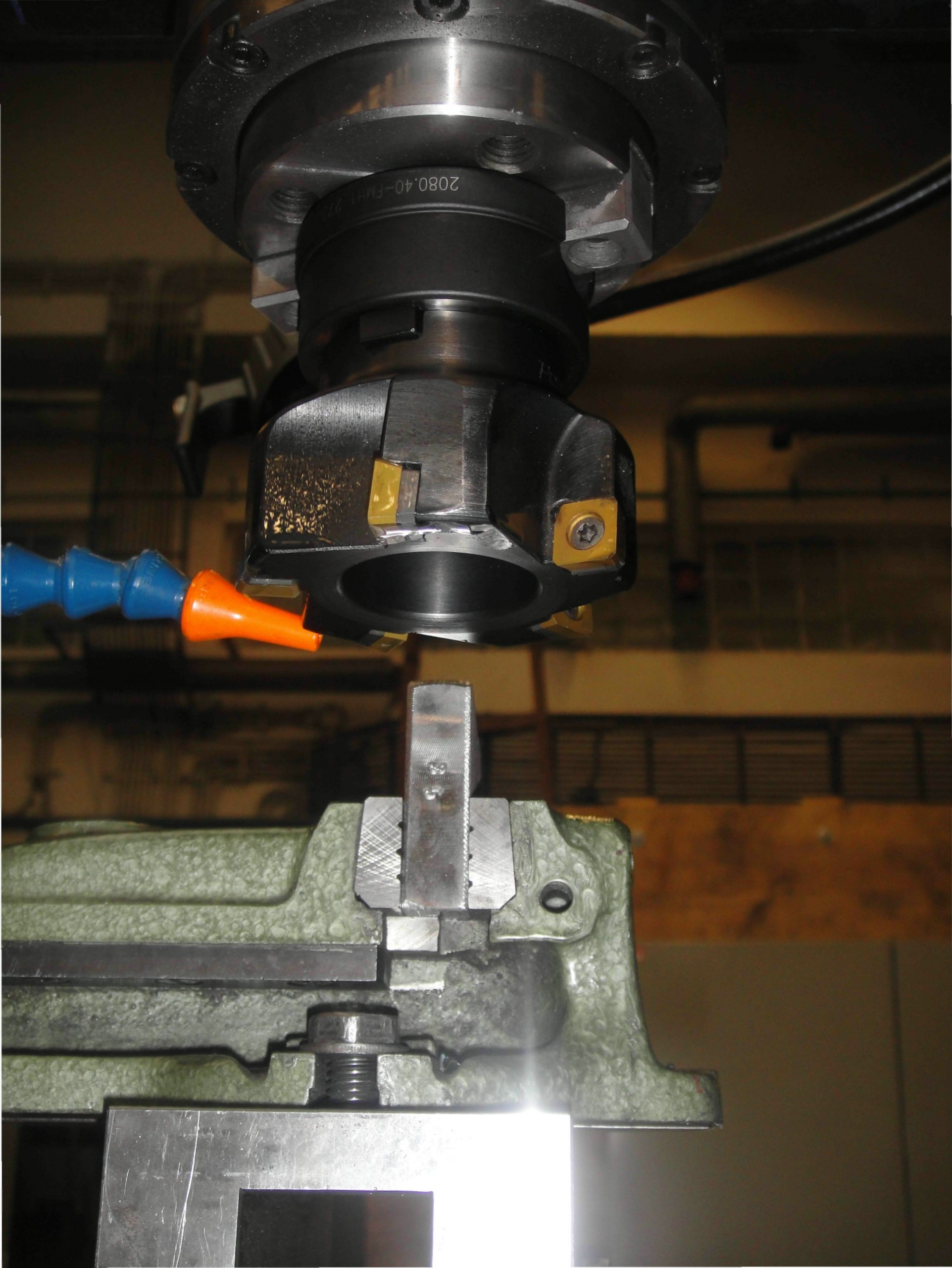


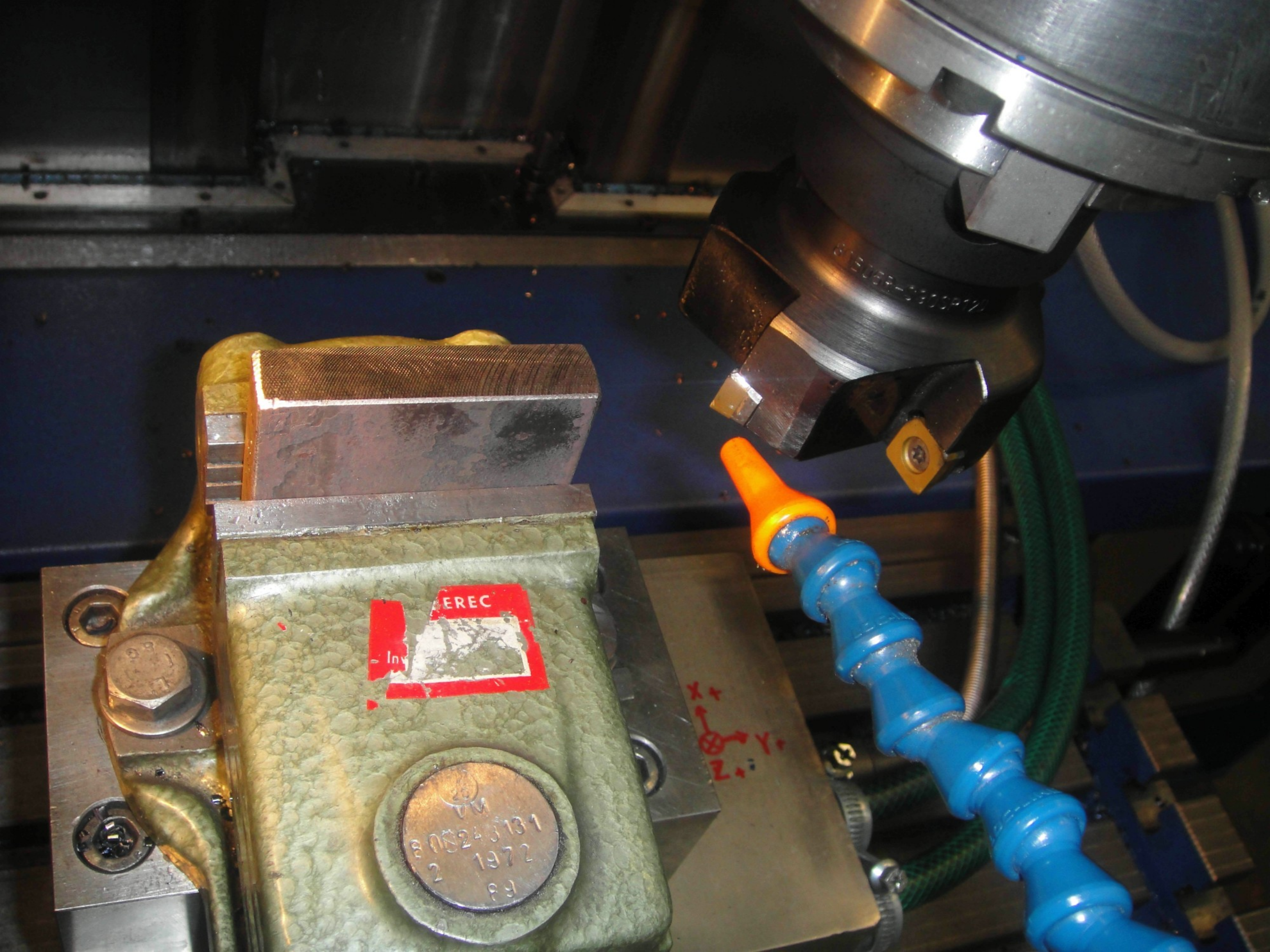
Accu-Lite
PRECISION-APPLICATOR

Mikromazací Systémy

TOS
OLOMOUK

TOS
OLOMOUK



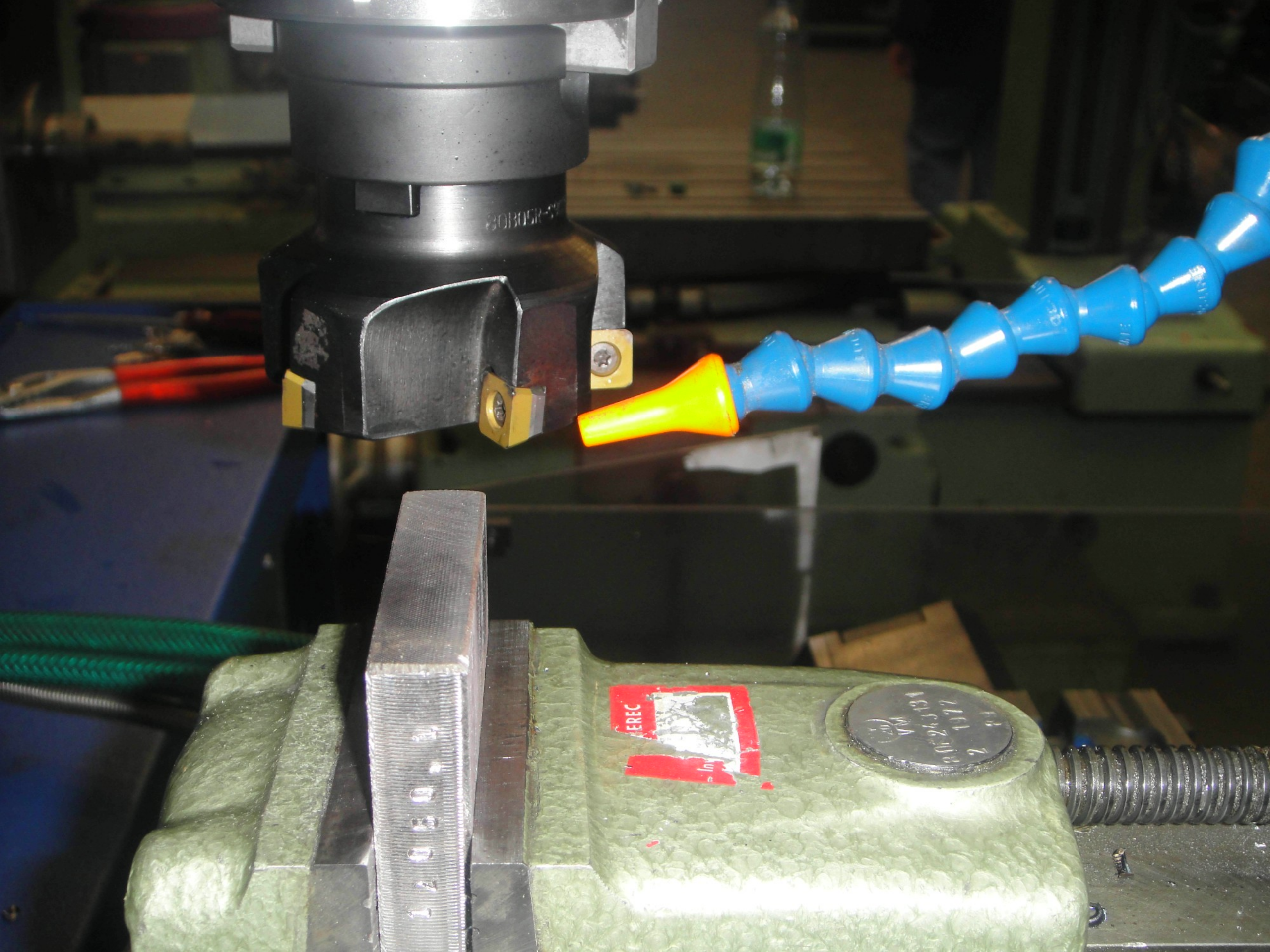


815062-03009120

REC
Inv

VM
808243131
2 1972
P9

X+
Y+
Z+











PRAMET









035036
3K00060

CE
Mod. 100/40/001 HERKULES
Cod. 8119500AFA016

TU v. Libero
DM 30/24/32

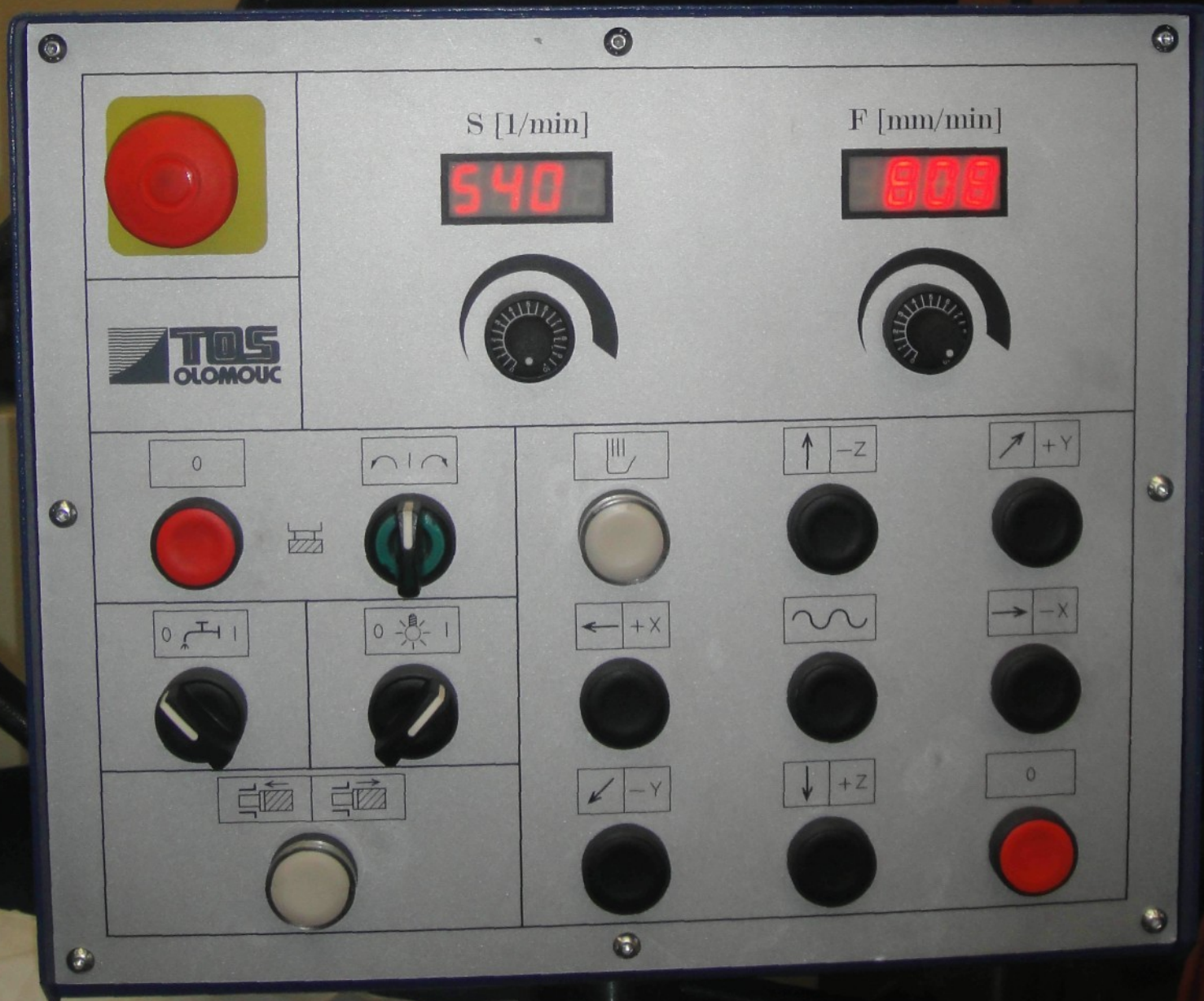
HERKULES



450/10/50

Höchstzahl
verdichter. 2700 min⁻¹
Betriebsdruck max. 10 bar
Druck max. 11 bar
Gewicht 44 kg
Kesselinhalt 50 l
Motorleistung 2,2 kW / 3Hp
Nennspannung 1/1/PE AC
230 V / 50 Hz
Stromaufnahme 11 A
Kondensator 70 micro F
Isolierklasse B
cos φ 0,85
S3/25%



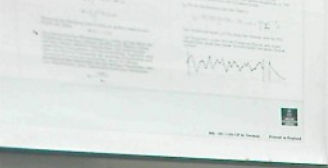






Rank Taylor Hobson Limited

Rank Tay





X'Pert PRO

PANalytical

SAFETY ON SAFETY OFF







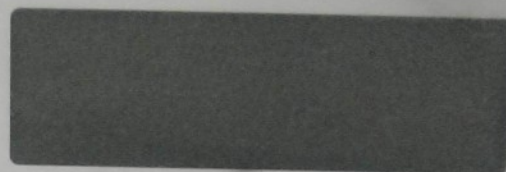
Multichannel Charge Amplifier

	Channel 1	2	3	4
Error	●	●	●	●
Filter On (Low-Pass)	●	●	●	●
Time Constant	● Long ● Short ● Medium	●	●	●
Operate	●	●	●	●

Four white rectangular buttons are located below the indicator lights for each channel.

KISTLER

Controller



TS Transducer Sensitivity [pC/Mechanical Unit]
SC Scale [Mechanical Units/V]
LP Filter [Low-Pass]
TC Time Constant [High-Pass Filter]

Operate (Red button), Reset (Black button), Remote (Black button with red dot), Local (Black button), LCD Contrast (Slider), Illum (Black button), Menu (Blue button), Set all Channel (Green button), Select (Black button with up arrow), Select (Black button with down arrow), Cursor (Black button with left arrow), Lock (Black button), Edit (Black button with right arrow), Edit (Black button with down arrow).

Power

Type 5019