



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

Diplomová práce

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



Prohlášení

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

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

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

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

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

Datum:

Podpis:

Účinek procesních plynů a kapalin na technologii broušení a kvalitu obrobených součástí

ANOTACE:

Diplomová práce porovnává naměřené hodnoty při technologii broušení s využitím procesních plynů, kapalin a bez použití média. Veličiny hodnocené v rámci projektu jsou řezná síla, teplota obrobku, drsnost povrchu a šířka drážky po broušení.

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

ANNOTATION:

This thesis compares the measured value at grinding technology with the use of process gases, liquids, and without the use of media. Variables evaluated in the project are cutting force, temperature of the workpiece, surface roughness and the width of the groove after grinding.

Klíčová slova: BROUŠENÍ, PROCESNÍ PLYNY A KAPALINY, OBRÁBĚNÍ

Key works: GRINDING, PROCESS GASES AND LIQUIDS, MACHINING

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: květen 2015

Archivní označ. zprávy:

Počet stran: 77

Počet příloh: 1

Počet obrázků: 42

Počet tabulek: 20

Počet grafů: 10

Poděkování:

Tímto bych moc rád poděkoval mé vedoucí diplomové práce, paní Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. za poskytnutí cenných rad a důležitých informací, které mi pomohly k vypracování diplomové práce.

Dále děkuji panu Ing. Miloslavovi Ledvinovi za poskytnuté rady v průběhu řešení a za pomoc při experimentálním měření v dílnách katedry KOM.

Obsah

Seznam použitých zkratk	8
Úvod	9
1 Teorie broušení	10
1.1 Základní charakteristika procesu broušení	10
1.1.1 Způsoby broušení	10
1.1.2 Broušící nástroje	11
1.1.3 Upínání broušícího kotouče	16
1.1.4 Vyvažování broušícího kotouče	17
1.1.5 Orovnávání broušícího kotouče	18
1.1.6 Řezné síly a podmínky při broušení	19
1.1.7 Tepelné jevy při broušení	21
1.2 Procesní kapaliny jako řezné médium	22
1.2.1 Úvod k procesním kapalinám	22
1.2.2 Rozdělení procesních kapalin a jejich vlastnosti	23
1.2.3 Vliv procesní kapaliny při broušení	24
1.2.4 Přívod procesní kapaliny do místa řezu	25
1.3 Plynné látky jako řezné médium	25
1.3.1 Obrábění bez chlazení (atmosférický vzduch)	26
1.3.2 Obrábění s využitím podchlazeného vzduchu	26
1.3.3 Obrábění pomocí oxidu uhličitého	28
1.3.4 Obrábění s využitím zkapalněného dusíku	29
2 Popis strojů a použitých měřicích zařízení	32
2.1 Bruska BPH 320 A	32
2.2 Frézka FNG 32	33
2.3 Dynamometr KISTLER, typ 9265B	34
2.4 Profiloměr Mitutoyo Surf-test SV - 2000 N2	35
2.5 Digitální posuvné měřítko	36
2.6 Ruční refraktometr RLC	37
2.7 Elektročerpadlo 2CPP1 - 17H	37
2.8 Elektrické přečerpávací zařízení EPZ - 2	38
2.9 Vírová trubice	38
2.10 Řídící jednotka na CO ₂	39

3	Experimentální část.....	40
3.1	Příprava zkušebních vzorků.....	40
3.2	Metodika hodnocení plynů a kapalin pro řezné podmínky	42
3.2.1	Řezné prostředí pro experimentální měření	42
3.2.2	Řezné podmínky broušení	43
3.2.3	Měřicí parametr - řezná síla	44
3.2.4	Měřicí parametr - teplota obrobku	44
3.2.5	Měřicí parametr - drsnost povrchu	46
3.2.6	Měřicí parametr - rozměrová přesnost	46
3.3	Vlastní měření.....	47
3.3.1	Měření řezných sil.....	47
3.3.2	Měření teploty obrobku.....	51
3.3.3	Měření drsnosti povrchu.....	55
3.3.4	Měření rozměrové přesnosti.....	59
4	Ekonomické vyhodnocení použitých procesních médií	62
4.1	Fixní náklady (vstupní).....	62
4.2	Provozní náklady	63
5	Diskuze výsledků.....	70
	Závěr.....	73
	Použitá literatura.....	76
	Seznam příloh.....	77

Seznam použitých zkratk

a_d	[mm]	radiální záběr orovnávacího nástroje
a_p	[mm]	hloubka záběru
b	[mm]	šířka broušícího kotouče
b_d	[mm]	činná šířka orovnávacího nástroje
$\varnothing d_s$	[mm]	průměr broušícího kotouče
$e_{VT, CO_2, DUSÍK, EOPS, HOCUT}$		spotřeba elektrické energie pro všechny média (Kč)
f	[mm.min ⁻¹]	posuv
F_c	[N]	řezná síla
F_{cN}	[N]	kolmá řezná síla
LAN		Local Area Network - lokální (místní) síť
L_{kap}	[Kč]	ekologická likvidace kapalin
$m_{CO_2, DUSÍK, EOPS, HOCUT}$		roční spotřeba procesního média (kg)
M_K	[N.m]	krouticí moment
MQL		minimum quantity liquid
n	[ks/rok]	počet kusů vyrobených za rok
n_1	[ks/den]	počet kusů vyrobených za den
$N_{CO_2, DUSÍK, EOPS, HOCUT}$		provozní náklady na procesní média (Kč)
n_s	[ot.min ⁻¹]	otáčky broušícího kotouče
$P_{CO_2, DUSÍK}$		počet plnění lahví
P_{ef}	[W]	efektivní výkon
Q_c	[J]	celkové teplo
s_d	[mm]	posuv orovnávacího nástroje připadající na jednu otáčku orovnávaného kotouče
t_1	[s]	čas výroby jednoho kusu
v_c	[m.s ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[m.min ⁻¹]	rychlost posuvu

Úvod

Obsahem diplomové práce je výzkum vlivu chlazení kapalnou a plynnou látkou na obráběcí soustavu, resp. výsledek obráběcího procesu, při technologii broušení. Jednou z důležitých částí tohoto výzkumu je porovnání výsledků experimentálních měření sledovaných vlivů mezi procesními kapalinami a plyny.

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

Jako kapalná média byly zvoleny kapaliny EOPS 1030 od společnosti PARAMO, a.s. a HOCUT 795 B od firmy Houghton CZ s.r.o.

Jako plynné média byly zvoleny atmosférický vzduch (obrábění bez chlazení), podchlazený stlačený vzduch vyvinutý zařízením Cold Air Gun od společnosti ITW Vortec, stlačený CO₂ a zkapalněný dusík dodávaný společností Linde Gas a. s.

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

V rámci teoretické části je popsána základní teorie broušení s návazností na teoretické vlastnosti procesních kapalin a plynů.

Další část diplomové práce je věnována popisu použitých strojů a měřících zařízení potřebných k experimentálnímu měření.

V části experimentální se nejprve popisuje postup přípravy vzorků pro měření, dále je zde popsána metodika experimentálního měření. Naměřené hodnoty měřených parametrů byly pak následně zapsány do tabulek a grafů pro jednotlivá procesní média u technologie broušení.

Závěrečná část je tvořena dosaženými výsledky aplikovaného výzkumu včetně diskuze a porovnání všech naměřených hodnot z hlediska zkoumaných parametrů a ekonomických nákladů.

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

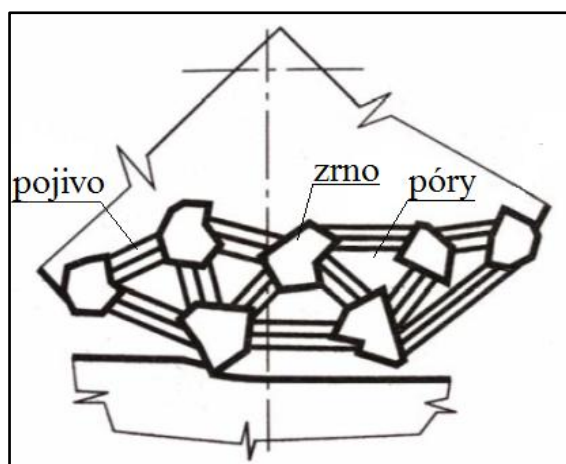
Projekt řeší aktuální problematiku přesného dynamického řízení tepelných procesů ve výrobních nástrojích. Inovativní temperační technologie je založena na využití vysokého chladicího potenciálu zkapalněných technických plynů, cíleně nasměrovaných do kriticky tepelně zatěžovaných oblastí výrobních nástrojů tak, aby bylo dosaženo účinného odvodu tepla z výrobku a nástroje v co nejkratším čase s příznivým dopadem na kvalitu a ekonomičnost výroby.

1 Teorie broušení

1.1 Základní charakteristika procesu broušení

Broušení je proces obrábění, který se uskutečňuje brousicím kotoučem, jehož pracovní povrch je tvořen velkým množstvím geometricky neurčitých břitů, představovaných aktivními brusnými zrny. Tato zrna jsou vázána pojivovými můstky o neznámé pevnosti, které tvoří brousicí nástroje, převážně brousicí kotouče (obr. 1). Jejich pracovní činnost se charakterizuje jako hromadné, rychlé a intenzivní rytí povrchu obrobku s cílem produktivně a přesně odebrat daný přírůstek na obrábění. Pro broušení jsou typické velmi negativní úhly čela brusných zrn jako elementárních nástrojů a jejich břitů a to až k hodnotám 90° . Rovněž rezné rychlosti jsou oproti ostatním způsobům obrábění relativně velmi vysoké [1].

Tento proces probíhá při značných rychlostech, nejčastěji v rozsahu $30 - 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a ve zvláštních případech až do $120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Broušení je dokončovací operace, kterou se dosahuje velké přesnosti obrábění. Současně se broušení používá i při předběžném obrábění polotovarů - čištění odlitků, výkovků apod. [2].



Obr. 1 Schéma brousicího kotouče [2].

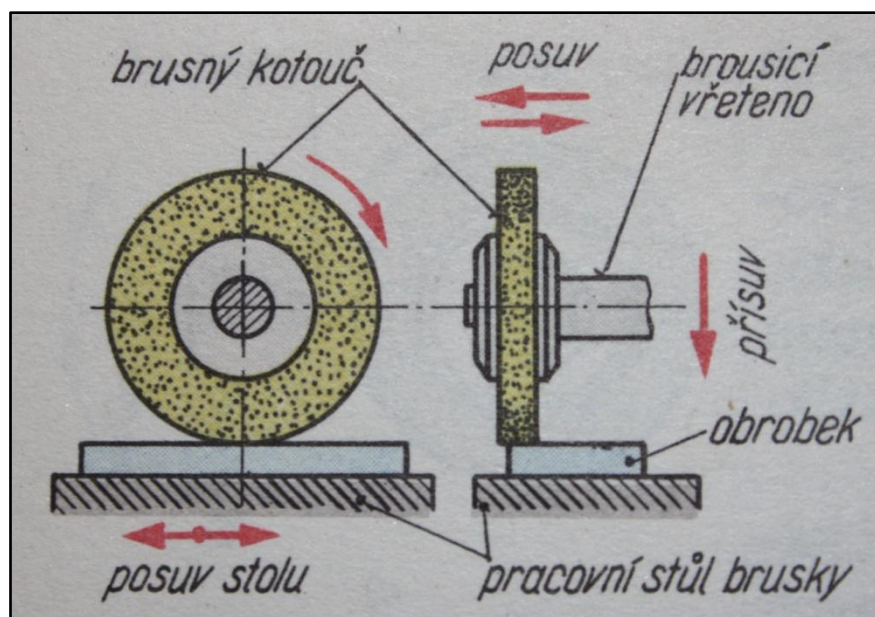
1.1.1 Způsoby broušení

Broušení lze rozdělit podle typu brousicího nástroje:

- vázaným pevným brusivem (zrna brusiva jsou spojena pojivem do tvaru kotouče či brousicího tělesa),
- volným brusivem (zrna brusiva nejsou nijak spojena, jsou ve formě prášku pro broušení kapalinou, ultrazvukem).

Rozdělení z hlediska tvaru broušených ploch a způsobu práce:

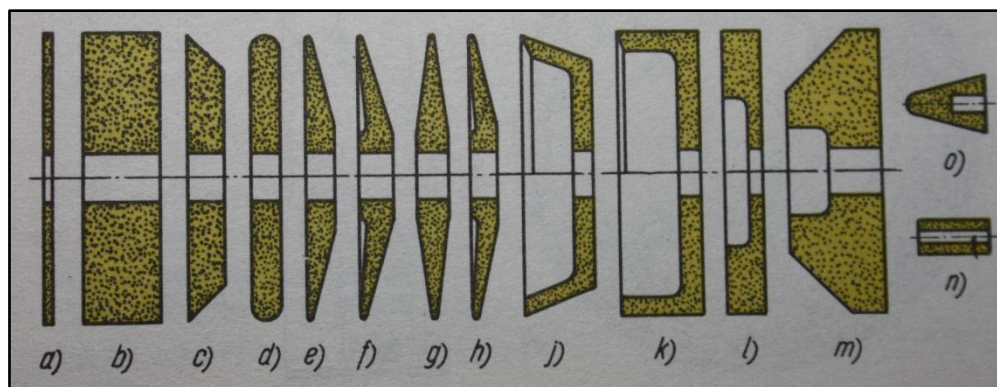
- broušení rotačních ploch vnějších: - axiální (s podélným posuvem),
 - axiální hloubkové,
 - zápichové,
 - bezhrotové (zápichové nebo axiální),
- broušení rotačních ploch vnitřních: - axiální (s podélným posuvem),
 - zápichové,
 - planetové,
 - bezhrotové,
- broušení rovinných ploch: - obvodem kotouče,
 - čelem kotouče,
- broušení tvarových ploch: - tvarovými kotouči,
 - kopírovacím způsobem,
 - na NC a CNC broušicích centrech [2].



Obr. 2 Princip rovinného broušení obvodem kotouče [4].

1.1.2 Broušící nástroje

Nástroje pro standardní broušení jsou broušící kotouče, segmenty a tělíska různých tvarů a rozměrů. Tvary těchto nástrojů jsou normalizovány a nejběžnější jsou uvedeny na obr. 3. (Kotouče tvaru „a“ slouží k probušování materiálu, „b“ ke srovnávání ploch a k normálnímu broušení ploch rovinných i válcových, „c“ až „k“ k ostření nástrojů, „k“ a „l“ k broušení rovinných ploch, „m“ k broušení kuželových ploch, „n“ a „o“ k vnitřnímu broušení).



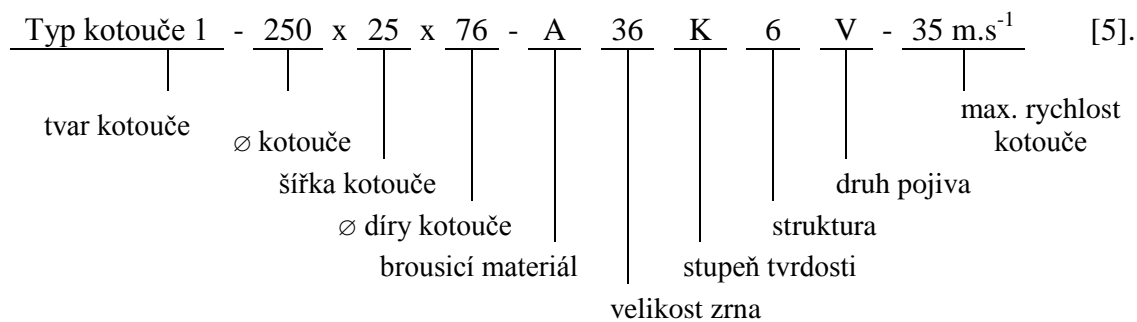
Obr. 3 Základní tvary brousicích kotoučů [4]

Vlastnosti brousicího nástroje se určují podle typu operace. Rozsáhlý sortiment nástrojů dává široké možnosti výběru. [3]

Podle normy ČSN ISO 525 (22 4503), dříve značené ČSN 22 4501, označujeme brusné kotouče soustavou čísel a písmen, která jednoznačně určují jeho druh a jakost:

- druh brousicího materiálu,
- zrnitost brousicího materiálu,
- tvrdost,
- struktura nástroje,
- druh pojiva,
- rozměry kotouče a maximální pracovní rychlost kotouče [2].

Příklad označení:



Brousicí materiál

Podle druhu a původu lze rozdělit používané brusivo na přírodní a umělé.

- Mezi přírodní brusivo patří:
- diamant,
 - křemičitý písek,
 - pískovec,
 - přírodní korund,
 - smirek,
 - pazourek,
 - granát aj.

V současné době se vzhledem k výhodnějším vlastnostem (tvrdší a houževnatější oproti přírodním), používají brusiva umělá [2].

Uměle vyráběná brusiva:

- Al_2O_3 - umělý korund (elektrit) - ozn. A (hnědý, bílý, růžový, zirkonový),
- pro broušení oceli, litiny, tvrdé bronzy,
- SiC - karbid křemíku (karborundum) - ozn. C (černý, zelený),
- vyšší tvrdost oproti umělému korundu,
- pro broušení litiny, slinutých karbidů, slitiny mědi a hliníku, skla a keramiky,
- B_4C - karbid bóru - ozn. B,
- tvrdost téměř jako diamant,
- pro broušení SiC , drahých kamenů, náhrada diamantu,
- CBN - kubický nitrid bóru - ozn. CBN,
- teplotní stálost do 1 400 °C,
- produktivní broušení oceli a litin - nereaguje s Fe,
- Diamant- syntetický diamant - ozn. D,
- křehký, nesnáší teplotní rázy, hoří při teplotách nad 750 °C,
- broušení jiných brousících kotoučů, leštící a lapovací pasty [5].

Tab. 1 Tvrdosti jednotlivých brusiv [5].

Brusivo a chemický vzorec	Mikrotvrdost HM [10 ³ MPa]	Knoopova tvrdost	Teplotní odolnost [°C]
Diamant C	86 - 100	5600	max. 720
Kubický nitrid bóru (Elbor) BN	80 - 95	4700	1400 - 1700
Karbid bóru B_4C	40 - 45	2250	700 - 800
Karbid křemíku (karborundum) SiC	33 - 36	2100	1300 - 1450
Umělý korund (elektrokound) Al_2O_3	22 - 24	1620	1700 - 1800

Zrnitost brusiva

- zrnitost neboli velikost zrn, je označena číslem,
- dle ČSN ISO 525 číslo udává počet ok síta na délce 1 anglického palce (25,4 mm), kterými zrna dané velikosti ještě propadla,
- zrna brusiva se vyrábějí z krystalových drůz vyjmutých z pece, následně se očistí, drtí a třídí na korekčních sítích, případně se třídí sedimentací,
- velikost zrn významně ovlivňuje finální drsnost povrchu broušeného obrobku [5].

Tab. 2 Zrnitost - porovnání označení dle ČSN 22 4501 a ČSN ISO 525[5].

Zrnitost	Označení	
	ČSN 22 4501	ČSN ISO 525 (22 4503)
velmi hrubá	250, 200, 160	není
hrubá	125, 100, 80, 63	4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 22, 24
střední	50, 40, 32, 25	30, 36, 40, 46, 54, 60
jemná	20, 16, 12, 10	70, 80, 90, 100, 120, 150, 180
velmi jemná	8, 6, 5	220, 240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200
zvlášť jemná	4, 3, M32, M22, M15	není

Tvrdość brusiva

- tvrdost nástroje je dána odporem, který klade pojivo proti vylomení zrna brusiva,
- tvrdost označujeme písmenem od A do Y,
- tvrdost určujeme dle: - materiálu obrobku,
- způsobu obrábění,
- PRAVIDLO: čím vyšší je tvrdost obrobku a větší plocha styku nástroje s obrobkem, tím volíme tvrdost brousícího kotouče menší [5].

Tab. 3 Tvrdość - porovnání označení dle ČSN 22 4501 a ČSN ISO 525 [5].

Tvrdość	Označení	
	ČSN 22 4501	ČSN ISO 525 (22 4503)
velmi měkký	G, H	není
měkký	I, J, K	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K
střední	L, M, N, O	L, M, N, O, P, Q
tvrdý	P, Q, R, S	R, S, T, U, V, W, X, Y
velmi tvrdý	T, U	není
zvlášť tvrdý	V, W, Z	

Sloh (struktura)

- sloh (struktura) charakterizuje poměr zrn brusiva, pojiva a pórů,
- označuje se číslem, které vyjadřuje podíl pórů v procentech od 1 - 13,
- sloh se ovlivňuje přísadami v pojivu při výrobě brousících kotoučů,
- použití brousících kotoučů z hlediska slohu:
 - a) hutný - pro obrobky hladké, tvrdé a křehké,
- při broušení s malou styčnou plochou mezi nástrojem a obrobkem,
 - b) pórovitý - pro obrobky houževnaté,
- při broušení s velkou styčnou plochou mezi nástrojem a obrobkem,

- c) zvláště pórovitý - zajišťují přívod zvýšeného množství procesní kapaliny do místa záběru a dobré podmínky pro utváření třísek,
- při broušení obrobků, které se při broušení nesmí příliš zahřát [5].

Tab. 4 Sloh (struktura) - porovnání označení dle ČSN 22 4501 a ČSN ISO 525 [5].

Struktura	Označení	
	ČSN 22 4501	ČSN ISO 525 (22 4503)
velmi hutný	1, 2	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, atd.
hutný	3, 4	
polohutný	5, 6	
pórovitý	7, 8	
velmi pórovitý	9, 10	
zvlášť pórovitý	11, 12, 13	

Druh pojiva

- pojivo zajišťuje požadovaný tvar nástroje a významným způsobem ovlivňuje jeho vlastnosti,
- pojivo spojuje zrna brusiva tak, aby docházelo k uvolňování zrn opotřebovaných a otupených, čímž je zajištěno, že se do záběru dostávají zrna nová a ostrá - tento mechanismus nazýváme samo ostřicí schopnost brousícího nástroje,
- pojivo nezajišťuje úběr materiálu obrobku.

Rozdělení pojiv:

- organická: - umělá pryskyřice,
 - pryž,
 - šelak,
 - klič,
- anorganická: - keramické,
 - silikátové,
 - magnezitové,
- kovová: - pro brousící kotouče ze super tvrdých brusiv [5].

Tab. 5 Pojivo - porovnání označení dle ČSN 22 4501 a ČSN ISO 525 [5].

Pojivo	Označení	
	ČSN 22 4501	ČSN ISO 525 (22 4503)
keramické	V	V
silikátové	S	není
pryžové	R	R
pryžové s výztuží	RF	RF
umělá pryskyřice	B	B
umělá pryskyřice s výztuží	BF, BF - Flex	BF
šelakové	E	E
magnezitové	Mg	Mg
polyuretanové	U	není

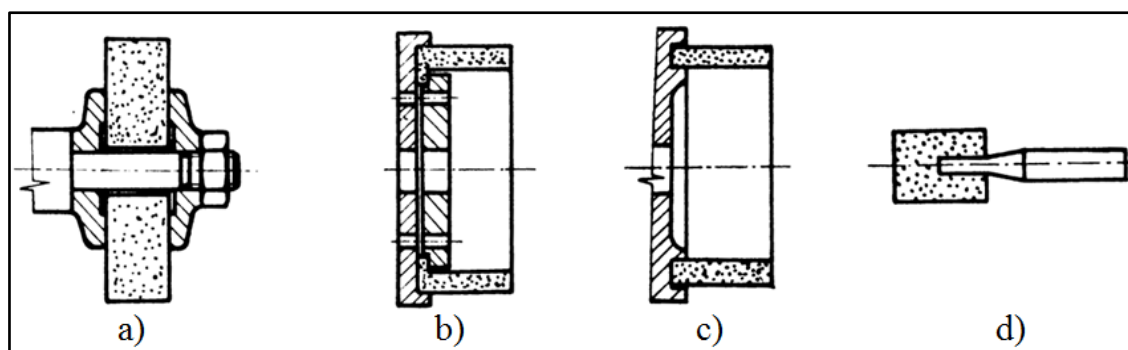
1.1.3 Upínání brousícího kotouče

Před upnutím brousícího kotouče nasuneme na trn malého průměru a zkontrolujeme poklepem dřevěnou paličkou - tón musí být čistý,

- nejasný, křuplavý tón signalizuje vadný brousící kotouč, který se nesmí použít pro broušení,

Brousící kotouče se upínají:- mechanicky s pomocí přírub (a,b),

- přitmělením (c,d).



Obr. 4 Příklady upnutí brousícího kotouče [5]

Mezi otvorem v kotouči a tělesem příruby musí být určitá přiměřená vůle, aby bylo možné kotouč lehce nasunout, nesmí nastat situace, aby bylo uložení excentrické.

Jelikož je brousící kotouč křehký, vkládají se mezi kovovou přírubu a kotouč podložky z pryže, kůže nebo silného papíru tloušťky 0,5 - 2 mm.

Před vlastním broušením se brousící kotouč nechává běžet tzv. „na prázdno“, cca po dobu 5-ti minut [5].

1.1.4 Vyvažování brousicího kotouče

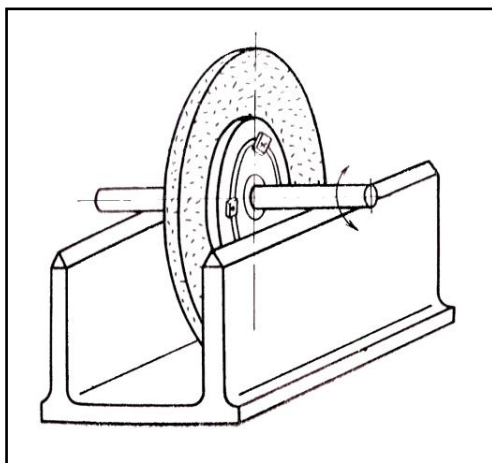
Brousicí kotouč musí být bezvadně vyvážen, tzn., hmota nástroje musí být rovnoměrně rozdělena tak, aby těžiště rotujícího kotouče bylo přesně v ose vřetená.

Vyvážený brousicí kotouč zabraňuje vzniku chvění, a tak umožňuje dosáhnout požadované kvality povrchu u broušené součásti, dále zabraňuje namáhání/poškození ložisek vřetená.

U nevyváženého brousicího kotouče mohou odstředivé síly při velkých otáčkách vřetená vést až k roztržení nástroje [5].

Typy vyvažování brousicích kotoučů: - statické,
- dynamické.

- Statické vyvažování: - vyvažování pomocí tělísek, které se přidělávají na přírubu po jeho obvodu, tak aby těžiště kotouče byla v ose,
- takto vyvážený kotouč zůstane na vyvažovacím stojánku v klidu při jakémkoli pootočení (viz obr. 5),
 - pokud není kotouč dobře vyvážen, pak se díky gravitačním silám soustava ustálí v takové poloze, kdy se těžiště soustavy nachází pod osou otáčení soustavy, tzn., projeví se stav nevyváženosti.



Obr. 5 Statické vyvažování brousicího kotouče [2].

- Dynamické vyvažování: - použití pro přesné broušení a pro obvodové rychlosti nad $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- vyvažování probíhá automaticky u otáčejícího se brousicího kotouče pomocí dynamické vyvažovací jednotky [5].

1.1.5 Orovnávání broušícího kotouče

Geometrie a tvar broušícího kotouče významně ovlivňují velikost řezné síly a dosahovanou jakost povrchu obráběných strojních součástí.

Orovnávání je jemné obrobení povrchu broušícího kotouče, kdy se jednotlivá zrna brusiva:

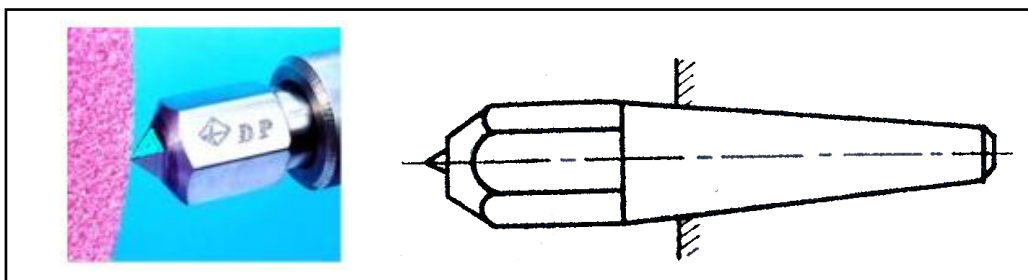
- vylamují,
- tříští,
- přefezávají.

Orovnávání broušících kotoučů plní několik velmi důležitých funkcí v procesu broušení:

- obnovení tvaru broušícího kotouče,
- odstranění třísek, které ulpěly mezi zrna brusiva na povrchu broušícího kotouče,
- obnovení řezivosti broušícího kotouče a zajištění požadované jakosti povrchu obrobku.

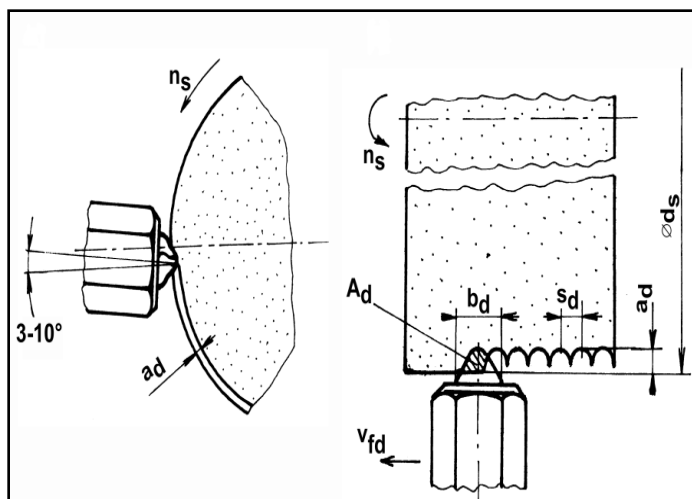
Základní druhy orovnávačů:

- diamantové - nejčastěji používané, pro přesné orovnání,
- bezdiamantové - zejména pro méně přesné orovnávání, příp. speciální případy orovnávání [5].



Obr. 6 Jednokamenový diamantový orovnávač [2].

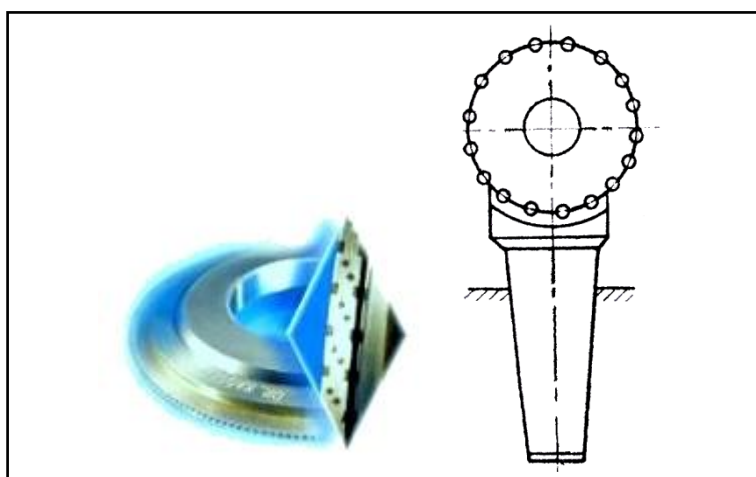
Přesnost nastavení, především při opakovaném obrábění stejných brusných kotoučů, závisí obzvláště na zručnosti a pečlivosti obsluhy [2].



Osa upínací části musí směřovat 3°-10° pod osu brousícího kotouče,
 a_d ...radiální záběr orovnávacího nástroje,
 b_d ...činná šířka orovnávacího nástroje,
 $\varnothing d_s$...průměr brousícího kotouče,
 n_s ...otáčky brousícího kotouče,
 s_d ...posuv orovnávacího nástroje připadající na jednu otáčku orovnávaného kotouče.

Obr. 7 Poloha orovnávače vůči kotouči a záběrové podmínky při orovnávání [5].

Pro finální orovnávání brousících kotoučů i složitých tvarů. Diamant je křehký, tzn., nesnáší rázy a tepelné šoky (doporučeno chlazení) [5].



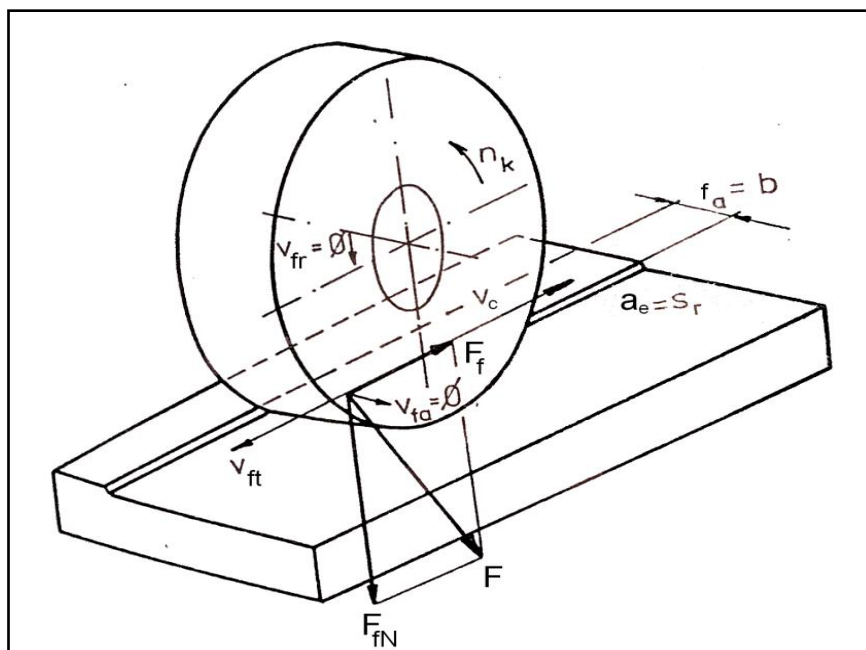
Obr. 8 Několikakamenový rotační diamantový orovnávač [2].

1.1.6 Řezné síly a podmínky při broušení

Při procesu broušení nelze vypočítat velikost působících sil se stejnou přesností jako při obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu a tvarem třísky. Příčinou jsou specifické znaky brousících nástrojů a obtížně určitelný počet zrn v záběru.

Řezné síly

Velikost řezných sil při broušení závisí nejen na způsobu broušení a na nastavených řezných podmínkách (průřezu třísky), ale i na zrnitosti brusiva, druhu a tvrdosti pojiva a struktuře kotouče. Závisí také velmi výrazně na způsobu orovnáání a okamžitém stavu funkční plochy kotouče. Při opotřebení kotouče může vzrůst řezná síla až o několik set procent [2].



Obr. 9 Síly vznikající při rovinném způsobu broušení [2].

Řezné síly se mohou stanovit dvojím způsobem, měřením nebo výpočtem. Pokud se podaří určit působící řezné síly, pak lze početně stanovit velikost kroutícího momentu M_k a výkon P_{ef} potřebný pro obrábění. Tyto údaje lze následně použít pro pevnostní výpočet elementů technologické soustavy [2].

Řezné podmínky

Přesnost rozměrů a jakost obrobené plochy je při obrábění ovlivněna řadou parametrů řezného procesu, zejména řeznými podmínkami, obráběným materiálem, tuhostí a pevností systému stroj - nástroj - obrobek - přípravek a řezným prostředím.

Působení zrn brusiva na materiál obrobku při rovinném broušení obvodem kotouče je srovnatelné s válcovým frézováním, protože břity brousícího kotouče odebírají materiál podobně, jako zuby válcové frézy.

Hlavní řezný pohyb koná nástroj (brousící kotouč):

- řezná rychlost $v_c = 30 - 120$ [m.s⁻¹].

Vedlejší řezné pohyby:

a) podélný = posuv (koná obrobek),

- rychlost posuvu $v_f = 8 - 18$ [m.min⁻¹],

b) příčný = přísuv (zpravidla přerušovaný koná obrobek),

- hloubka záběru $a_e = 0,005 - 0,04$ [mm].

Při nahlédnutí do technologického postupu pro broušení zpravidla zjistíme, že obsahuje jen minimum informací, které technolog poskytuje brusiči. Volbu řezných podmínek tedy provádí brusič [1].

1.1.7 Tepelné jevy při broušení

Proces broušení doprovází značný vývoj tepla v místě tvoření třísky. Tím vzniká ohřev kontaktních vrstev broušících zrn (1000 - 1500°C), pojiva, ale i povrchové vrstvy obráběného materiálu. Minimální část mechanické energie v procesu mikrořezání se spotřebuje na přeměnu krystalické mřížky právě obráběného materiálu.

Tepelný proces v povrchové vrstvě obrobku se vyznačuje vysokou rychlostí místního ohřevu, krátkou prodlevou na této teplotě a rychlým ochlazením (zvláště při použití procesní kapaliny).

Vzniklé teplo přechází do obrobku, nástroje (broušícího kotouče), třísky, procesní kapaliny a část tepla je vyzářené do okolí [2].

Tím vznikne vztah pro celkové teplo:

$$Q_c = Q_o + Q_n + Q_t + Q_{ch} + Q_v \text{ [J]}$$

Q_o ...teplo přecházející do obrobku,

Q_n ...teplo přestupující do nástroje,

Q_t ...teplo odcházející s třískami,

Q_{ch} ...teplo odebírané procesní kapalinou nebo plynem (pokud se používá),

Q_v ...teplo vyzářené do okolí.

Největší množství tepla (až 80%) přechází při broušení do obrobku, nejmenší část tepla se ztrácí vyzářováním do okolního prostředí.

Vysoké teploty způsobují defekty povrchové vrstvy obrobku (opal nebo trhlinky) a obrobek se znehodnotí. Proto se tepelný vliv stává jedním ze základních činitelů broušení.

Možnosti ovlivnění vzniklého tepla při procesu broušení:

- vhodný typ kotouče,
- volba řezných podmínek,
- mechanické a fyzikální vlastnosti obráběného materiálu,
- správná volba procesní kapaliny nebo plynu.

Teplotu při broušení lze snížit zmenšením intenzity působení zdrojů tepla a jeho intenzivnějším odváděním [2].

1.2 Procesní kapaliny jako řezné médium

1.2.1 Úvod k procesním kapalinám

V technologii obrábění se jako procesní kapaliny používají řezné oleje nebo emulze (tj. kapaliny mísitelné vodou). Podle účinku se procesní kapaliny dělí na chladicí a mazací. Procesní kapaliny zároveň plní funkci čisticí k odstraňování třísek, a tím přispívají k zlepšení drsnosti obrobku.

Procesní kapalina snižuje teplotu obrobku, nástroje i třísky tím, že odvádí teplo z oblasti řezání. Tato schopnost kapaliny závisí na jejím měrném skupenském teple a rychlosti odpařování. Důležitou vlastností pro posouzení vhodnosti je také tepelná vodivost [6].

Chladicí účinek

Chladicím účinkem se rozumí schopnost procesní kapaliny odvádět teplo z místa řezu. Tuto schopnost má každá procesní kapalina, která smáčí povrch kovu, pokud existuje tepelný spád mezi povrchem a kapalinou. Tento jev nastává vždy při třískovém zpracování. Čím je vyšší teplota v místě řezu, tím větší jsou požadavky na odvod tepla. Neodvedené teplo se totiž může akumulovat v obrobku a vést k nepřesnosti v obrobení. Nejdůležitější je však chladicí účinek procesní kapaliny pro trvanlivost nástrojů. Velikost chladicího účinku spolurozhoduje o tom, do jak vysoko exponovaných řezných podmínek může být nástrojů využito.

Procesní kapalina přejímá vyvinuté teplo tím, že oplachuje nástroj, třísku a obrobek v oblasti řezu, a tak zajišťuje odvod tepla vzniklého při řezání. Část procesní kapaliny se přitom odpaří vlivem nadměrného místního zahřátí, zbytek pak proudí zpět do nádrže. Při zpětném toku a v nádrži se procesní kapalina opět ochlazuje předáváním tepla vzduchu a částem stroje [6].

Mazací účinek

Mazací účinek je schopnost kapaliny vytvořit na povrchu kovu přilnavou tlaku vzdornou vrstvu, zabraňující přímému styku kovových povrchů, a zajišťující tak zmenšení tření, ke kterému dochází mezi třískou a nástrojem i mezi nástrojem a obrobkem. Vzhledem k velikosti tlaků, které se objevují při řezání kovů, nemůže proto nikdy dojít ke kapalnému tření, s jakým se setkáváme při mazání strojů. Mazací schopnost kapaliny má významný vliv na zmenšení tření, tedy i na velikost řezných odporů a spotřebované energie. Zmenšení tření a rovnoměrnější rozložení tlaků se projevuje dále v plynulejším deformačním pochodu, lepším odchodem třísky a v klidnějším chodu stroje. Proto se mazací účinek projeví i v lepší jakosti obráběného povrchu. Na mazací účinek je proto kladen důraz hlavně při obrábění na čisto [6].

Čistící účinek

Důležitým úkolem procesní kapaliny je odstraňovat třísky a piliny, které při obrábění vznikají. Kovové částičky spolu s prachem z ovzduší se slepují a způsobují jednak zhoršení řezné schopnosti nástrojů (např. zanášení a zalepování brusných kotoučů, otupování řezných nástrojů), jednak poškození funkčních ploch obráběcích strojů.

Čistící účinek je nutný téměř při všech výrobních operacích a je také jedním z důvodů, proč se při třískovém zpracování kovů používá procesních kapalin. Zvláštní důležitost má tento účinek při broušení, a to pro nutnost čistit brusné kotouče, při řezání závitů a při hlubokém vrtání, kde je třeba velmi rychle odplavovat třísky z řezu [6].

1.2.2 Rozdělení procesních kapalin a jejich vlastnosti

Procesní kapaliny se obecně dělí do dvou následujících skupin:

- chladicí kapaliny - s převažujícím chladicím účinkem,
- řezné oleje - s převažujícím mazacím účinkem.

Procesní kapaliny je možné ještě rozdělit:

- kapaliny vodou nemísitelné - mastné oleje a tuky, minerální oleje, zušlechtěné řezné oleje,
- kapaliny vodou mísitelné - vodné roztoky, emulze, polysyntetické a syntetické kapaliny.

Vodou nemísitelné procesní kapaliny

- mastné oleje a tuky - jsou látky živočišného nebo rostlinného původu, které mají velice dobrý mazací účinek vzhledem k značné přilnavosti ke kovům,
- minerální oleje - jsou vyrobeny z ropy,
 - uhlovodíkové kapaliny s dobrou mazací schopností, horším chladicím účinkem, velmi dobrým ochranným účinkem kovů a dobrou odolností vůči stárnutí,
 - mají příznivější vlivu na stroj,
- řezné oleje - jsou to minerální oleje zušlechtěné přísadami ke zvětšení mazivosti, resp. ke zlepšení mazacích, řezných schopností,
 - pro zušlechtování olejů sloužících k řezání kovů se nejlépe osvědčily organické sloučeniny síry, chloru a fosforu [2].

Vodou mísitelné procesní kapaliny

- vodné roztoky - nejdostupnější a nejlevnější kapalinou je voda, která zároveň dobře odvádí teplo,
 - surová voda má však také mnoho nedostatků, pro které ji bez úpravy není možné používat jako procesní kapaliny,
- emulzní kapaliny - emulze je disperzní soustavou dvou vzájemně nerozpustných kapalin, z nichž jedna tvoří mikroskopické kapky, rozptýlené v druhé kapalině,
 - spojují do určité míry přednosti vody a mazacích olejů,
 - největším podílem je především voda, mají velmi dobrý chladicí účinek a jsou levné,
- polysyntetické kapaliny - jsou to minerální oleje doplněné syntetickými komponenty,
 - do minerálního oleje se v určitém procentu přidávají syntetické složky,
- syntetické kapaliny - jsou to homogenní roztoky vzájemně mísitelných látek, na rozdíl od plně minerálních, mléčných a polysyntetických kapalin neobsahují olej,
 - jejich výrazný chladicí a vyplachovací účinek nachází uplatnění zejména u operací broušení.

Hlavní výhody syntetických kapalin:

- výrazně delší životnost,
- lepší smáčecí a oplachovací schopnost,
- lepší odolnost vůči tepelnému zatížení,
- lepší stabilita pH. [2]

1.2.3 Vliv procesní kapaliny při broušení

Procesní kapaliny zásadním způsobem ovlivňují proces obrábění podle svého účinku. Procesní kapaliny používané při broušení zejména odvádějí vzniklé teplo, tudíž je kladen důraz na chladicí účinek. Očišťují také povrch obrobku a broušícího kotouče od třísek, zlepšují drsnost a kvalitu povrchové vrstvy obrobku.

Při procesu broušení má procesní kapalina tedy plnit tyto funkce:

- chladičí účinek,
- mazací účinek,
- čistící účinek k usnadňování odvodu třísek.

Zároveň musí být zaručena:

- chemická a fyzikální stálost,
- antikorozní účinek,
- netoxičnost včetně zaručení baktericidních a hygienických podmínek,
- minimální pěnovost,
- bezpečnost před požárem a explozí,
- příznivý vliv na sedimentaci odpadu broušení [2].

1.2.4 Přívod procesní kapaliny do místa řezu

Přívodu procesní kapaliny do místa řezu významně ovlivňuje jak trvanlivost nástroje, tak i jakost obrobené plochy. Účinnost použití procesních kapalin závisí na způsobu jejich přívodu.

Způsoby přívodu procesních kapalin:

- podchlazování procesních kapalin,
- tlakové chlazení,
- chlazení mlhou,
- chlazení za minimálního přívodu procesní kapaliny MQL,
- chlazení plynnými látkami.

Podstatou všech těchto metod je zvětšení chladičího a mazacího účinku procesní kapaliny. Zavádění nových způsobů chlazení a jejich využívání dává možnosti zvyšovat výkon obrábění i jeho hospodárnost s ohledem na ekologii a zdravotní nezávadnost [2].

1.3 Plynné látky jako řezné médium

Plynné látky se jako řezná média běžně nepoužívají, protože mají relativně nízký chladičí účinek, problematický čistící účinek a žádný mazací účinek. Některé obráběné materiály, případně nástrojové materiály, se však chladí vzduchem přiváděným pod tlakem do místa řezu.

Jedním z účinných způsobů chlazení plynem je chlazení stlačeným CO₂ (tenký paprsek plynu se do místa řezu přivádí pod tlakem 0,5 - 7,0 MPa), doporučováno např. pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Tato metoda má řadu nevýhod, k nimž patří především vysoké náklady na CO₂, jisté nebezpečí při jeho používání a nutnost dokonalého odsávání a větrání pracoviště. Další vhodné plyny jsou N₂, inertní argon nebo freon pod vysokým tlakem, pomocí kterého se odstraňují třísky.

Zvláštním případem aplikace plynného řezného prostředí je tzv. suché obrábění, kdy řezným prostředím je atmosférický vzduch. Rozšiřování tohoto způsobu obrábění souvisí s vývojem nových řezných materiálů, které nevyžadují chlazení, a přesto jsou schopny výkonně a efektivně obrábět.

Chybějící čistící účinek procesní kapaliny, tj. odplavování třísek, může způsobovat zahlcování a zalepování prostoru pro třísky zvláště brusných nástrojů. Dochází tak nejen k poškozování obrobené plochy zpevněnými třískami, ale i břítu nástroje, když se třísky dostanou mezi břit a obrobek a jsou znovu řezány. Problém lze řešit nejlépe odsáváním nebo nouzově i odfukováním třísek tlakovým vzduchem. Při odfukování však vzniká nebezpečí v zafukování kovového prachu např. do ložisek, vodicích ploch, šroubu apod. [7].

1.3.1 Obrábění bez chlazení (atmosférický vzduch)

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

Nevýhody:

- úprava nástrojových materiálů, které budou schopny odolávat teplotám od 1200°C do 1300°C,
- úprava geometrie nástrojů,
- řešení odvodu třísek při hlubokém vrtání.

Výhody:

- lidské zdraví - snížení alergie osob, onemocnění pokožky,
- pracovní prostředí - řezné kapaliny znečišťují okolní prostředí, odpadá skladování a likvidace použitých řezných kapalin,
- ekonomické - odpadají náklady na likvidaci řezných kapalin [7].

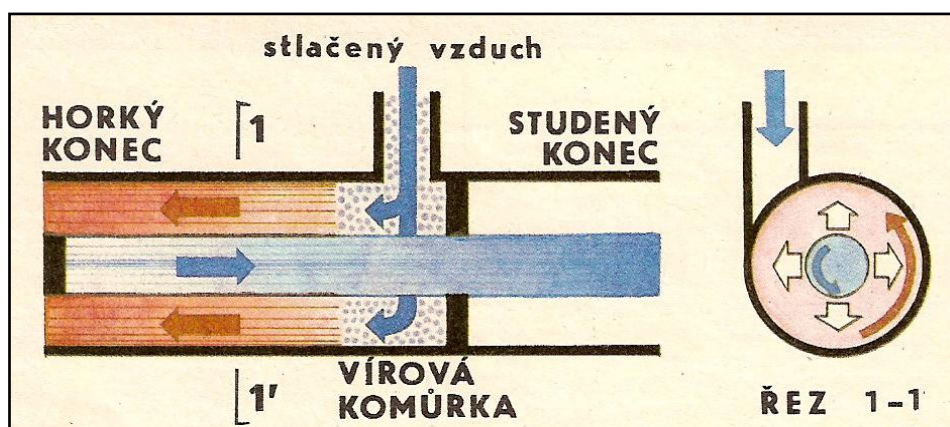
1.3.2 Obrábění s využitím podchlazeného vzduchu

K tomuto účelu se vyrábí a využívá zařízení zvané vírová trubice, která použitím pouze filtrovaného stlačeného vzduchu o tlaku 5,5 - 7 bar, jako zdroje energie vytvoří dva proudy vzduchu, jeden studený (až -45 °C) a jeden horký (až +120 °C) bez použití elektrické energie, freonů a pohyblivých součástí.

Princip vírové trubice:

Po zapojení přívodu vzduchu je velmi rychle dosažen stav dynamické rovnováhy, který je možné popsat takto: proud vzduchu je odstředivou silou držen v blízkosti stěn trubice a postupuje po spirále směrem doleva, přičemž rotuje velkou úhlovou rychlostí dosahující až desítek tisíc otáček za sekundu. Na levém konci trubice je umístěn výstupní ventil, kterým je možné regulovat množství vzduchu odcházejícího tímto koncem trubice, tzv. horkým koncem, neboť vzduch zde vystupuje silně zahřátý.

Část vzduchu se však odráží zpět směrem k pravému konci, tzv. studenému konci trubice, neboť na této straně vychází vzduch silně ochlazený. Tato část proudu postupuje doprava opět za současného vířivého pohybu, prochází vírovou komůrkou a otvorem na jejím opačném konci vychází z přístroje. Regulace chlazení a ohřívání, jakož i poměrné množství obou složek, se provádí výstupním ventilem.



Obr. 10 Princip Ranque Hilschovi vírové trubice [7].

Cold Air Gun

Používá filtrovaný stlačený vzduch a princip vírové trubice pro vytvoření mrazivého proudu vzduchu pro spoustu průmyslových aplikací při bodovém chlazení. Vírová trubice převádí stlačený vzduch do studeného proudu vzduchu o teplotě až $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cold Air Gun se používají v různých průmyslových procesech, výrobě, montáži a balení jako univerzální zdroj bodového chlazení.

Chlazení studeným vzduchem významně zvyšuje životnost nástroje (až o 50%) a produktivitu práce (až o 36%) v porovnání s obráběním na sucho. Účinné chlazení pomocí Cold Air Gun eliminuje místní přehřívání součástí, a tím zvyšuje rozměrové tolerance i kvalitu povrchu součástí [7].

Výhody:

- okamžitý náběh chlazení nebo ohřívání,
- ekologický provoz - nepoužívá žádná chladiva,
- vystupující proud vzduchu s nižším tlakem pomáhá čistit výrobek od třísek a nečistot.

Výhody Cold Air Gun oproti chlazení emulzí:

- odstraňuje problém s kontaminací výrobku a další náklady spojené s používáním chladicí emulze,
- eliminuje následné čištění výrobku po obrábění,
- ochlazení součástí snižuje časové prostoje a zvyšuje rozměrové tolerance i kvalitu povrchu součástí.

Výhody Cold Air Gun oproti obrábění na sucho:

- snižuje tepelné zatížení brousícího kotouče,
- eliminuje spálení na hranách a deformace výrobku,
- zvyšuje produktivitu výroby a prodlužuje životnost nástroje [7].

1.3.3 Obrábění pomocí oxidu uhličitého

Obrábění s využitím zkapalněného oxidu uhličitého

Skleníkový plyn, oxid uhličitý, z ovzduší je možné využít k něčemu užitečnému, a to k ochlazování obrobků a snižování tření na jejich povrchu. Jedním z účinných způsobů chlazení plynem je totiž chlazení stlačeným CO_2 . Princip spočívá v přívodu tenkého paprsku plynu do místa řezu pod tlakem 0,5 - 7 MPa. Tento způsob chlazení je zvláště vhodný u těžkoobrobitelných materiálů. Tato metoda, i když přináší možnost zvýšení výkonu obrábění, má řadu nevýhod. Vysoké náklady na CO_2 a jisté nebezpečí při jeho používání. Vyžaduje se totiž dokonalé odsávání a větrání pracoviště.

Kryogenní chlazení pomocí oxidu uhličitého - tryskání pevného CO_2

Obrábění špatně obrobitelných materiálů například titanu, slitin niklu, či duplex ocelí, kdy při obrábění probíhá velké tepelné zatížení s vysokým opotřebením nástroje. S cíleným chlazením lze dosáhnout větší životnosti nástroje a možností zvýšit i řezné podmínky. Kryogenní proces lze provádět nejen s tekutým dusíkem, ale také s přiváděným tekutým kyslíčnickem uhličitým CO_2 ve formě tryskaného sněhu.



Obr. 11 Přívod CO₂ ve formě tryskaného sněhu [7].

“Sněhování“ využívá proud malých ledových částic o velikosti mikronu. Tryskající zmrzlé krystaly suchého ledu jsou vytvářeny dějem, kterému fyzikové říkají adiabatické rozpínání.

Princip: do tenké trubičky se vede pod tlakem kapalný oxid uhličitý. Po jeho průchodu tryskou (Ø0,3 mm) se z něj stanou tryskající „sněhánky“. Ty pak mechanicky odstraňují z povrchu obráběné součástky a nástroje všechen odpad. Současně místo opracování ochlazují a krystalky oxidu snižují tření, působí stejně jako mazivo. Oxid uhličitý je k životnímu prostředí šetrný, nehořlavý a je ho všude dost. Po vykonání práce se odpaří do vzduchu [7].

1.3.4 Obrábění s využitím zkapalněného dusíku

Kapalný dusík je kryogenní médium, které je po chemické stránce úplně stejné jako plynný dusík ze vzduchu. Z jednoho litru kapalného dusíku vznikne odpařením (za atmosférického tlaku a při 20°C) asi 680 litrů plynu. Jde o bezbarvou kapalinu s hustotou trochu menší, než má voda (1 ml váží asi 0,81 g, zatímco 1 ml vody váží 1,00 g). Za atmosférického tlaku se vaří už při teplotě $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, tedy 77 K. Kapalný dusík se musí přepravovat ve speciálních zásobnících (tzv. velká termoska) určených ke skladování a transportu (obr. 12). Dusík se nejčastěji používá jako inertní ochranný plyn v železářském a ocelářském průmyslu a v dalších metalurgických a chemických procesech.



Obr. 12 Zásobník typu KL, 32litrů od firmy CRYOMETAL s.r.o.

Kryogenní chlazení pomocí zkapalněného dusíku

Kryogenním chlazením je snaha docílit velmi nízkých teplot a jeho následným kladným působením na materiál i nástroj. Hranice mezi chlazením a kryogenním chlazením je 93,15 K (−180 °C). Bod varu permanentních plynů (vodík, kyslík, dusík...) se nachází pod touto hranicí oproti bodu varu běžných chladicích kapalin, které jsou nastaveny opačně. Hranice však není nastavena zcela pevně a může mít určité odchylky. Pro kryogenní chlazení se využívá hlavně kapalného dusíku - LN₂ (jeho fyzikálních vlastností), který je pro tyto případy naprosto ideální. Kapalný dusík lze po jeho zahřátí a následném odpaření využít po procesu jako plyn v prvotní jakosti (např. pro inertní atmosféru). Ke zkapalňování plynu (dusíku) slouží kryogenní expanzní turbíny.

Kryogenní chlazení pomocí dusíku - nepřímé chlazení

Metoda nepřímého chlazení spočívá v ochlazování místa řezu přívodem dusíku přes trysku umístěnou mimo obráběcí nástroj (obr. 13). Tato metoda velmi závisí na tepelné vodivosti materiálu nástroje (obrobku) kvůli zavedení chladicího účinku až do místa řezu přes odcházející třísku, která brání přímému přístupu do místa řezu. Tím se snižuje efektivita tohoto způsobu chlazení a může dojít k nežádoucím jevům, jako je např. podchlazení obrobku. Na druhou stranu lze tento způsob použít víceméně pro jakýkoliv druh obrábění [7].



Obr. 13 Chlazení břítu nástroje tekutým dusíkem - nepřímé chlazení [7].

Kryogenní chlazení pomocí dusíku - přímé chlazení

Tento způsob kryogenního chlazení umožňuje přivedení tekutého dusíku přes vytvářeč třísky přímo mezi třísku a čelo nástroje. Proud dusíku přes vytvářeč třísky pomáhá zvednout třísku, a tím zároveň sám sobě umožňuje lepší přístup k ochlazovanému místu a chladí ještě lépe. Na rozdíl od předchozího způsobu tříška neblokuje proudění tekutého dusíku. Tekutý dusík absorbuje teplo, rychle se odpařuje a tvoří kapalino-plynový polštář mezi třískou a čelem nástroje, který funguje jako mazivo. V důsledku toho se snižuje koeficient tření, jakož i sekundární deformace třísky. Mazací a chladicí efekt na nejteplejší místo snižuje teplotu nástroje, čímž účinně snižuje opotřebení nástroje. Pomocné kryogenní trysky mohou být dodatečně přidány kvůli ochlazování hřbetní plochy k dalšímu snížení opotřebení hřbetu [7].

2 Popis strojů a použitých měřicích zařízení

V této části diplomové práce jsme seznámeni se stroji (bruska BPH 320 A, frézka FNG 32), na kterých probíhal experiment, dále jsou zde také popsány informace o jednotlivých přístrojích.

2.1 Bruska BPH 320 A

Měření probíhalo na brusce typu BPH 320 A, která je součástí strojního vybavení laboratoře Katedry obrábění a montáže TU v Liberci.



Obr. 14 Bruska BPH 320 A.

Technické parametry brusky: [8]

• upínací plocha stolu	320 x 1000	[mm],
• podélný pohyb stolu	1060	[mm],
• maximální délka broušení	1000	[mm],
• maximální výška broušení	350	[mm],
• vzdálenost osy vřetene od plochy stolu	75 až 475	[mm],
• brousící kotouč (vnější průměr x šířka x průměr díry),	250 x 32 x 76	[mm]
• průměr brousícího kotouče po opotřebení	130	[mm],
• celková výška stroje	2125	[mm],
• otáčky brousícího kotouče Ø 250 mm	2522	[min ⁻¹],
• otáčky brousícího kotouče Ø 198 mm	3319	[min ⁻¹],
• hmotnost stroje se standardním vybavením	3345	[kg],
• celkový maximální příkon stroje	15,4	[kVA],
• max. hladina hluku v místě obsluhy	75	[dBA].

2.2 Frézka FNG 32

Na frézce FNG 32 probíhala příprava vzorků pro následující měření.



Obr. 15 Frézka FNG 32.

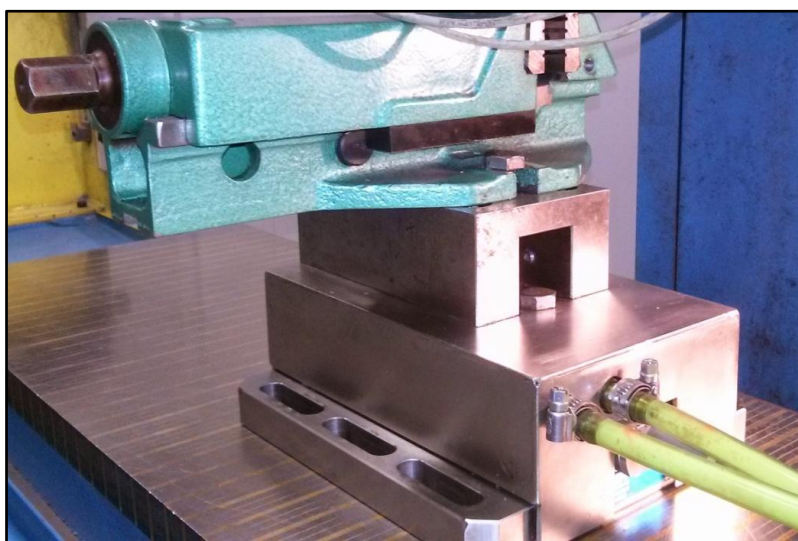
Technické parametry frézky: [9]

• 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	[min ⁻¹],
• 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].

2.3 Dynamometr KISTLER, typ 9265B

Piezelektrický dynamometr KISTLER, typ 9265B se používá pro určení řezných sil F_c a F_{cN} .

Dynamometr KISTLER 9265B má vysokou vlastní frekvenci, resp. tuhost. Obsahuje čtyři piezelektrické snímače, z nichž každý je složen z piezelektrických destiček, které jsou uspořádány tak, že každá zachycuje sílu v jiném směru. Dynamometr je konstruován tak, aby se náboje z jednotlivých snímačů sčítaly. Proto je jedno, na kterém místě upínací části přístroje síla působí, jelikož součet nábojů bude vždy stejný. Náboje z piezelektrických snímačů jsou zesilovány nábojovým zesilovačem 5019 B (obr. 17). Dynamometr je schopen měřit staticky i dynamicky [2].



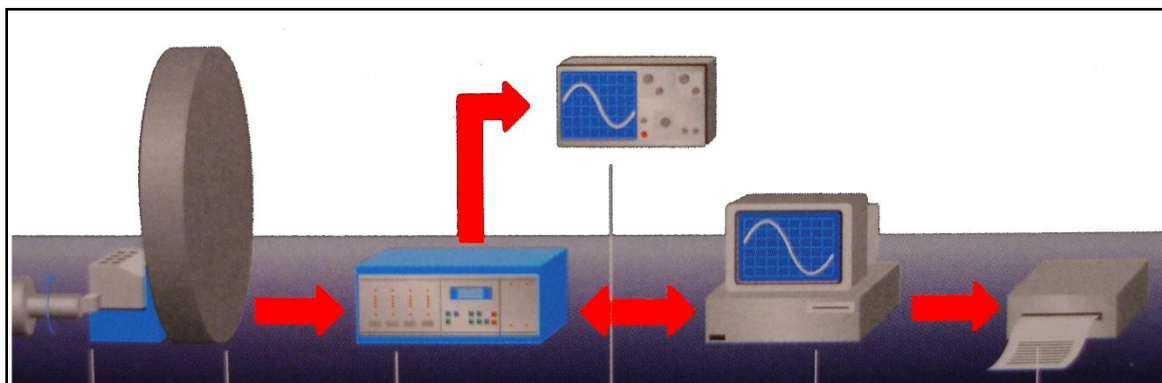
Obr. 16 Dynamometr KISTLER, typ 9265B.

Dynamometr je upnut na magnetickém stole brusky a na dynamometr se pomocí šroubů připevní svěrák, do kterého se upne materiál k broušení.



Obr. 17 Nábojový zesilovač 5019 B.

Kompletní sestava pro měření řezných sil obsahuje nábojový zesilovač 5019 B s ovládacím panelem. Dynamometr je dále připojen k počítači, a napěťový signál je zpracován programem Lab VIEW 6.1. [2].



Obr. 18 Schéma zapojení dynamometru [2].

2.4 Profiloměr Mitutoyo Surftest SV - 2000 N2

Technické parametry profiloměru:

- maximální posuv 55 [mm],
- maximální zdvih 800 [μ m],
- výškové přestavění 300 [mm].

Laboratorní profiloměr Mitutoyo Surftest SV - 2000 N2 pracuje na principu dotykové metody snímání povrchu a skládá se z mechanické a elektronické části. Mechanická část snímá pomocí hrotu vertikální nerovnosti povrchu v horizontálním směru pohybu hrotu, který je v převodníku transformován na elektrický signál a je zpracován do souřadnicového záznamu profilu povrchu. Zpracování naměřených dat je prováděno s využitím dodávaného softwaru „Surfpak“ v připojeném počítači. Tento software umožňuje vyhodnocení mnoha parametrů drsnosti podle norem ISO, DIN a JIS, zobrazení profilu v různém nastavení a vyjádření profilu pomocí zvoleného diagramu. Velkou výhodou tohoto softwaru je možnost exportu nasnímaných souřadnic bodů ve formátu *.csv, kdy je následně možné zpracovat údaje i jiným výpočetním programem [7].



Obr. 19 Profiloměr Mitutoyo Surftest SV - 2000 N2.

K měření drsnosti povrchu pomocí přístroje Mitutoyo Surftest SV - 2000 N2 se jako koncový člen soustavy používají doteky s diamantovou kuželovou špičkou.



Obr. 20 Dotek s diamantovou kuželovou špičkou.

2.5 Digitální posuvné měřítko

Měřicí zařízení pro měření šířky broušené drážky ve vzorku.

Technická specifikace posuvného měřítka:

- rozsah 0 - 150 [mm],
- rozlišení 0,01 [mm].



Obr. 21 Digitální posuvné měřítko.

2.6 Ruční refraktometr RLC

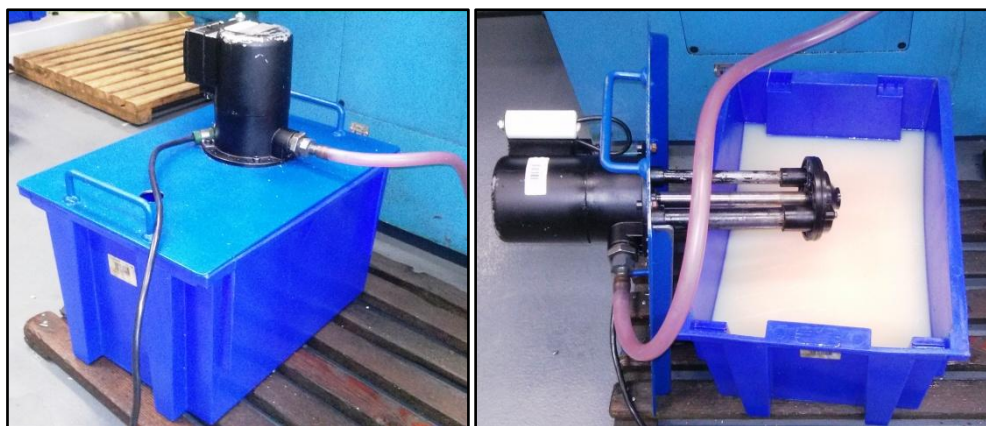
Ruční refraktometr slouží k určení koncentrace vodou mísitelných procesních kapalin. Stupnice refraktometru je uvedena ve stupních Brix, celková koncentrace všech rozpuštěných látek v procentech. Obvyklá koncentrace olejové emulze s vodou 0 - 7 % [2].



Obr. 22 Refraktometr RLC.

2.7 Elektročerpadlo 2CPP1 - 17H

Toto čerpadlo bylo použito při experimentu k dopravení procesních kapalin HOCUT 795B a EOPS 1030 za pomoci hadice až do místa řezu.



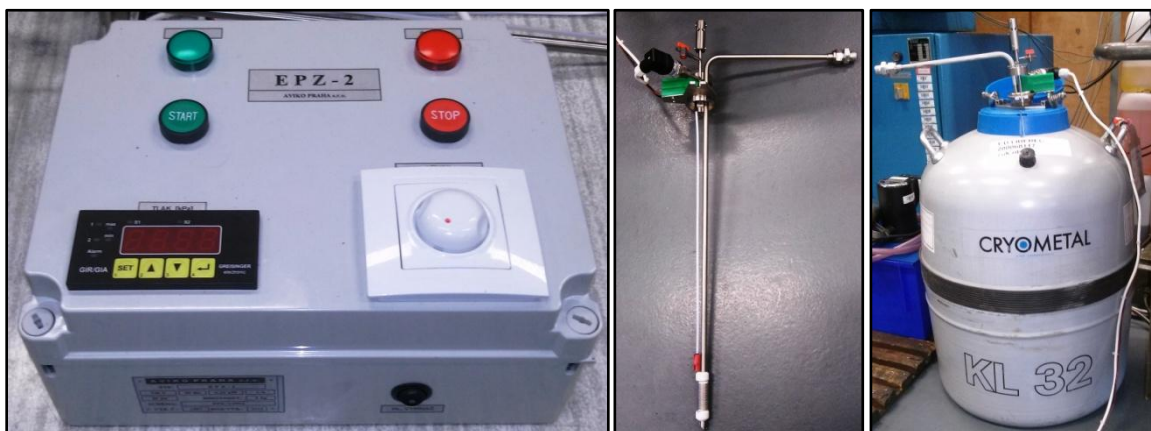
Obr. 23 Elektročerpadlo řady CPP (odstředivé plastové)

Technické parametry:

- | | | |
|-----------------------------|------|-----------------------|
| • jistící proud | 0,38 | [A], |
| • příkon | 100 | [W], |
| • maximální provozní tlak | 20 | [kPa], |
| • maximální provozní průtok | 0,27 | [l.s ⁻¹]. |

2.8 Elektrické přečerpávací zařízení EPZ - 2

Zařízení se skládá z napájecího modulu a čerpadla. Slouží k přepravě kapalného dusíku ze zásobníku KL 32 za pomoci speciální hadice do místa řezu.



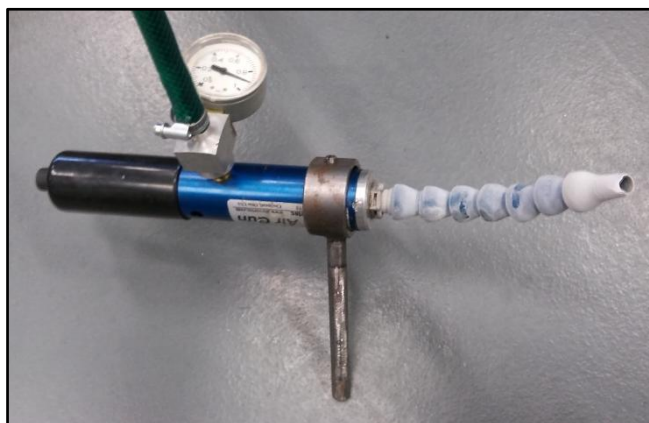
Obr. 24 Napájecí modul (vlevo), čerpadlo (ve středu), zásobník na dusík (vpravo)

Technické parametry:

- příkon 0,25 [kW],
- maximální provozní tlak 15 [kPa],
- průtočnost 6,47 [g.s⁻¹].

2.9 Vírová trubice

Při experimentu s chlazením pomocí stlačeného studeného vzduchu bylo využito zařízení Cold Air Gun, pracující na principu vírové trubice.



Obr. 25 Cold Air Gun.

Technické parametry:

- provozní tlak 0,5 - 0,7 [MPa],
- studený konec do -45 [°C].

2.10 Řídicí jednotka na CO₂

Zařízení k dávkování stlačeného CO₂ při samotném broušení, tzn. CO₂ je přiváděno pouze v době, kdy přichází brousící kotouč do styku s obrobkem.



Obr. 26 Řídicí jednotka pro přívod CO₂.

Technické parametry:

- příkon 0,5 [kW],
- provozní tlak 7 [MPa],
- průtočnost (dvě kapiláry = 2 x 2,2) 4,4 [g.s⁻¹].

3 Experimentální část

3.1 Příprava zkušebních vzorků

Volba materiálu (12 050.1) zkušební vzorku včetně rozměrů a způsobu broušení (rovinné, zápichové) vyplývá z realizace v rámci projektu „Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů“. Všechny zkušební vzorky byly připraveny v prostorách dílen katedry obrábění a montáže na Technické univerzitě v Liberci.

Materiál 12 050.1 je konstrukční ocel, nelegovaná, určená k zušlechťování a povrchovému kalení. Tato ocel je vhodná zejména k výrobě větších ozubených kol, čepů a nejrůznějších šroubů.

Z polotovaru plného hranolu 80 x 80 mm materiálu 12 050.1 byly nařezány na rámové pile destičky o tloušťce 14 mm, které se dále upravily na frézce FNG 32 nejprve na rozměr 80x60x14 mm, přičemž šířka 60 mm se frézovala z každé strany z důvodu vytvoření rovinnosti bočních stran. Poté následovalo frézování tloušťky destičky z obou stran o 0,5 mm, čímž se dospělo ke konečné velikosti vzorku o rozměrech 80x60x13 mm.

Vzorky byly následně opracovány na stojanové vrtačce, kde se přibližně do středu čelní strany nejprve navrtal středícím vrtákem důlek a poté se vyvrtal otvor $\varnothing 3,8$ mm do hloubky cca 5 mm (obr. 27), do tohoto otvoru se naklepla kulatina o $\varnothing 4$ mm, která usnadnila manipulaci se vzorkem a zároveň posloužila k přichycení termočlánků.



Obr. 27 Navrtávání (vlevo) a vrtání (vpravo) otvoru do čela vzorku.

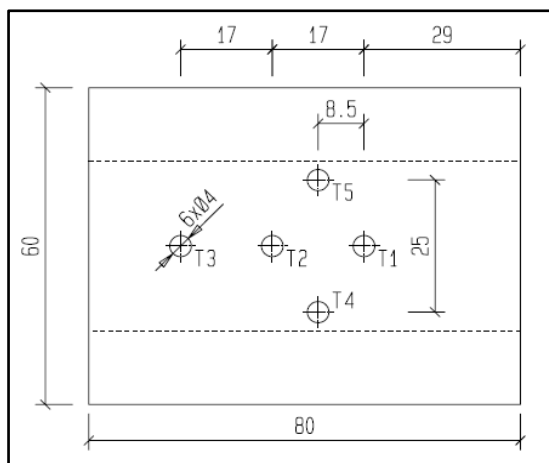
Po navrtání otvorů a naklepaní kulatiny do jednotlivých vzorků se všechny vzorky rozdělily a označily pomocí písmen a čísel (viz. obr. 28). Vzorky jsou v sadách (01 - 06) pro každé procesní médium po pěti kusech (A - E). Např. 01 označuje vzorek broušený bez procesního média, 03 s využitím stlačeného CO_2 , 05 s využitím kapaliny EOPS 1030 atd.

Např.: VZ05A 12 050.1 VZ...vzorek,
05...číslo sady vzorků,
A...jeden ze vzorku ze sady,
12 050.1...materiál vzorků.



Obr. 28 Značení vzorků.

Takto připravené vzorky se opět přesunuly k frézce, kde proběhla poslední část přípravy vzorků, a to navrtání otvorů pro termočlánky k měření teploty. Ze spodní strany vzorku se středícím vrtákem navrtaly důlky v přesně daných vzdálenostech, jak je zobrazeno na obr. 29.



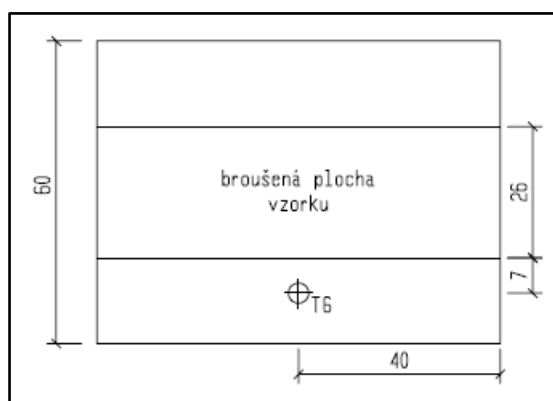
Obr. 29 Rozmístění otvorů na spodní straně vzorku pro termočlánky.

Následně byly do předvrtaných důlků vyvrtány otvory o $\varnothing 4$ mm do určité hloubky, které jsou dány v rámci projektu pro všechny vzorky. Otvory T3, T4, T5 byly vyvrtány do hloubky 11 mm, otvor T2 do hloubky 10,5 mm a T1 do hloubky 10 mm. Po vyvrtání zůstal v otvoru kuželovitý konec po břitvu vrtáku, který se srazil na plochu pomocí frézy o $\varnothing 4$ mm.



Obr. 30 Navrtání důlků (vlevo), vrtání otvorů (ve středu), frézování kuželu (vpravo).

Poslední přípravou vzorku bylo vyvrtání otvoru T6 na horní straně vzorku podle obr. 31 do hloubky 0,5 mm.



Obr. 31 Otvor pro termočlánek na horní straně vzorku.

3.2 Metodika hodnocení plynů a kapalin pro řezné podmínky

3.2.1 Řezné prostředí pro experimentální měření

- broušení bez chlazení,
- broušení s využitím vírové trubice,
- broušení s využitím stlačeného CO₂,
- broušení s využitím zkapalněného dusíku,
- broušení s využitím emulgačního oleje PARAMO EOPS 1030,
- broušení s využitím procesní kapaliny HOCUT 795B.

Při broušení bez chlazení (tzv. na sucho) se jako médium bere atmosférický vzduch z okolního prostředí (cca 21 °C), který nemá vliv na chlazení obrobku.

Principu vírové trubice využívá zařízení Cold Air gun, které pomocí filtrovaného stlačeného vzduchu vytvoří mrazivý proud vzduchu o teplotě až -46 °C. Vhodné pro použití v různých průmyslových procesech, výrobě, montáži jako univerzální zdroj bodového chlazení. Cold Air Gun eliminuje místní přehřívání součástí, a tím zvyšuje rozměrové tolerance i kvalitu povrchu součástí [7].

Oxid uhličitý je bezbarvý plyn, bez zápachu a chuti, nejedovatý, nezápalný a nedýchatelný. Při větším množství ve vzduchu (více než 8%) dojde ke ztrátě vědomí. Oxid uhličitý nejprve expanduje a následně vzniká jemný prášek - sníh CO₂. Při podchlazení na -78,8 °C přechází oxid uhličitý do tuhého skupenství a vzniká bílá tuhá látka, tzv. suchý led [14].

Zkapalněný dusík je bezbarvá a extrémně studená kapalina, uschovávaná v zásobnících při teplotě -196 °C. Vhodná pro obrábění těžce obrobitelných materiálů. Při použití kapalného dusíku dochází ke zlepšení materiálových vlastností (vyšší pevnost, houževnatost, tepelná vodivost, rozměrová stabilita a lepší se drsnost povrchu) [13].

PARAMO EOPS 1030 je polosyntetická univerzální obráběcí kapalina (5% roztok) tvořící s vodou stabilní mikroemulzi s vyváženým chladicím a mazacím účinkem, s dobrou ochrannou schopností proti atmosférické korozi a nízkou pěnovitostí, která je vhodnou řeznou kapalinou při obrábění kovových i nekovových materiálů [12].

HOCUT 795B je univerzální rozpustná kapalina s vysokou mazací schopností pro použití na všechny kovy s minimálními nároky na údržbu, pouze kontrola koncentrace (5% roztok kapaliny s vodou). Tato kapalina poskytuje spolehlivé mazání a ochranu proti korozi s nízkou pěnovitostí, účinně odstraňuje většinu problémů chladicího účelu, prodlužuje životnost nástroje a zlepšuje povrch součástí. Je biologicky stabilní [10].

3.2.2 Řezné podmínky broušení

Experimentální měření bude provedeno za ustálených řezných podmínek:

Parametr	Hodnota
řezná rychlost v_c	31,4 - 34,7 m.s ⁻¹
otáčky n	2400 - 2650 min ⁻¹
posuv f	14,5 - 15,5 mm.min ⁻¹
hloubka záběru a_p	0,01 - 0,03 mm

Metodika experimentu:

- měřené parametry - řezná síla,
- teplota řezného nástroje a obrobku,
- drsnost povrchu,
- rozměrová přesnost,
- obráběný materiál - ocel 12 050.1 (C45 + N),
- rozměry polotovaru - 80 x 60 x 13 mm,
- stroj - bruska BPH 320 A,
- nástroj - kotouč plochý,
- typ nástroje - 250 x 25 x 76 A 98 46 K 9 V 001,
- řezné prostředí - broušení bez chlazení,
- broušení s využitím vírové trubice,
- broušení s využitím stlačeného CO₂,

- broušení s využitím zkapalněného dusíku,
- broušení s využitím oleje PARAMO EOPS 1030,
- broušení s využitím kapaliny HOCUT 795 B.

Typ nástroje 250 x 25 x 76 A 98 46 K 9 V 001...kotouč s vnějším průměrem 250mm, šířkou 25mm a průměrem otvoru v kotouči 76mm. Jedná se o broušící kotouč z manganového umělého korundu se střední zrnitostí brusiva, měkký, pórovitý kotouč spojený keramickým pojivem.

3.2.3 Měřicí parametr - řezná síla

Přímé měření řezných sil a jejich točivých momentů se zakládá na měření deformací v soustavě stroj - nástroj - obrobek během obrábění prostřednictvím dynamometrů. Dynamometr musí měřit sledovanou veličinu ve zvoleném rozsahu s maximální přesností, musí zaručit stálost naměřených hodnot s časem, včetně její reprodukovatelnosti.

K měření řezných sil pro proces broušení byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER, typ 9265B (viz. kapitola 2.3).

Tento dynamometr využívá pro snímání deformace piezoelektrického jevu, který je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Mezi nejužívanější piezoelektrický materiál patří především křemen. Základem piezoelektrického snímače jsou měřicí křemenné destičky. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly a s poklesem zatížení se lineárně snižuje, až zcela vymizí při zatížení nulovém.

Náboje z piezoelektrických snímačů jsou zesilovány nábojovým zesilovačem 5019 B. Signál z nábojového zesilovače vstupuje do sběrné a měřicí karty v připojeném počítači, kde jsou data zpracována softwarem LabVIEW [7].

Měření trvanlivosti nástroje při procesu broušení

Při zkouškách trvanlivosti u technologie broušení nelze provést standardní měření opotřebení kotouče. U broušení se vychází z měřených řezných sil, které vykážou pro jednotlivé procesní kapaliny a plyn změny velikostí řezných sil, a tím také vliv procesních medií na řezivost broušícího kotouče.

3.2.4 Měřicí parametr - teplota obrobku

Teplota při procesu obrábění je jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících tento proces a má vliv na všechny další parametry. Závisí na ní možnosti a vhodnost použití různých řezných rychlostí, posuvů, hloubky řezu, a také ovlivňuje trvanlivost nástroje. Pro měření teploty v místě řezu je několik možností (termočlánky, termistory, teplotní indikátory) nebo se využívá tepelného záření vyzařovaného měřeným tělesem (pyrometry, termovize).

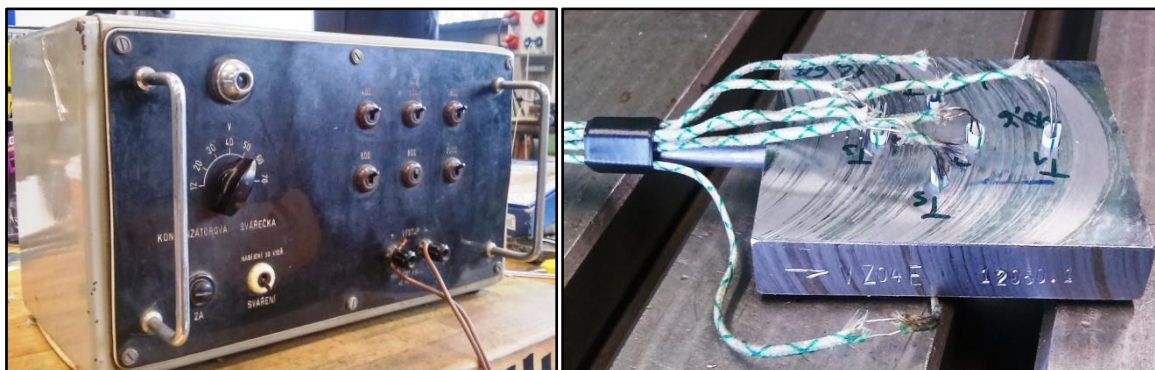
V tomto experimentu byly k měření teploty použity termočlánky.

Při měření termočlánky se využívá tzv. termoelektrického jevu. Tento jev využívá vzniku termoelektrického napětí, v obvodu tvořeného dvěma různými vodiči, jejichž konce jsou vodivě spojeny, jestliže jsou oba spoje udržovány na různých teplotách.

Při obrábění se ho využije tak, že měřicí spoj je umístěn do místa měření teploty a srovnávací spoj je udržován na známé teplotě okolí. K těmto vodičům je pak připojen milivoltmetr. Velikost termoelektrického napětí závisí nejen na rozdílu teplot, ale i na druhu materiálů obou vodičů tvořících termočlánek. Pro praktická měření teploty lze využít jen některé dvojice kovů nebo slitin, které musí být sestaveny tak, aby vzniklé termoelektrické napětí bylo dostatečně velké v rozsahu předpokládaných teplot. Je vhodné kombinovat vodiče tvořící pokud možno lineární charakteristiku, časovou stabilitu, odolnost proti korozi a chemickým vlivům. Při obrábění se k měření teplot a teplotních polí užívají nejen dva druhy vodičů, ale s výhodou i jako vodič materiál nástroje nebo obrobku. Podle provedení je lze rozdělit do těchto skupin: umělý, poloumělý, přirozený a termoduo.

Podstatou umělého termočlánku je přímé umístění do místa řezu. S pomocí těchto dvou cizích vodičů lze měřit teplotu v různých místech obrobku. Upravený a izolovaný termočlánek se vloží do otvoru v obrobku.

Pro měření teploty byly použity termočlánky typu K, které jsou schopny snímat teploty v intervalu od minimální teploty -270°C až do maximální teploty 1372°C . Vodiče termočlánku „K“ jsou ze dvou materiálů, Ni - Cr (+) a Ni - Al (-), které jsou kondenzátorovou svářečkou (obr. 32 vlevo) uchyceny v místě snímání. Termočlánky jsou zapojeny do sběrnice (obr. 33 vlevo), kde dochází k převodu mV na $^{\circ}\text{C}$ a poté jsou data transportována a ukládána na interní paměť provozní jednotky s přenosem pomocí lokální sítě LAN [7].



Obr. 32 Kondenzátorová svářečka (vlevo), termočlánky svařené ke vzorku (vpravo).



Obr. 33 Termočláanky zapojené ve sběrnici (vlevo), provozní jednotka (vpravo).

3.2.5 Měřicí parametr - drsnost povrchu

Skutečný povrch součásti je vrstva, která ohraničuje součást a odděluje ji od okolí. Tato vrstva se liší od ideálního povrchu různými nerovnostmi. Drsností povrchu rozumíme část geometrických nerovností s poměrně malou vzdáleností sousedních nerovností. Tyto geometrické nerovnosti jsou způsobeny stopami nástrojů při třískovém obrábění nebo jinými vlivy při zhotovování konečného tvaru povrchu součásti.

K měření drsnosti povrchu byl v tomto experimentu použit profiloměr Mitutoyo Surftest SV - 2000 N2 (viz. kapitola 2.4). Naměřená data byly zpracována s využitím programu Surfpack v připojeném počítači [7].

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

- Ra - průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu,
- Rz - maximální výška profilu,
- Rt - celková výška profilu.

3.2.6 Měřicí parametr - rozměrová přesnost

Skutečné plochy vyrobených součástí se liší od ideálních (teoretických) ploch svými rozměry, tvarem a vzájemnou polohou. Výrobu součástí tak lze zajistit pouze s určitou přesností. Je vhodné předepisovat dovolenou nepřesnost výše uvedených faktorů formou odchylek rozměrů, odchylek tvaru a polohy a odchylek drsnosti povrchu. Požadavek dodržení odchylek (dovolené nepřesnosti) se týká především funkčních ploch (plochy zajišťující správnou funkci součástí). Někdy je třeba dodržet s určitou přesností rozměry a tvar - rozměrová přesnost [7].

K měření rozměrové přesnosti v experimentu bylo použito digitální posuvné měřítko o rozsahu 0 - 150 mm (viz. kapitola 2.5).

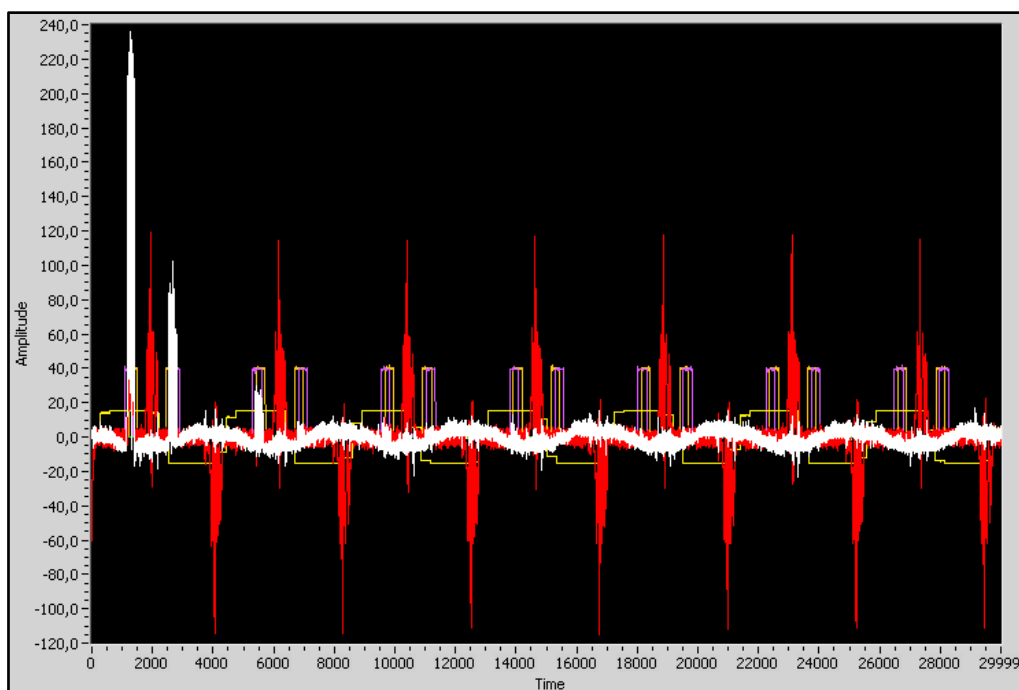
3.3 Vlastní měření

3.3.1 Měření řezných sil

K měření řezných sil byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER, typ 9265B. Princip piezoelektrického jevu je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu krystalů při mechanickém zatížení. Velikost tohoto náboje je přímo úměrná velikosti působící síly. S klesajícím zatížením se lineárně snižuje a při nulovém zatížení zcela vymizí.

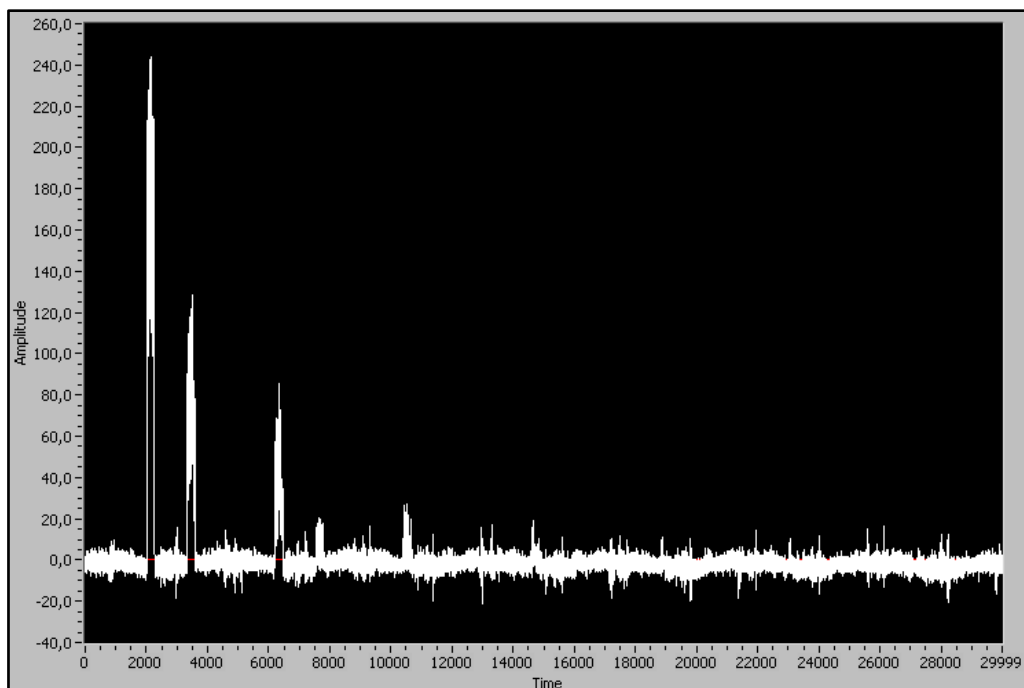
Řezné podmínky byly nastaveny pro všechny řezné media stejně:

- otáčky **n** 2500 min⁻¹,
- posuv **f** 15,5 mm.min⁻¹,
- hloubka záběru **a_p** 0,02 mm.



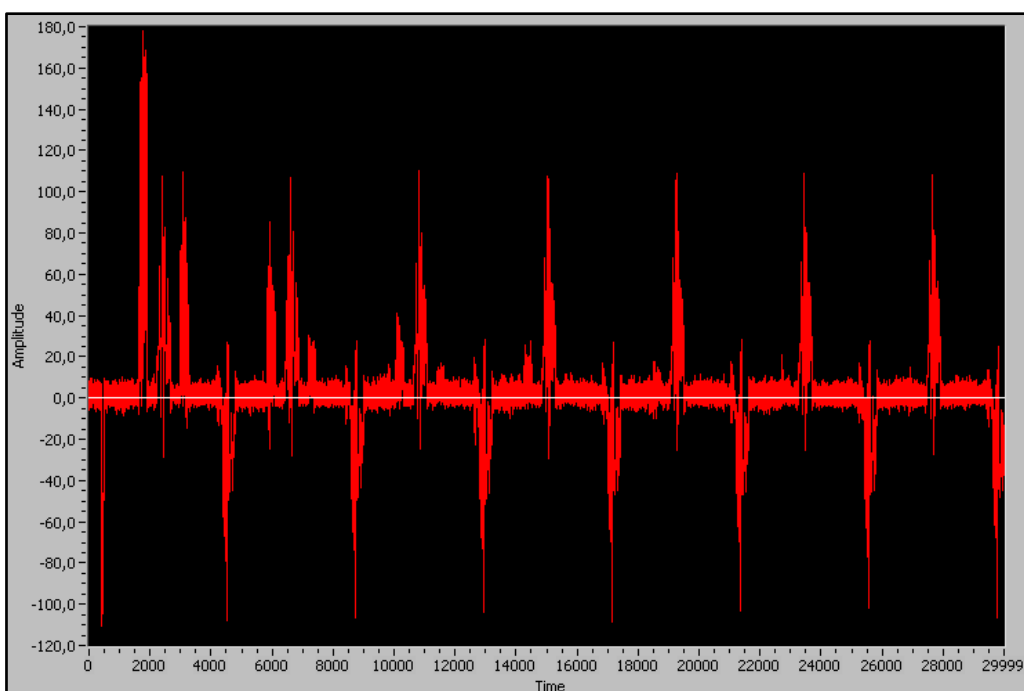
Obr. 34 Příklad průběhu měření při broušení

Na obr. 34 je bíle znázorněná kolmá řezná síla a červeně síla posuvová, jejíž průběh se u jednotlivých měření příliš neliší. Proto se dál pracuje pouze s kolmou řeznou silou. Žlutou barvou je vyznačena rychlost stolu, fialová a oranžová barva znázorňuje polohu sepnutí a rozepnutí snímačů polohy (A, B), mezi kterými probíhá měření kolmé řezné síly.

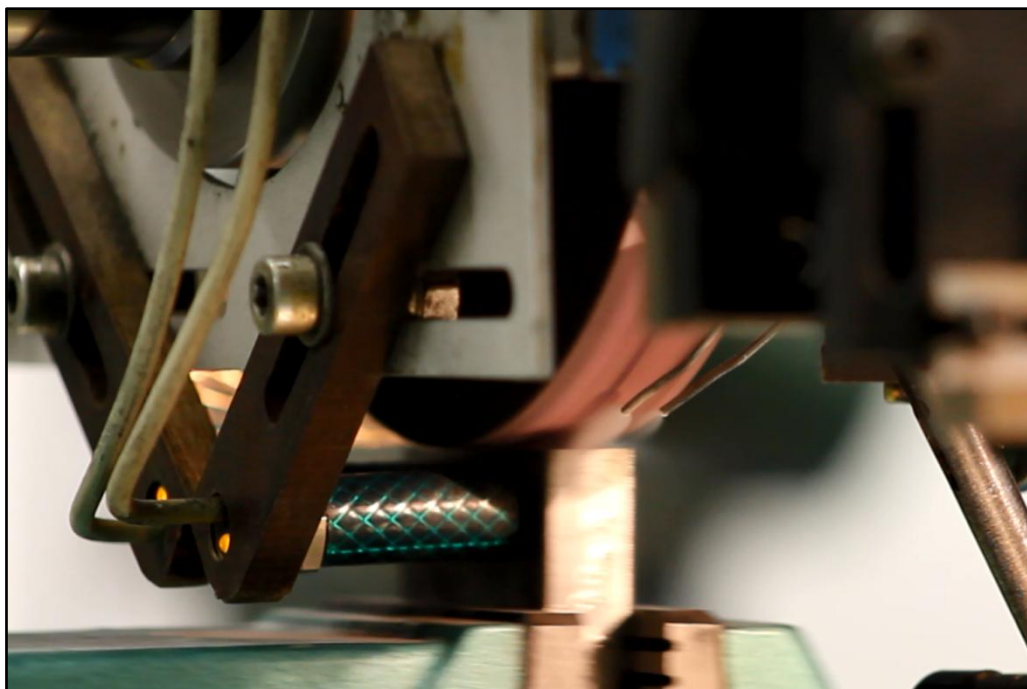


Obr. 35 Průběh řezné síly při broušení s využitím stlačeného CO₂.

Ostatní průběhy kolmých řezných sil viz příloha.



Obr. 36 Průběh posuvové síly při broušení s využitím stlačeného CO₂.



Obr. 37 Měření řezných sil při broušení s využitím CO₂.

Pro jednotlivá měření zpracoval program Lab WIEW tyto průběhy kolmých řezných sil, ze kterých následně vyhodnotil průměrnou řeznou sílu (aritmetický průměr prvních 6 smluvních hodnot vyplývajících z tohoto průběhu). Průměrné hodnoty řezných sil se pro každé měření zapsaly do tabulky, ze kterých se vypočítal celkový průměr řezné síly.

Tab. 6 Průměrné hodnoty působících řezných sil při broušení bez chlazení.

BEZ CHLAZENÍ						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
F_x [N]	32,1	32,5	33,3	32,4	32,1	32,5
F_z [N]	82,7	80,3	75,3	78,1	81,6	79,6

Tab. 7 Průměrné hodnoty působících řezných sil při broušení s využitím vírové trubice.

VÍROVÁ TRUBICE						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
F_x [N]	30,9	29,3	29,8	28,3	29,9	29,6
F_z [N]	73,2	70,0	68,2	63,3	69,6	68,9

Tab. 8 Průměrné hodnoty působících řezných sil při broušení s využitím stlačeného CO₂.

STLAČENÝ CO ₂						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
F_x [N]	29,4	31,4	28,9	31,9	32,3	30,8
F_z [N]	74,3	77,9	77,3	75,9	79,2	76,9

Tab. 9 Průměrné hodnoty působících řezných sil při broušení se zkapaněným dusíkem.

ZKAPALNĚNÝ DUSÍK						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
F_x [N]	31,6	36,6	35,3	32,2	30,0	33,2
F_z [N]	95,2	131,0	131,1	110,8	105,8	114,8

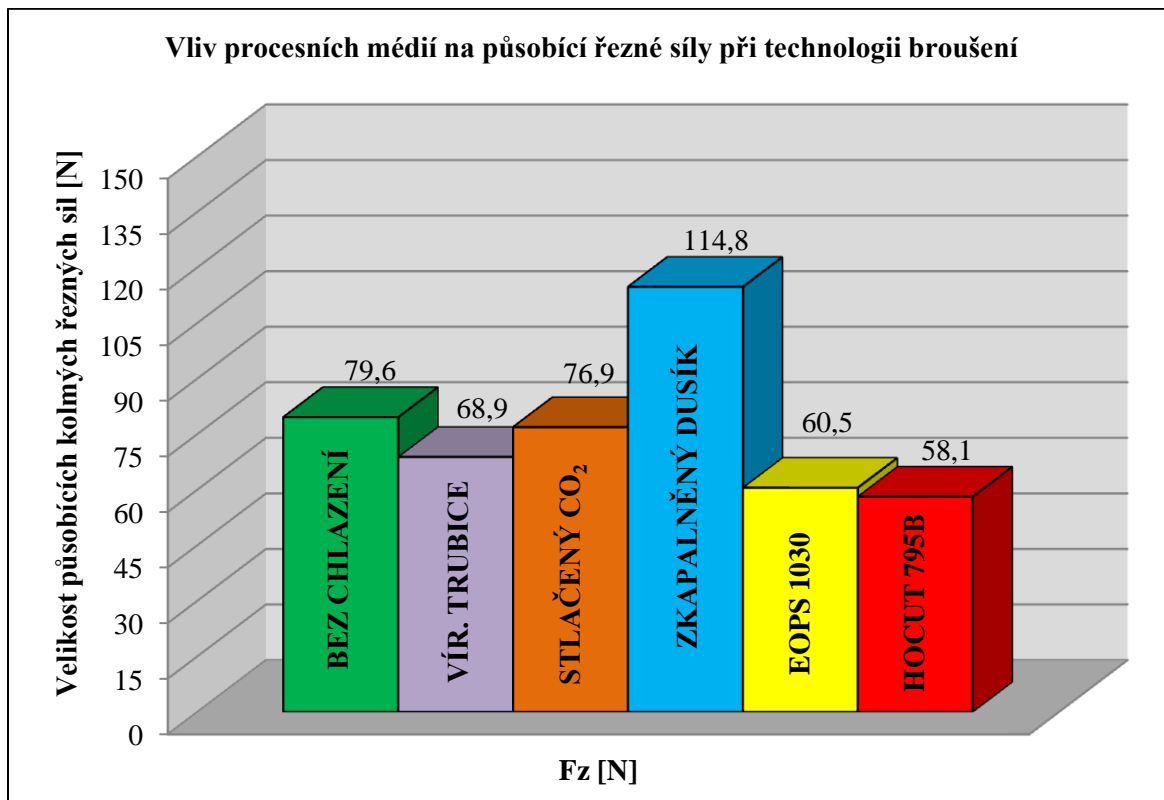
Tab. 10 Průměrné hodnoty působících řezných sil při broušení s kapalinou EOPS 1030.

EOPS 1030						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
F_x [N]	19,3	18,5	19,4	17,6	18,9	18,7
F_z [N]	56,1	56,2	60,4	65,8	64,2	60,5

Tab. 11 Průměrné hodnoty působících řezných sil při broušení s kap. HOCUT 795B.

HOCUT 795B						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
F_x [N]	18,3	16,5	16,2	20,5	23,7	19,0
F_z [N]	63,1	54,8	55,2	55,9	61,8	58,1

Graf č. 1 Hodnoty působících kolmých řezných sil při broušení.



Z naměřených hodnot, které jsou také zobrazeny v grafu č. 1, je patrné, že použití zkapaněného dusíku z hlediska řezných sil při technologii broušení je zcela nevhodné.

Velké podchlazení při užití zkapalněného dusíku nepřináší v tomto ohledu měření žádné výhody, ale naopak řezná síla ještě výrazně vzrostla v porovnání s měřením řezných sil při broušení na sucho (bez použití procesního média), kde se její hodnota pohybovala okolo 79,6 N.

Dalším poznatkem, vyplývajícím z grafu, je skutečnost, že i při malých rozdílech mezi výslednými hodnotami řezných kapalin, byly nejmenší síly naměřeny při broušení s využitím procesní kapaliny HOCUT 795 B, kde je průměrná hodnota řezné síly rovna 58,1 N. Použitím těchto procesních kapalin při broušení se výrazně snížily průměrné hodnoty řezných sil v porovnání s broušením s využitím procesních plynů.

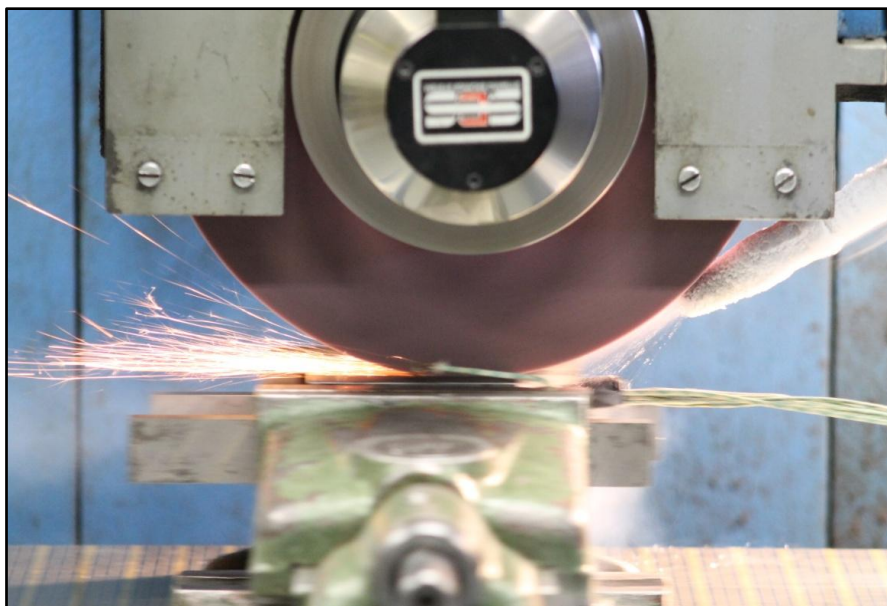
K těmto hodnotám se nejvíce přiblížilo při broušení za přívodu studeného vzduchu z vírové trubice (68,9 N), kde vzduch proudící skrz kompresor je částečně omaštěn, a tím zlepšuje mazací účinek.

Hodnoty řezných sil, naměřené s využitím CO₂, se pohybovaly okolo 76,9 N, tedy nižší než síly naměřené při broušení bez chlazení (79,6 N).

Trvanlivost nástroje se u broušení zjistí z řezných sil, kde samotná hodnota řezné síly vypovídá o řezivosti nástroje. Čím je hodnota řezné síly menší, tím je vyšší řezivost broušícího kotouče. Z naměřených hodnot vyplývá, že řezivost kotouče s využitím procesních kapalin je mnohem lepší, než při broušení s použitím plynů, obzvláště při užití zkapalněného dusíku.

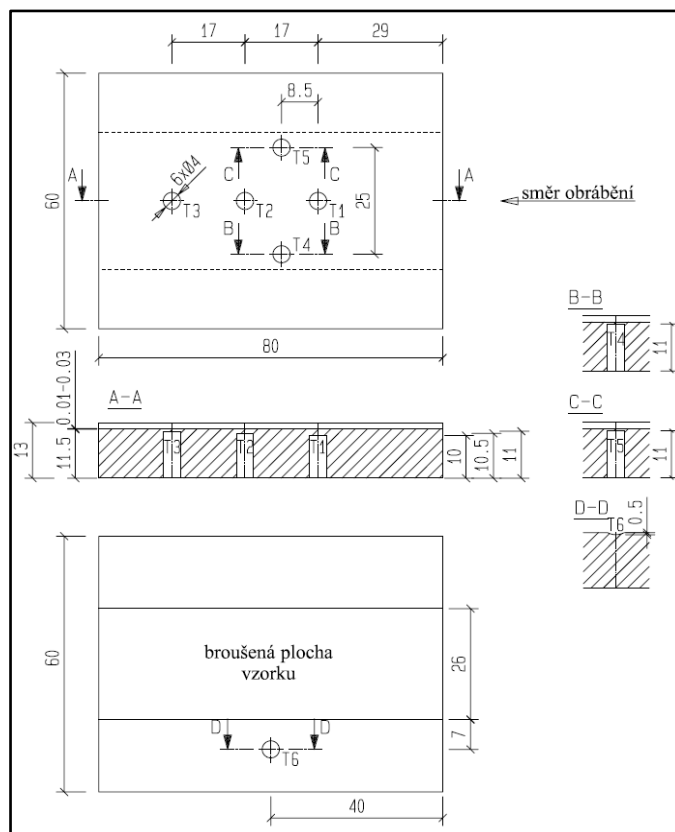
3.3.2 Měření teploty obrobku

Před každým měřením s jednotlivými procesními médii se musel nejprve orovnat kotouč jednokamenovým diamantovým orovnávačem, aby se zachovaly stejné podmínky pro každé procesní médium. Všechny vzorky byly broušeny v hloubce záběru $a_p = 0,01; 0,02$ a $0,03\text{mm}$, z důvodu otupení ostrých hran brusiva vzniklých po orovnání, což bylo důležité pro následné měření drsnosti povrchu.



Obr. 38 Broušení s využitím zkapalněného dusíku.

V rámci experimentu byla teplota obrobku při broušení měřena pomocí šesti termočlánků (T1 - T6), které byly na vzorku rozmístěny v přesně daných vzdálenostech a hloubkách podle obr. 39. Termočlánky T1 - T3 byly umístěny v ose souměrnosti nástroje, T4 a T5 byly umístěny mimo osu souměrnosti nástroje. Všechny tyto termočlánky byly umístěny ze spodní strany obrobku. Termočlánek T6 byl umístěn na povrchu obrobku pro snímání teploty v povrchové vrstvě v závislosti na použitém procesním médiu.



Obr. 39 Rozmístění termočlánků u vzorků při broušení.

Pro vyhodnocení výsledných teplot byly využity hodnoty při broušení v hloubce záběru $a_p = 0,02$ mm. Jednotlivé teploty v daných místech se na všech vzorcích pro každé médium zprůměrovaly a zapsaly do tabulky. Termočlánky T3 - T5 byly měřeny ve stejné hloubce a průměr se tedy počítal z těchto tří hodnot najednou.

Tab. 12 Hodnoty teplot v místech termočlánků při broušení bez chlazení.

BEZ CHLAZENÍ				
Termočlánek	T1	T2	T3, T4, T5	T6
T [°C]	51,9	56,5	60,5	31,5

Tab. 13 Hodnoty teplot v místech termočlánků při broušení s vírovou trubící.

VÍROVÁ TRUBICE				
Termočlánek	T1	T2	T3, T4, T5	T6
T [°C]	51,8	53,0	58,3	28,9

Tab. 14 Hodnoty teplot v místech termočlánků při broušení se stlačeným CO₂.

STLAČENÝ CO₂				
Termočlánek	T1	T2	T3, T4, T5	T6
T [°C]	51,6	49,3	46,0	31,3

Tab. 15 Hodnoty teplot v místech termočlánků při broušení se zkapalněným dusíkem.

ZKAPALNĚNÝ DUSÍK				
Termočlánek	T1	T2	T3, T4, T5	T6
T [°C]	53,8	55,3	48,4	31,1

Tab. 16 Hodnoty teplot v místech termočlánků při broušení s kapalinou EOPS 1030.

EOPS 1030				
Termočlánek	T1	T2	T3, T4, T5	T6
T [°C]	48,6	42,9	48,1	23,8

Tab. 17 Hodnoty teplot v místech termočlánků při broušení s kapalinou HOCUT 795B.

HOCUT 795B				
Termočlánek	T1	T2	T3, T4, T5	T6
T [°C]	40,2	26,0	39,1	21,2

Z naměřených hodnot je patrné, že procesní kapaliny u broušení udržely na povrchu obrobku teploty srovnatelné s okolní teplotou, proto z hlediska celkových hodnot vyšly nejnižší teploty u broušení s kapalinou HOCUT 795B.

Kapalina HOCUT 795B má oproti EOPS 1030 vyšší viskozitu, tudíž se tato kapalina stále držela na obrobku a ochlazovala jej, i když byl brousicí kotouč s přívodem chlazení v poloze mimo obrobek. Teploty měřené nejbližší broušenému povrchu (T3 - T5) udržela kapalina na maximální teplotě 39,1 °C, hodnota teploty ve vzdálenosti o 0,5 mm dál od povrchu (T2) se dokonce pohybovala okolo 26 °C. Znamená to tedy, že s přibývajícím vzdáleností od broušeného povrchu se teploty snižují. Kapalina EOPS 1030 má o trochu horší chladicí účinek, jak je vidět z naměřených hodnot v tabulce.

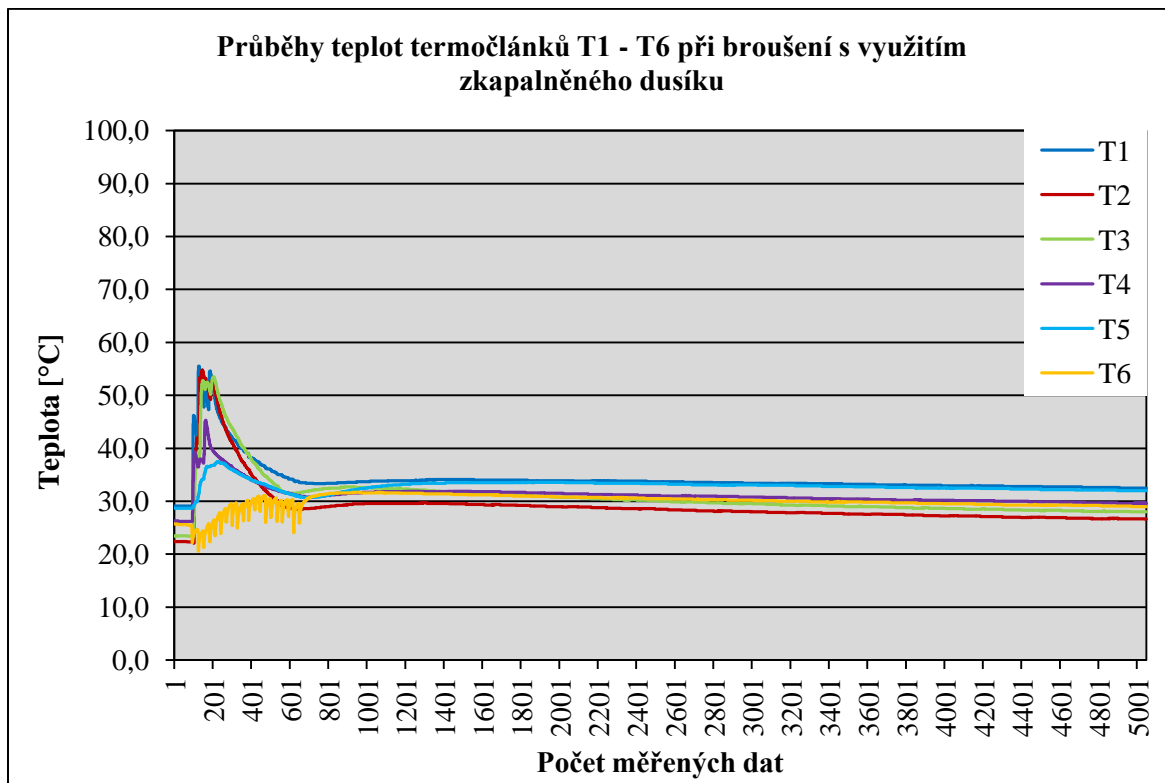


Obr. 40 Broušení s využitím procesních kapalin

Všechny použité procesní plyny ovlivnily teploty hlavně těsně pod povrchem, ve větší vzdálenosti od povrchu (T1) jsou hodnoty teplot srovnatelné s broušením bez chlazení (51,9 °C). Vlivem podchlazení zkapalněného dusíku a CO₂ jsou hodnoty teplot pod povrchem (T3 - T5) srovnatelné s hodnotami teplot při broušení s využitím procesních kapalin (dusík 48,4 °C a CO₂ 46,0 °C). Teploty dále od povrchu rostou.

Hodnoty teplot naměřené s přívodem studeného vzduchu vírové trubice jsou srovnatelné s broušením bez chlazení, kde má studený vzduch nepatrný vliv na výsledné teploty. Teploty těsně pod povrchem (T3 - T5) dosahují nejvyšších hodnot teplot (58,3 °C).

Graf č. 2 Vzorový průběh teplot jednotlivých termočlánků při broušení s dusíkem.

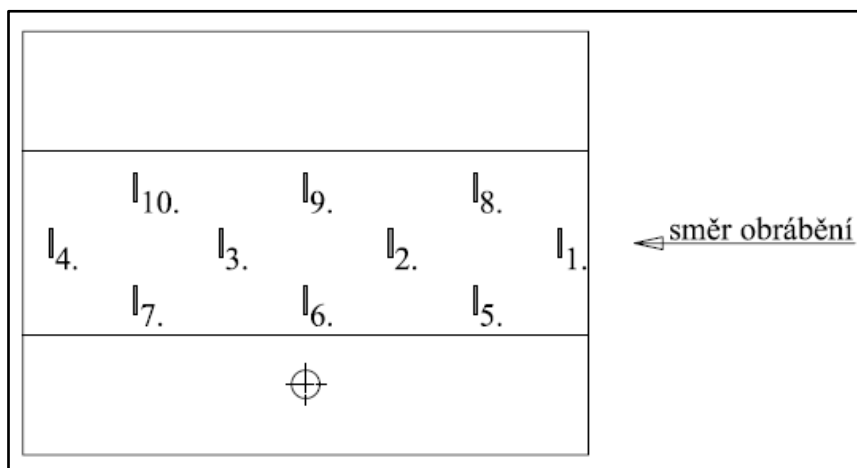


Průběhy teplot termočlánků při broušení s jednotlivými médii viz příloha.

3.3.3 Měření drsnosti povrchu

Kvalita povrchu obrobeneého vzorku je možno určit velkým počtem parametrů drsnosti, které umí profiloměr Mitutoyo SurfTest naměřit. Ze všech parametrů drsnosti byly pro experiment zvoleny parametry Ra (průměrná aritmetická úchylka), Rz (největší výška profilu), Rt (celková výška profilu).

Měření drsnosti povrchu probíhalo v místech podle obr. 41. Snímač ujede po povrchu vzdálenost 4,8 mm, z každé strany měřené délky se 0,4 mm ořízne, a vyhodnocení proběhne na dráze 4 mm. Hodnoty jednotlivých parametrů vyhodnotí ovládací software.



Obr. 41 Místa pro měření drsnosti.

U každého vzorku tedy bylo naměřeno deset hodnot drsnosti povrchu (Ra, Rz, Rt), z nichž se vypočítal aritmetický průměr, který se zapsal do tabulky. Ze všech těchto průměrných hodnot se vypočetl celkový průměr hodnot drsnosti povrchu, které jsou důležité pro srovnání mezi jednotlivými procesními médii.

Díky měření hodnot drsnosti povrchu na deseti místech bylo zjištěno, že hodnoty na začátku a konci vzorku vykazují nižší drsnost z důvodu lepšího odvodu tepla. Uprostřed vzorku se teplo shromažďuje a hodnoty drsnosti dosahují horší kvality.

Tab. 18 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti po broušení bez chlazení.

BEZ CHLAZENÍ						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
Ra [μm]	0,21	0,23	0,24	0,25	0,30	0,25
Rz [μm]	1,84	1,92	2,04	2,00	2,27	2,01
Rt [μm]	2,49	2,60	2,65	2,49	2,84	2,61

Tab. 19 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti po broušení s vírovou trubici.

VÍROVÁ TRUBICE						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
Ra [μm]	0,46	0,47	0,49	0,52	0,53	0,49
Rz [μm]	3,36	3,36	3,57	3,54	3,73	3,51
Rt [μm]	4,17	4,19	4,51	4,35	4,57	4,36

Tab. 20 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti po broušení se stlačeným CO₂.

STLAČENÝ CO ₂						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
Ra [μm]	0,35	0,37	0,42	0,43	0,49	0,41
Rz [μm]	2,68	2,79	3,10	3,03	3,68	3,06
Rt [μm]	3,59	3,43	3,90	3,90	4,81	3,93

Tab. 21 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti po broušení se zkapalněným dusíkem.

ZKAPALNĚNÝ DUSÍK						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
Ra [μm]	0,27	0,30	0,36	0,44	0,44	0,36
Rz [μm]	2,08	2,30	2,75	3,28	3,38	2,76
Rt [μm]	2,66	2,89	3,48	4,01	4,53	3,51

Tab. 22 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti po broušení s kapalinou EOPS 1030.

EOPS 1030						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
Ra [μm]	0,27	0,29	0,30	0,33	0,33	0,31
Rz [μm]	2,13	2,41	2,35	2,49	2,55	2,38
Rt [μm]	2,76	3,28	3,03	3,08	3,20	3,07

Tab. 23 Průměrné hodnoty parametrů drsnosti po broušení s kapalinou HOCUT 795 B.

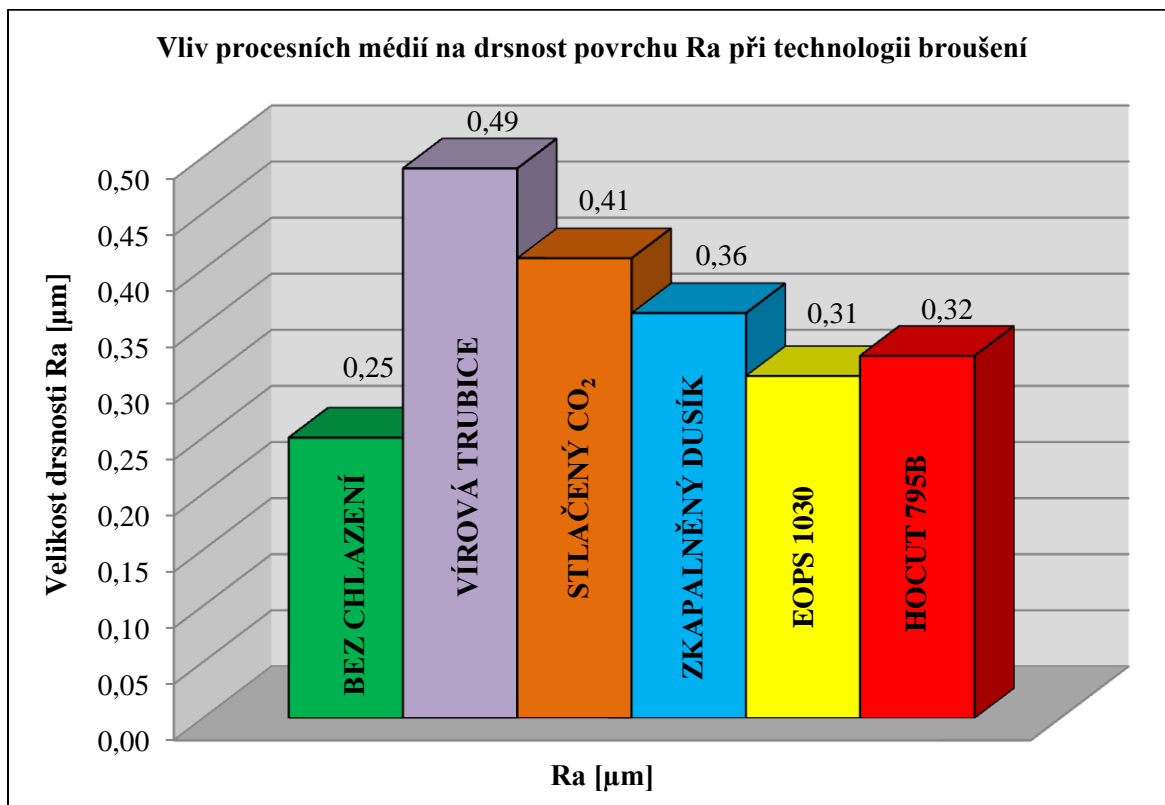
HOCUT 795 B						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
Ra [μm]	0,28	0,31	0,34	0,34	0,35	0,32
Rz [μm]	2,17	2,38	2,55	2,52	2,63	2,45
Rt [μm]	2,63	3,03	3,14	3,19	3,17	3,03

Z jednotlivých měření pro každé procesní medium jsou patrné zhoršující se hodnoty parametrů drsnosti mezi prvním a pátým vzorkem, kde např. rozdíl jednotlivých průměrných hodnot drsnosti Ra u vzorků č. 1 pro zkapalněný dusík a bez chlazení je relativně blízký (rozdíl pouze 0,06 μm), ale hodnoty u vzorků č. 5 již vykazují rozdíl 0,14 μm.

Povrchy po broušení se zkapalněným dusíkem a CO₂ vykazují výraznější průběžné zhoršování jednotlivých hodnot drsnosti, ačkoliv v porovnání s vírovou trubicí jsou průměrné hodnoty drsností nižší. Kapaliny vykazují relativně nižší průběžné zhoršování.

Pro lepší viditelnost výsledků byly celkové průměrné hodnoty parametrů drsnosti broušených povrchů zobrazeny do přehledných grafů.

Graf č. 2 Celkové průměrné hodnoty drsnosti Ra po broušení.



Z hlediska střední hodnoty drsnosti Ra byly naměřeny nejlepší hodnoty při broušení bez chlazení ($0,25\mu\text{m}$), kde navzdory vyšším teplotám oproti ostatním médiím je hodnota drsnosti nejnižší, a to z důvodu, že přejezd broušícího kotouče přes vzorek nebyl natolik dlouhý, aby teplota příliš ovlivnila drsnost povrchu.

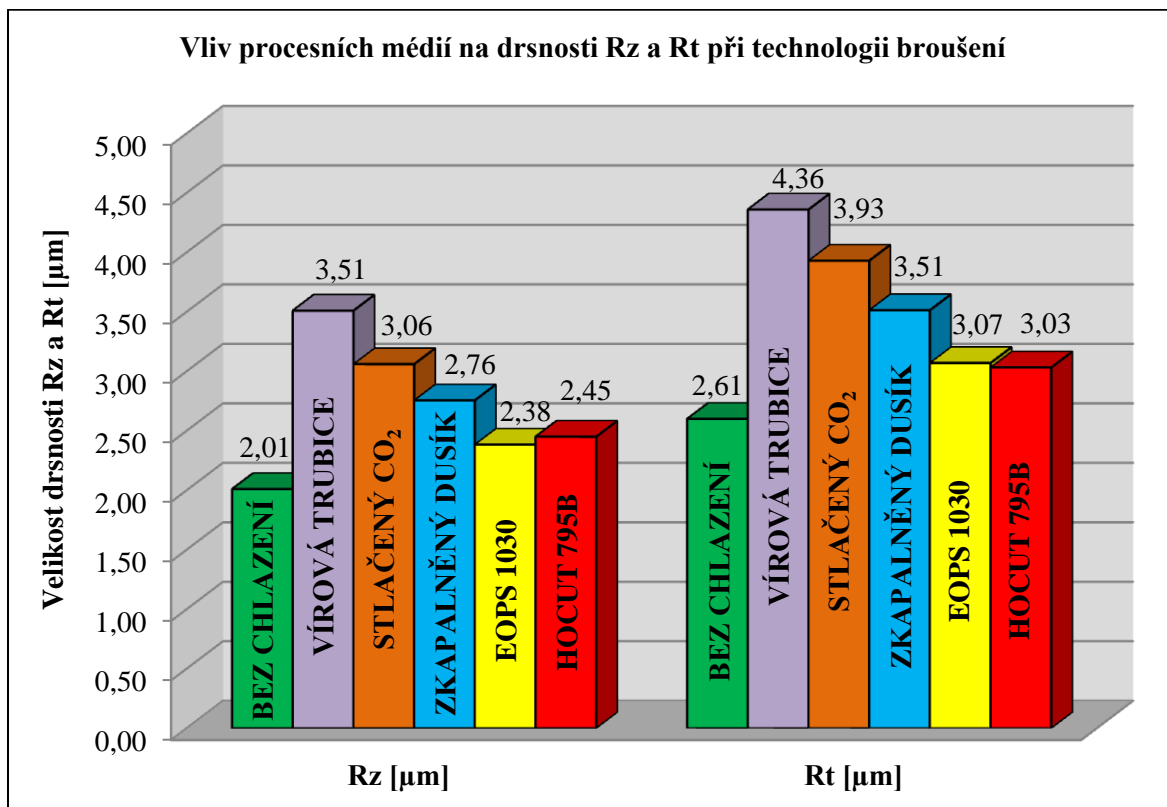
Nejvíce se této hodnotě drsnosti přiblížily kapaliny, resp. emulgační olej EOPS 1030 ($0,31\mu\text{m}$), kde je hlavní výhodou dostatečné odplavení třísek, chlazení a mazání styku nástroje a broušené plochy.

Zkapalněný dusík vykázal nejlepší hodnoty drsnosti Ra ($0,36\mu\text{m}$), v porovnání s povrchy, na které byly využity ostatní plyny. Podchlazení obrobku má příznivý vliv na hodnotu drsnosti povrchu. Stlačený CO₂ je pouze bodové chlazení, proto ovlivnil drsnost povrchu jen v místě přívodu. Po provedeném zprůměrování všech naměřených hodnot je drsnost Ra rovna $0,41\mu\text{m}$.

Nejhorší průměrné hodnoty drsnosti Ra byly naměřeny při broušení s využitím vírové trubice ($0,49\mu\text{m}$). Stlačený studený vzduch hodnotě drsnosti při technologii broušení příliš neprospěl.

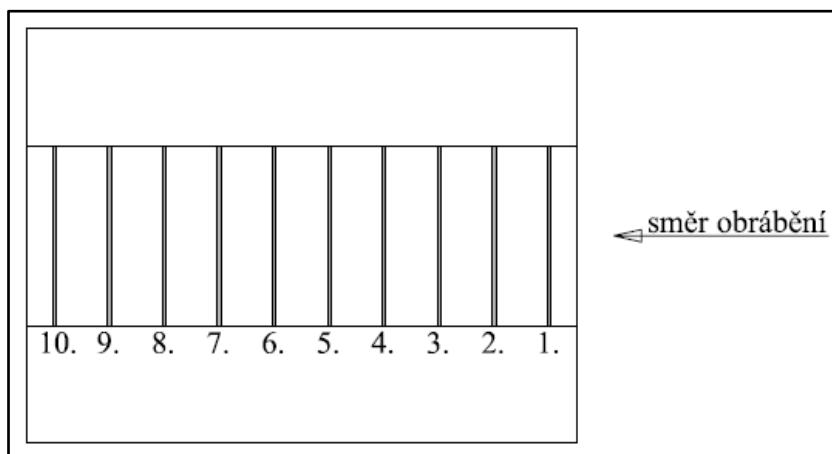
Pro možnost srovnání byly do grafu vloženy také hodnoty drsností Rz a Rt.

Graf č. 3 Celkové průměrné hodnoty drsnosti Rz a Rt po broušení.



3.3.4 Měření rozměrové přesnosti

V rámci hodnocení rozměrové přesnosti byla na broušeném vzorku měřená šířka odbroušené drážky pomocí digitálního posuvného měřítka podle obr. 42.



Obr. 42 Místa pro měření šířky drážky broušeného vzorku.

Měření šířky drážky probíhalo na deseti místech každého vzorku, z nichž se vypočítal aritmetický průměr, který se zapsal do tabulky. Z pěti vzorků každého procesního média byl vypočten celkový průměr hodnot šířky broušené drážky, který je konečnou hodnotou k porovnání mezi všemi použitými procesními médii.

Tab. 12 Průměrné hodnoty šířky drážky po broušení bez chlazení.

BEZ CHLAZENÍ						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
šířka drážky [mm]	26,15	26,17	26,19	26,18	26,17	26,17

Tab. 13 Průměrné hodnoty šířky drážky po broušení s vírovou trubici.

VÍROVÁ TRUBICE						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
šířka drážky [mm]	26,11	26,16	26,08	26,15	26,11	26,12

Tab. 14 Průměrné hodnoty šířky drážky po broušení se stlačeným CO₂.

STLAČENÝ CO₂						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
šířka drážky [mm]	26,04	25,99	25,96	25,97	26,01	25,99

Tab. 15 Průměrné hodnoty šířky drážky po broušení se zkapalněným dusíkem.

ZKAPALNĚNÝ DUSÍK						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
šířka drážky [mm]	26,16	26,10	26,14	26,07	26,07	26,11

Tab. 13 Průměrné hodnoty šířky drážky po broušení s kapalinou EOPS 1030.

EOPS 1030						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
šířka drážky [mm]	26,10	26,07	26,08	26,09	26,10	26,09

Tab. 14 Průměrné hodnoty šířky drážky po broušení s kapalinou HOCUT 795 B.

HOCUT 795 B						
Měření č.	1.	2.	3.	4.	5.	celkový průměr
šířka drážky [mm]	26,10	26,09	26,09	26,10	26,11	26,10

Na broušicím kotouči byly napsány rozměry dle normy 250 x 25 x 76 mm, kdy po přeměření na pěti místech kotouče a následném zprůměrování těchto hodnot byla zjištěna šířka kotouče 26,03 mm.

Z naměřených výsledků je patrné, že ideální hodnotě (tj. 26,03 mm) se nejvíce přiblížil rozměr šířky drážky po broušení se stlačeným CO₂ (25,99 mm). Bodové podchlazení CO₂ tak má příznivější vliv na měřený rozměr. Rozdíl mezi naměřenými průměrnými hodnotami šířky drážky odbroušené plochy s využitím ostatních plynů (dusík a vírová trubice) a procesními kapalinami je minimální (0,01 - 0,03 mm).

Nejhorší výsledky byly naměřeny při měření po broušení bez chlazení, kde o trochu vyšší teploty oproti ostatním médiím měly vliv na rozměrovou přesnost.

Hodnoty je třeba brát s určitou rezervou, a to z důvodu upnutí brousícího kotouče, který není nikdy vyvážen tak, aby byla zajištěna nulová excentricita kotouče.

4 Ekonomické vyhodnocení použitých procesních médií

V ekonomické části jsou nejprve znázorněny hodnoty fixních nákladů pro jednotlivá procesní média. Druhá část je zaměřena na provozní náklady všech procesních médií vztažených na výrobu experimentálních vzorků po dobu jednoho roku (2015) při jednosměnném osmihodinovém provozu.

4.1 Fixní náklady (vstupní)

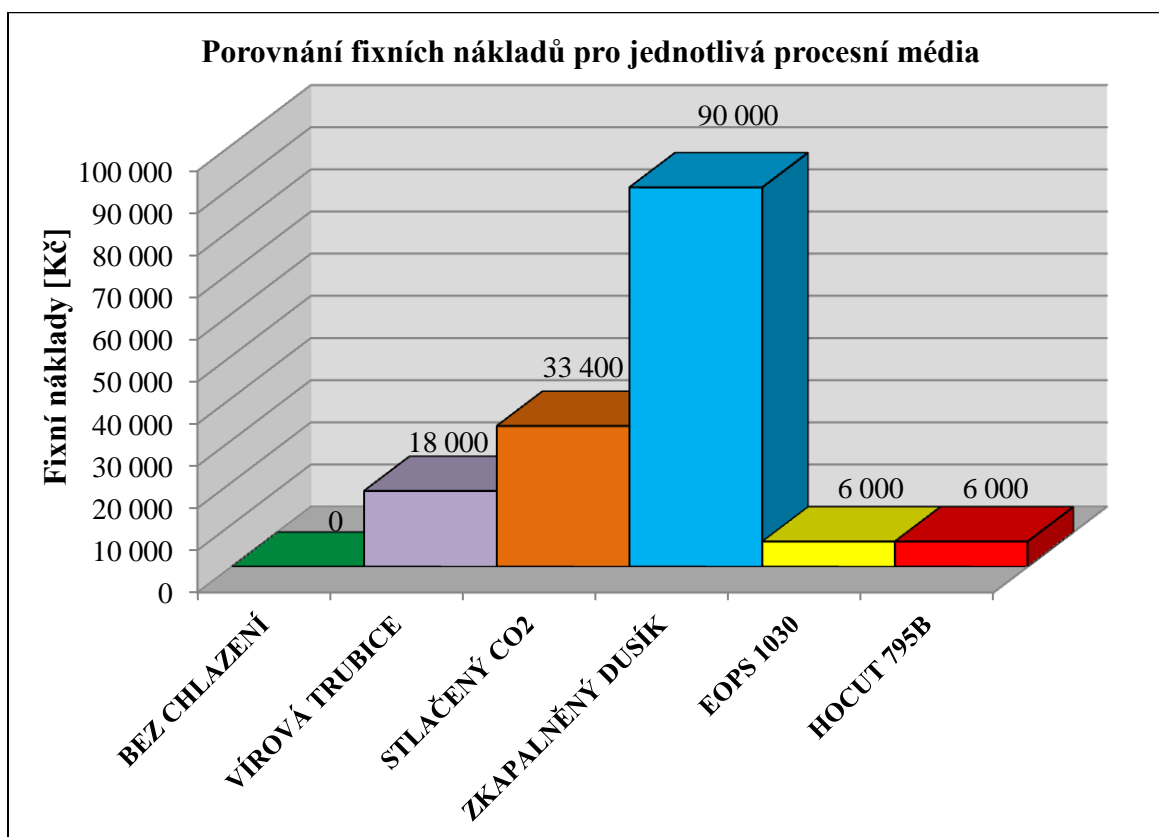
Do fixních nákladů se započítávají všechna zařízení a příslušenství potřebné ke správnému provozu s daným procesním médiem. Při užívání stlačeného CO₂ a zkapalněného dusíku jsou ve fixních nákladech započteny dvě tlakové lahve (CO₂) a dvě Dewarovy nádoby (dusík) z důvodu plnění a zajištění nepřetržitého provozu.

Tab. 15 Přehled fixních nákladů pro jednotlivá procesní média.

BEZ CHLAZENÍ	
Při broušení bez procesního média nevznikají žádné fixní náklady	
VÍROVÁ TRUBICE	
vírová trubice	11 000 Kč
kompresor	6 000 Kč
příslušenství (hadice, držáky)	1 000 Kč
celkové fixní náklady	18 000 Kč
STLAČENÝ CO₂	
2 x plná tlaková láhev 20 kg CO ₂	2 x 5 200 Kč
řídící aparatura, škrtecí ventil, hadice, držáky	20 000 Kč
odsávací zařízení	3 000 Kč
celkové fixní náklady	33 400 Kč
ZKAPALNĚNÝ DUSÍK	
2 x Dewarova nádoba 32 l	2 x 25 000 Kč
přečerpávání, řídící jednotka, hadice, držáky	40 000 Kč
celkové fixní náklady	90 000 Kč
EOPS 1030	
externí čerpadlo	5 000 Kč
příslušenství (hadice, držáky)	1 000 Kč
celkové fixní náklady	6 000 Kč
HOCUT 795B	
externí čerpadlo	5 000 Kč
příslušenství (hadice, držáky)	1 000 Kč
celkové fixní náklady	6 000 Kč

Pro lepší přehlednost se hodnoty fixních nákladů jednotlivých procesních médií vložily do přehledného grafu.

Graf č. 8 Porovnání fixních nákladů pro všechna média při technologii broušení.



4.2 Provozní náklady

Do provozních nákladů se zahrnuje energetické vytížení připojených zařízení a množství procesního média spotřebovaného na obrobení experimentálního vzorku (délka 80mm), při nepřetržitém broušení po dobu jednoho roku (2015) za předpokladu jedné osmihodinové směny denně (tj. rok 2015, 251 pracovních dnů, tzn. 2008 pracovních hodin). Jedná se o idealizovanou výrobu, tzn. výroba na 100%.

Vychází se z experimentálního měření, které probíhalo při hloubce záběru $a_p = 0,01, 0,02$ a $0,03$ mm (pro každou hloubku 2x, tzn. celkem 6x) a pro vyjiskření bylo potřeba 14x přejet přes obrobek (jedno přejetí trvá cca 2,5 s).

Výpočet času na výrobu jednoho obrobku:

$$t_1 = 14 \cdot 2,5 \cdot 6 = 210 \text{ s} \quad (1)$$

Výpočet počtu kusů vyrobených za jeden den (8 hod = 480 min = 28 800 s):

$$n_1 = \frac{28800}{210} = 137 \text{ ks / den} \quad (2)$$

Výpočet počtu kusů vyrobených za jeden rok (251 dní):

$$n = 137 \cdot 251 = 34387 \text{ ks / rok} \quad (3)$$

BEZ CHLAZENÍ

Při broušení bez procesního média nevznikají žádné provozní náklady

Hodnoty pro výpočet provozních nákladů při broušení s využitím vírové trubice:

- cena odběru elektrické energie: 4,8 Kč/kWh,
- kompresor odebírá: 2,2 kW/h.

VÍROVÁ TRUBICE

Roční spotřeba elektrické energie:

$$e_{VT} = 2,2 \cdot 4,8 \cdot 8 \cdot 251 = 21\,205 \text{ Kč / rok} \quad (4)$$

celkové provozní náklady:

21 205 Kč/rok.

Hodnoty pro výpočet provozních nákladů při broušení se stlačeným CO₂:

- cena odběru elektrické energie: 4,8 Kč/kWh,
- řídicí aparatura odebírá: 0,5 kW/h,
- odsávací zařízení odebírá: 0,17 kW/h,
- průtočnost CO₂ přes dvě kapiláry 4,4 g/s,
- doplnění jedné lahve CO₂: 480 Kč.

STLAČENÝ CO₂

Roční spotřeba elektrické energie:

$$e_{CO_2} = (0,5 + 0,17) \cdot 4,8 \cdot 8 \cdot 251 = 6\,458 \text{ Kč / rok} \quad (5)$$

roční spotřeba CO₂:

- jedno přejetí vzorku trvá 2,5 s,
- řídicí jednotka fouká CO₂ pouze při přejezdu brousicího kotouče přes obrobek, tzn. 1 s z přejetí,
- obrobek se brousí 2x pro každou hloubku záběru (tzn. 6x),
- pro jednu hloubku záběru řídicí jednotka fouká 14 s,

$$m_{CO_2} = 34\,387 \cdot 14 \cdot 6 \cdot 4,4 = 12\,709\,435 \text{ g / rok} = 12\,709 \text{ kg / rok} \quad (6)$$

počet plnění lahve za rok (20 kg CO₂):

$$P_{CO_2} = \frac{12\,709}{20} = 636x \quad (7)$$

- za rok se musí lahve s CO₂ plnit 634x, z důvodu nákupu dvou plných lahví, které jsou započítány ve fixních nákladech,

náklady na CO₂ za rok:

$$N_{CO_2} = 634 \cdot 480 = 304\,320 \text{ Kč / rok} \quad (8)$$

celkové provozní náklady:

310 378 Kč/rok.

Hodnoty pro výpočet provozních nákladů při broušení se zkapalněným dusíkem:

- cena odběru elektrické energie: 4,8 Kč/kWh,
- řídicí jednotka odebírá: 0,5 kWh,
- průtočnost dusíku: 6,47 g/s,
- do Dewarovy nádoby 32 l se vejde 25,89 kg dusíku,
- doplnění jedné Dewarovy nádoby dusíkem: 1 880 Kč.

ZKAPALNĚNÝ DUSÍK	
Roční spotřeba elektrické energie:	
$e_{DUSÍK} = 0,5 \cdot 4,8 \cdot 8 \cdot 251 = 4819 \text{ Kč / rok}$	(9)
roční spotřeba DUSÍKU:	
- obrobění jednoho vzorku trvá 210 s, viz (1),	
- řídicí jednotka stříká dusík neustále, tzn. 210 s/jeden obrobek,	
$m_{DUSÍK} = 34\,387 \cdot 210 \cdot 6,47 = 46\,721\,617 \text{ g / rok} = 46\,722 \text{ kg / rok}$	(10)
počet plnění nádoby za rok (25,1 kg dusíku):	
$P_{DUSÍK} = \frac{46\,722}{25,89} = 1805x$	(11)
náklady na DUSÍK za rok:	
$N_{DUSÍK} = 1805 \cdot 1880 = 3\,393\,400 \text{ Kč / rok}$	(12)
celkové provozní náklady:	3 393 400 Kč/rok.

Hodnoty pro výpočet provozních nákladů při broušení s kapalinou EOPS 1030:

- cena odběru elektrické energie: 4,8 Kč/kWh,
- externí čerpadlo odebírá: 0,1 kWh,
- vodné a stočné: 96 Kč/m³,
- průtočnost kapaliny: 0,27 l/s,
- z 1 l koncentráту vytvoříme 20 l roztoku,
- nádoba pro 250 l kapaliny, za rok 4 x výměna,
- kanystr 10 l kapaliny EOPS 1030: 1 700 Kč.

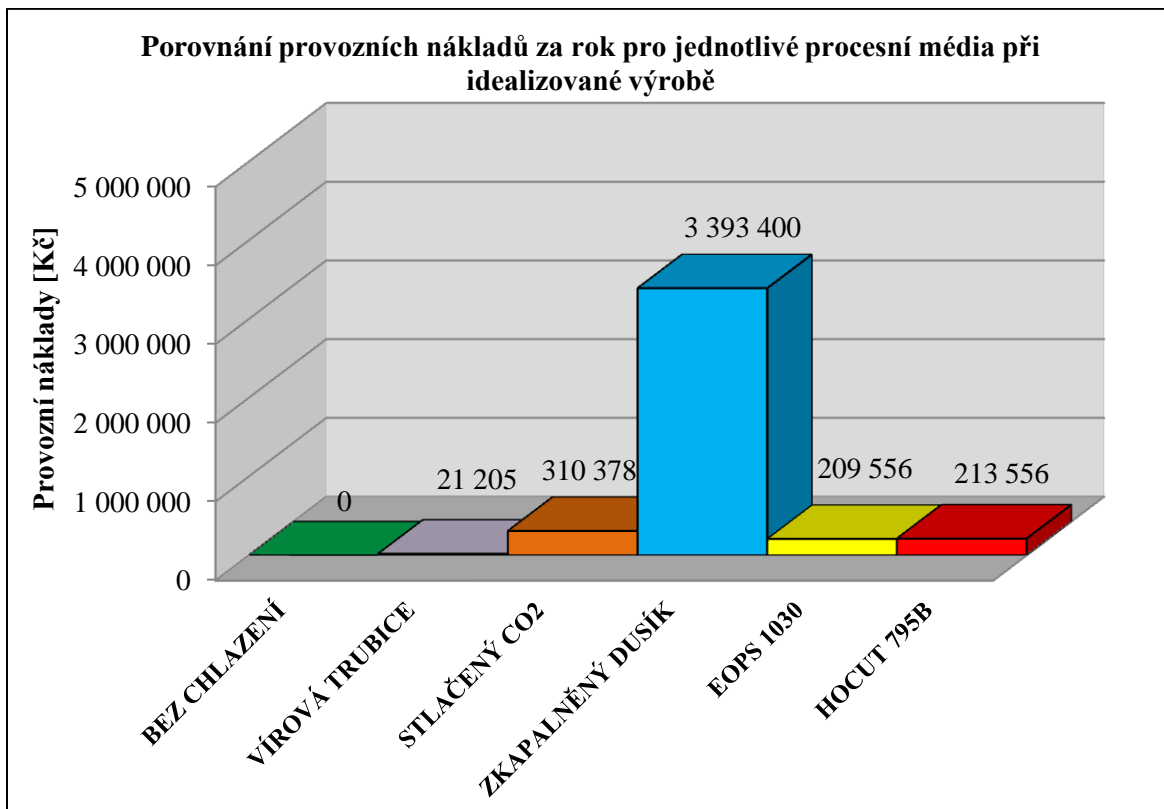
EOPS 1030	
Roční spotřeba elektrické energie:	
$e_{EOPS} = 0,1 \cdot 4,8 \cdot 8 \cdot 251 = 964 \text{ Kč / rok}$	(13)
náklady na kapalinu EOPS 1030 za rok:	
- za rok spotřeba 1000 l roztoku, tzn. 50 l kapaliny EOPS 1030,	
$N_{EOPS} = 1700 \cdot 5 = 8500 \text{ Kč / rok}$	(14)
náklady na vodu za rok:	
- za rok spotřeba 1000 l roztoku, tzn. 950 l vody,	
$N_{voda} = 0,95 \cdot 96 = 92 \text{ Kč / rok}$	(15)
ekologická likvidace procesních kapalin:	
- likvidace 50 l kapaliny = 10 000 Kč, tzn. 1l = 200 Kč,	
$L_{kap.} = 1000 \cdot 200 = 200\,000 \text{ Kč / rok}$	(16)
celkové provozní náklady:	209 556 Kč/rok.

Hodnoty pro výpočet provozních nákladů při broušení s kapalinou HOCUT 795B:

- cena odběru elektrické energie: 4,8 Kč/kWh,
- externí čerpadlo odebírá: 0,1 kW/h,
- vodné a stočné: 96 Kč/m³,
- průtočnost kapaliny: 0,27 l/s,
- z 1 l koncentrátu vytvoříme 20 l roztoku,
- nádoba pro 250 l kapaliny, za rok 4 x výměna,
- kanystr 10 l kapaliny HOCUT 795B: 1 700 Kč.

HOCUT 795B	
Roční spotřeba elektrické energie:	
$e_{HOCUT} = 0,1 \cdot 4,8 \cdot 8 \cdot 251 = 964 \text{ Kč / rok}$	(13)
náklady na kapalinu HOCUT 795B za rok:	
- za rok spotřeba 1000 l roztoku, tzn. 50 l kapaliny HOCUT 795B,	
$N_{HOCUT} = 2500 \cdot 5 = 12\,500 \text{ Kč / rok}$	(14)
náklady na vodu za rok:	
- za rok spotřeba 1000 l roztoku, tzn. 950 l vody,	
$N_{voda} = 0,95 \cdot 96 = 92 \text{ Kč / rok}$	(15)
ekologická likvidace procesních kapalin:	
- likvidace 50 l kapaliny = 10 000 Kč, tzn. 1l = 200 Kč,	
$L_{kap.} = 1000 \cdot 200 = 200\,000 \text{ Kč / rok}$	(16)
celkové provozní náklady:	213 556 Kč/rok.

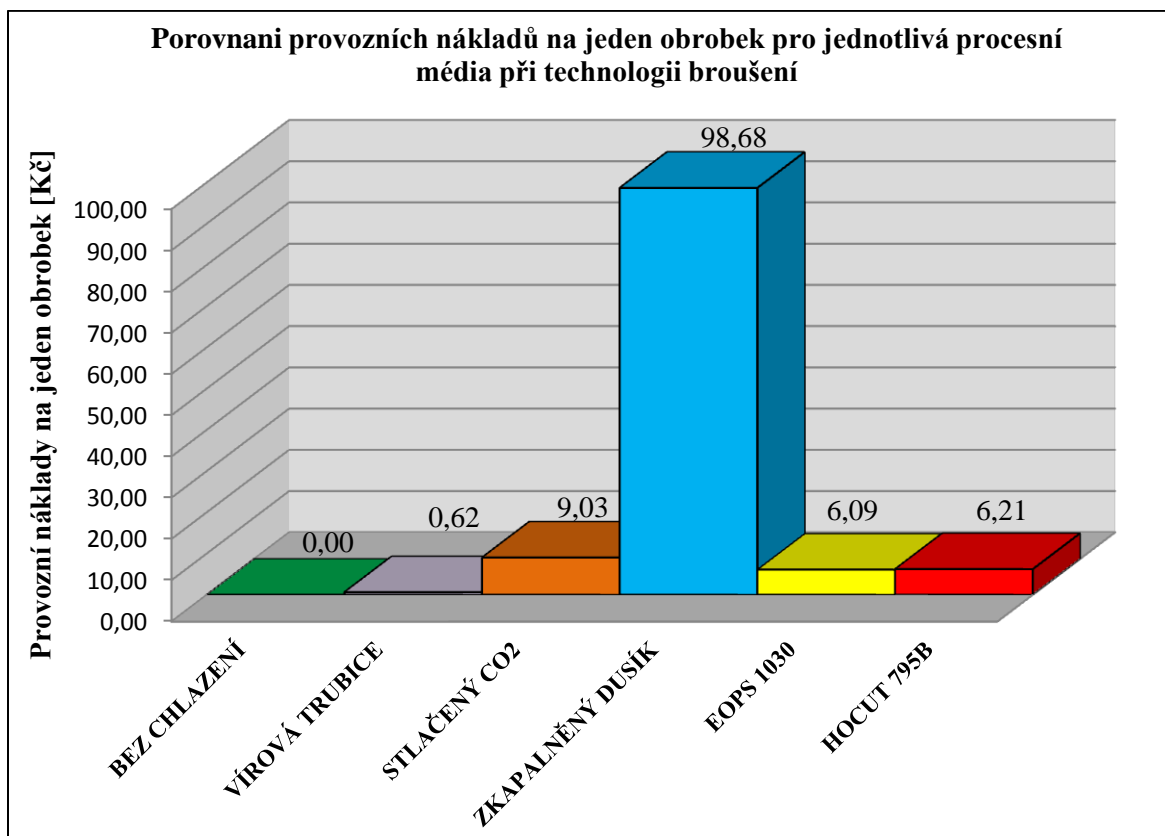
Graf č. 9 Porovnání provozních nákladů pro všechny média při technologii broušení.



Tab. 16 Přehled ročních nákladů při idealizované výrobě, vztahované na jeden výrobek.

Procesní média	Provozní náklady za 1 rok	Provozní náklady na 1 obrobek
BEZ CHLAZENÍ	bez nákladů	
VÍROVÁ TRUBICE	21 205 Kč	0,62 Kč
STLAČENÝ CO₂	310 378 Kč	9,03 Kč
ZKAPALNĚNÝ DUSÍK	3 393 400 Kč	98,68 Kč
EOPS 1030	209 556 Kč	6,09 Kč
HOCUT 795B	213 556 Kč	6,21 Kč

Graf č. 10 Porovnání provozních nákladů na jeden obrobek pro všechny procesní média.



Roční provozní náklady byly vypočteny pro idealizovanou výrobu, tzn. výrobu s 100% účinností, beze ztrát, kde by se přebrousilo 34 387 ks obrobků za jeden rok. V praxi se hodnoty od idealizované výroby liší, jelikož se počítá se ztrátami vzniklé při procesu obrábění (např. seřízení stroje, orovnění broušícího kotouče, výměna obrobku, výměna nádoby s následným natlakováním dusíku atd.).

Pro přehlednost byly provozní náklady přepočítány pro sériovou výrobu, kde se předpokládá účinnost výroby 80%. U sériové výroby se snížily roční provozní náklady, ale také počet přebroušených obrobků (27 509 ks/rok).

U kusové výroby se počítalo s účinností 66% idealizované výroby. Počet broušených obrobků je 22 695 ks/rok.

Tab. 17 Přehled provozních nákladů při sériové výrobě.

Procesní média	Provozní náklady za 1 rok	Provozní náklady za 1 měsíc
BEZ CHLAZENÍ	bez nákladů	
VÍROVÁ TRUBICE	16 964 Kč	1 414 Kč
STLAČENÝ CO₂	248 302 Kč	20 692 Kč
ZKAPALNĚNÝ DUSÍK	2 714 720 Kč	226 227 Kč
EOPS 1030	167 645 Kč	13 970 Kč
HOCUT 795B	170 845 Kč	14 237 Kč

Tab. 18 Přehled provozních nákladů při kusové výrobě.

Procesní média	Provozní náklady za 1 rok	Provozní náklady za 1 měsíc
BEZ CHLAZENÍ	bez nákladů	
VÍROVÁ TRUBICE	13 995 Kč	1 166 Kč
STLAČENÝ CO₂	204 849 Kč	17 071 Kč
ZKAPALNĚNÝ DUSÍK	2 239 644 Kč	186 637 Kč
EOPS 1030	138 307 Kč	11 526 Kč
HOCUT 795B	140 947 Kč	11 746 Kč

5 Diskuze výsledků

Hlavní význam této práce spočívala v porovnání použitých procesních médií (bez chlazení, vírová trubice, stlačený CO₂, zkapalněný dusík, kapaliny EOPS 1030 a HOCUT 795B) na technologii broušení z hlediska dosažených řezných sil, jednotlivých teplot určených v různých místech vzorku, celkové drsnosti povrchu a přesnosti šířky broušené drážky. Do porovnání se také zahrnuje ekonomické a ekologické hledisko všech použitých procesních médií.

V první kapitole je popsána základní teorie broušení z hlediska vhodného použití typu nástroje a určitého tvaru broušených ploch. Popisují se zde jednotlivé části broušícího kotouče, které jsou důležité pro dosažení požadovaných vlastností na broušeném povrchu, dále pak řezné podmínky a tepelné jevy vzniklé při tomto procesu ovlivněné procesními kapalinami a plyny.

Důležitou součástí první kapitoly je souhrn informací o procesních kapalinách a plynech, popisující jejich vlastnosti a rozdělení podle možnosti použití. Zatímco u procesních kapalin jsou popsány vlastnosti všeobecně, u plynů se jedná hlavně o vlastnosti zaměřené na plyny použité v experimentu.

Druhá kapitola je zaměřena na popis parametrů strojů použitých při experimentu, ale také všech přístrojů a zařízení nezbytných k měření.

V kapitole třetí, experimentální, je nejprve popsán postup přípravy vzorků, na kterých měření probíhalo. Dále je rozepsána metodika měření jednotlivých měřicích parametrů při broušení s využitím atmosférického vzduchu (bez chlazení), vírové trubice, CO₂, zkapalněného dusíku a kapalin EOPS 1030 a HOCUT 795B.

Vlastní měření probíhalo dle popsané metodiky za stejných řezných podmínek a všechny výsledky byly zapsány do tabulek, popř. grafů. Výsledky naměřené s využitím těchto šesti procesních médií bylo možné porovnat mezi sebou jak z hlediska měřených parametrů (řezná síla, teplota obrobku, drsnost povrchu a rozměrová přesnost), tak i z hlediska energetického, ekonomického a ekologického.

Zhodnocení výsledků řezných sil

Nejdůležitějším zjištěním při měření řezných sil při technologii broušení byly hodnoty naměřené s využitím zkapalněného dusíku, kde velké podchlazení přineslo výrazné navýšení řezných sil v porovnání s ostatními použitými médii.

Nejlepší hodnoty řezných sil byly naměřeny při broušení s procesními kapalinami, resp. nejnižší hodnota byla naměřena s kapalinou HOCUT 795B. Kapaliny tedy neplní pouze chladicí, ale také mazací účinek, který má na řezné síly příznivý vliv.

Bodové chlazení stlačeného CO₂ příliš hodnoty řezných sil neovlivnilo a byly srovnatelné s hodnotami naměřenými bez chlazení. Z plynů se hodnotám řezných sil s použitím kapalin nejvíce přiblížilo broušení s přívodem studeného vzduchu přes vírovou trubici.

Zhodnocení výsledků teplot obrobku

U měření teplot při broušení se projeví vlastnosti procesních kapalin, které neměly za úkol podchladiť obrobek jako procesní plyny, ale udržet konstantní teplotu. Výhodou kapalin je, že neustále zůstává na obrobku a chladí jej i po přejezdu broušicího kotouče, kdežto plyny chladí pouze v místě styku kotouče s obrobkem.

Velké podchlazení zkapalněného dusíku a CO₂ dokázaly snížit teploty u termočlánků T3 – T5, které byly umístěny nejbližší povrchu, s rostoucí vzdáleností od povrchu (T2 a T1) teploty stoupají.

Hodnoty teplot naměřené s využitím vírové trubice a bez použití procesního média vykazují opačné hodnoty, kdy těsně pod povrchem byly naměřené teploty nejvyšší a s přibývajícím vzdáleností od povrchu teploty klesají.

Zhodnocení výsledků drsnosti

Vyšší teploty vzniklé při broušení bez chlazení neovlivnily hodnoty drsnosti a byly nejnižší, kdežto u přibližně stejných teplot s využitím vírové trubice se hodnoty drsnosti vyšplhaly na dvojnásobnou hodnotu.

Procesní kapaliny prokázaly své výhodné vlastnosti při dostatečném odplavení třísek, ochlazení obrobku a kvalitním mazáním styku broušicího nástroje s obrobkem.

Drsnost povrchu po broušení s procesními plyny (CO₂ a zkapalněný dusík) vykazovaly mírné zhoršení, přesto lze konstatovat, že podchlazení má příznivý vliv na konečnou drsnost povrchu. Zkapalněný dusík v tomto ohledu využívá vlastnosti kapaliny.

Zhodnocení výsledků šířky broušené drážky

Měřené hodnoty byly ovlivněny mírnou excentricitou kotouče, která mohla být způsobena vloženými papírky mezi přírubou a broušicím kotoučem při upínání.

Naměřené hodnoty při broušení s využitím vírové trubice, zkapalněného dusíku a obou procesních kapalin vyšly s minimálními rozdíly. Vyšší teploty při broušení bez chlazení mírně zhoršily i konečnou šířku broušené drážky.

Zhodnocení procesních médií

Výhody procesních plynů:

- dobrý čistící účinek (ofuk obrobku i broušicího kotouče),
- při použití plynů nebylo zapotřebí odmaštění obrobku, jak je tomu u procesních kapalin (z důvodu smíchání nečistot s kapalinou),
- procesní plyny vykazovali snížení teploty prostředí i ve styku broušicího nástroje s obrobkem oproti kapalinám, které spíše udržovali teploty okolí.

Výhody procesních kapalin:

- odplavuje třísky z obrobku, zároveň má chladicí a mazací účinek,
- použitá procesní kapalina steče ze stroje přes filtr zpět do nádoby a může se znovu používat (kdežto plyny se ztratí v okolí),
- kapaliny snížily hodnoty řezných sil a drsnosti.

U všech použitých procesních médií muselo po experimentu měření teplot dojít k zakonzervování broušené plochy před následným měřením drsnosti a rozměrové přesnosti (šířky drážky). Nejnáchylnější byly vzorky po broušení s využitím chlazení CO₂ a zkapalněného dusíku.

Zhodnocení ekonomických výsledků

Z ekonomického hlediska se řešily roční náklady fixní a provozní, které se nejprve vyřešily pro tzv. ideální výrobu beze ztrát (100%), s následným přepočítáním na sériovou (80%) a kusovou (66%) výrobu. Do provozních nákladů se také započítaly náklady spojené s ekologickou likvidací procesních kapalin. U plynů se ekologie řešila pouze u stlačeného CO₂, kde se oxid uhličitý odsál z místa řezu pomocí odsávacího zařízení, které je započteno ve fixních nákladech.

Pořizovací náklady na zařízení a příslušenství pro použití procesních plynů k broušení jsou podstatně vyšší oproti kapalinám, zvláště pro zkapalněný dusík.

Při broušení bez chlazení nebylo zapotřebí žádných pořizovacích, ani provozních nákladů, kdežto při použití procesních médií provozní náklady narůstaly. Náklady na provoz vírové trubice byly spojeny pouze s energií spotřebovanou kompresorem dodávající stlačený vzduch do vírové trubice.

Provozní náklady na broušení s využitím CO₂ a zkapalněného dusíku byly spojeny hlavně s vysokou cenou procesních plynů při velké spotřebě, nemožností zachycení a opětovného použití jako v případě kapalin.

Náklady na procesní kapaliny pro broušení jsou v porovnání s plyny zanedbatelné, a to z důvodu neustálého koloběhu kapaliny. Naopak vysoké náklady jsou spojeny s ekologickou likvidací kapaliny.

Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na výzkum vlivu chlazení kapalnou a plynnou látkou na obráběcí soustavu, resp. výsledek obráběcího procesu, při technologii broušení.

Hlavním cílem diplomové práce tedy bylo porovnání výsledků s využitím technických plynů a kapalin, jako procesního média, při technologii broušení z hlediska strojního, fyzikálně-chemického, energetického, ekologického a ekonomického.

Jako kapalná média byly zvoleny kapaliny EOPS 1030 a HOCUT 795B. Mezi plynná média byl zvolen stlačený oxid uhličitý, zkapalněný dusík, studený vzduch vírové trubice a také atmosférický vzduch (bez chlazení).

Všechny tyto média a zároveň i jednotlivé měřené parametry (řezné síly, teplota obrobku, drsnost povrchu a rozměr šířky broušené drážky) byly součástí výzkumu realizovaného v rámci projektu TA03010492 - Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů (2013-2015, TA0/TA), jehož poskytovatelem je Technologická agentura České republiky.

Součástí zhodnocení výsledků byly ekonomické a ekologické náklady na technologii broušení pro jednotlivá procesní média, a to jak z hlediska pořizovacích (fixních) nákladů na pořízení přístrojů a příslušenství, tak i z hlediska nákladů provozních (variabilních), do kterých byla zahrnuta spotřebovaná elektrická energie a spotřeba jednotlivých procesních médií.

Konečným zhodnocením této diplomové práce se dospělo k následujícím závěrům:

Řezné síly

Z hlediska všech naměřených hodnot řezných sil při technologii broušení pro jednotlivá procesní média byly hodnoty s využitím zkapalněného dusíku výrazně nejvyšší, tudíž velké podchlazení je pro řezné síly nevhodné.

Ostatní použité plyny vykazovaly hodnoty řezných sil podobné jako při broušení bez použití chladicího média.

Nejlepší hodnoty řezných sil byly naměřeny při broušení s procesními kapalinami, kde je hlavní výhodou oproti plynům jejich mazací a chladicí schopnost, která hodnoty řezných sil snižuje.

Teploty obrobku

Při měření teplot byly zjištěny rozdíly mezi použitými kapalinami a plyny. Zatímco kapaliny díky svým chladícím a mazacím vlastnostem udržovaly téměř konstantní teplotu v celém obrobku, u jednotlivých plynů se teploty měnily.

Podchlazení stlačeného CO₂ a zkapalněného dusíku dokázalo snížit teploty těsně pod povrchem, ale s rostoucí vzdáleností od povrchu účinek plynů vymizel a teplota stoupala.

Teploty naměřené bez chlazení a s vírovou trubicí měly opačnou tendenci, kdy s rostoucí vzdáleností od broušeného povrchu teplota klesala.

Drsnost povrchu

Nejnižších hodnot drsnosti povrchu bylo naměřeno při broušení bez chlazení, ačkoliv vykazaly nejvyšší teploty.

Procesní kapaliny opět prokázaly dobré chladicí a mazací vlastnosti, a díky dostatečnému odplavení třísek byly naměřené nižší hodnoty.

U naměřených hodnot drsností za velkého podchlazení při broušení s CO₂ a zkapalněným dusíkem došlo v porovnání s kapalinami k mírnému zhoršení.

Šířka broušené drážky

Vyšší teploty při broušení bez chlazení a s vírovou trubicí nepatrně zhoršily naměřené hodnoty šířky broušené drážky.

U ostatních procesních médií, kromě CO₂, byla naměřená šířka broušené drážky přibližně stejná.

Tab. 19 Porovnání všech měřených parametrů pro jednotlivá procesní média.

Procesní média	Kolmá řezná síla F_z [N]	Teplota $T_3 - T_5$ [°C]	Drsnost R_a [μm]	Šířka drážky b [mm]
BEZ CHLAZENÍ	79,6	60,5	0,25	26,17
VÍROVÁ TRUBICE	68,9	58,3	0,49	26,12
STLAČENÝ CO₂	76,9	46,0	0,41	25,99
ZKAPALNĚNÝ DUSÍK	114,8	48,4	0,36	26,11
EOPS 1030	60,5	48,1	0,31	26,09
HOCUT 795B	58,1	39,1	0,32	26,10

Z hlediska všech měřených parametrů pro technologii broušení vyšly nejlepší výsledky při využití procesních kapalin (HOCUT 795B a EOPS 1030), které prokázaly své dobré chladicí a mazací vlastnosti.

Výsledným hodnotám naměřených s procesními kapalinami se z plynů nejvíce přiblížilo užití stlačeného CO₂, kde bodové podchlazení při broušení mělo v určitých měřených parametrech příznivý vliv.

Výsledky naměřené pomocí vírová trubice, zkapalněného dusíku a atmosférického vzduchu (bez chlazení) mírně zaostávaly za výsledky ostatních použitých médií.

Použití jednotlivých procesních médií při broušení povrchu je především otázkou zhodnocení vlastností budoucího výrobku s ohledem nejen na drsnost povrchu, ale i na fyzikální a chemické vlastnosti.

Důležitým kritériem pro konečný výběr procesního média byly náklady spojené s jednotlivými médii, a to jak fixními, tak provozními.

Do fixních (vstupních) nákladů se započítaly pouze ceny přístrojů a příslušenství, které byly zapotřebí ke spuštění provozu pro dané procesní médium.

V provozních nákladech byla kromě spotřebované energie a ceny samotného média (CO₂, dusík a kapaliny) započtena i ekologická likvidace, která se zahrnuje pouze do nákladů procesních kapalin. U CO₂ se likvidace řešila pomocí odsávacího zařízení, ostatní plyny se ztratily, příp. odpařily v okolním prostředí bez ekologických následků.

Tab. 20 Porovnání ročních nákladů na procesní média při idealizované výrobě.

Procesní média	Fixní náklady [Kč]	Provozní roční náklady [Kč]	Náklady na jeden obrobek [Kč]
BEZ CHLAZENÍ	bez nákladů	bez nákladů	bez nákladů
VÍROVÁ TRUBICE	18 000	21 205	0,62
STLAČENÝ CO₂	33 400	310 378	9,03
ZKAPALNĚNÝ DUSÍK	90 000	3 393 400	98,68
EOPS 1030	6 000	209 556	6,09
HOCUT 795B	6 000	213 556	6,21

Každý z jednotlivých procesních médií má při broušení své přednosti, ale rovněž slabá místa, proto je pro určení nejlepšího způsobu nutno zvážit jednotlivé kvalitativní, kvantitativní a ekonomické požadavky a stanovit optimální formu za předpokladu požadovaných aspektů finálního produktu.

Použitá literatura

- [1] GAZDA, J., JERSÁK, Jan. *Příspěvek k procesu broušení kovů*. 1. vyd. V Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2012. ISBN 9788074145179.
- [2] BARTUŠEK, T. *Účinek procesní kapaliny na technologii broušení a kvalitu obrobených součástí* [online]. Liberec, 2008 [cit. 2015-02-27]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/2605>. Diplomová práce. TUL. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Jersák, CSc.
- [3] MÁDL, J., BARCAL, J. *Základy technologie II*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-800-1037-331.
- [4] INŽ. HLUCHÝ, Miroslav. *Strojírenská technologie*. 2. vyd. Praha 1: SNTL, 1969. Typ. číslo L 13-C2-III-84/22266-VII, ISBN -.
- [5] JERSÁK, Jan. *Učební publikace k přednáškám: Abrasivní metody obrábění*. Liberec 2014 [cit. 2015-02-27], 51 s.
- [6] BUMBÁLEK, B., OŠŤÁDAL, B., ŠAFR, E. *Řezné kapaliny*. 1.vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1963. 136 s. ISBN -.
- [7] TECHNICKÁ UNIVERZITA, Liberec. Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů: Etapa 1 – "Výzkum chlazení u technologických procesů". [online]. 2013, s. 36 [cit. 2015-03-03].
- [8] BSH HOLICE, a.s., *Holice: BPH 320 A*. Návod k obsluze 2001.
- [9] STRYAL, Jaroslav. *Vliv procesního média na vlastnosti frézovaného obrobku*. Liberec, 2010. Bakalářská práce. TU Liberec. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Jersák, CSc.
- [10] HOCUT 795 B. [online]. [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: www.houghtonintl.com/si-si/.../Hocut-795-B.aspx
- [11] VASILKO, K., BOKUČAVA, G. *Brúsenie kovových materiálov*. ALFA Bratislava, 1988, 240 s.
- [12] PARAMO - Mogul. [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <https://eshop.paramo.cz/produkty/KatalogovyList.aspx?kodproduktu=V032467>
- [13] CRYO CENTRUM. [online]. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://www.cryo-centrum.cz/>
- [14] Linde - Gas. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://www.linde-gas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/suchy_led/index.html

Seznam příloh

Záznam z experimentálního měření

9 stran

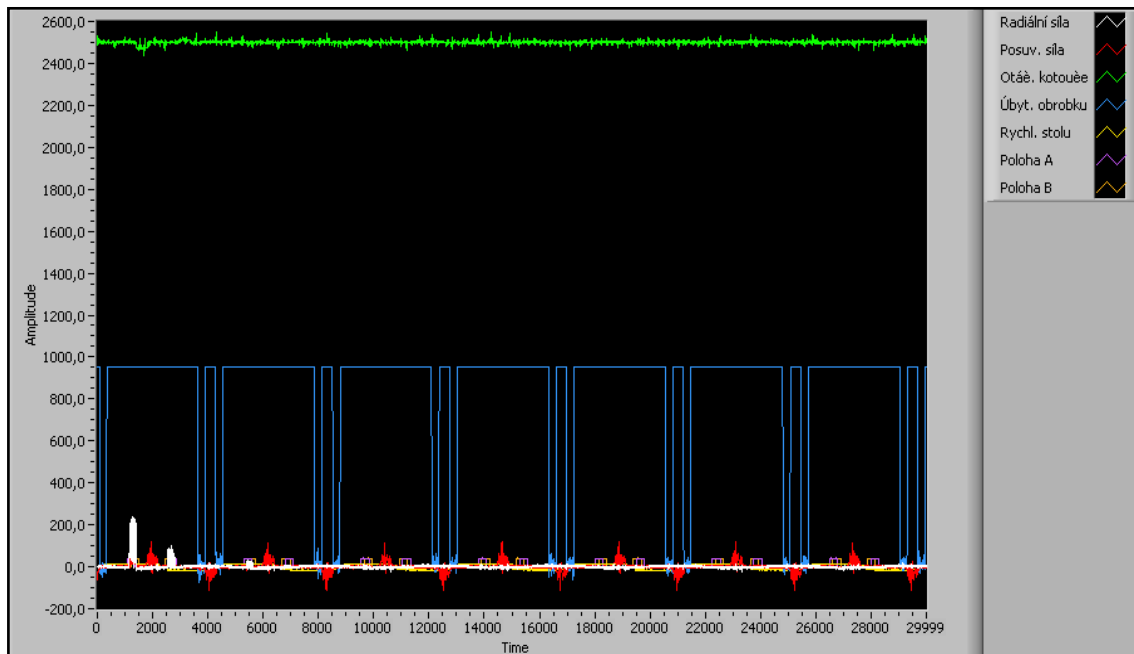
Příloha

(Záznam z experimentálního měření)

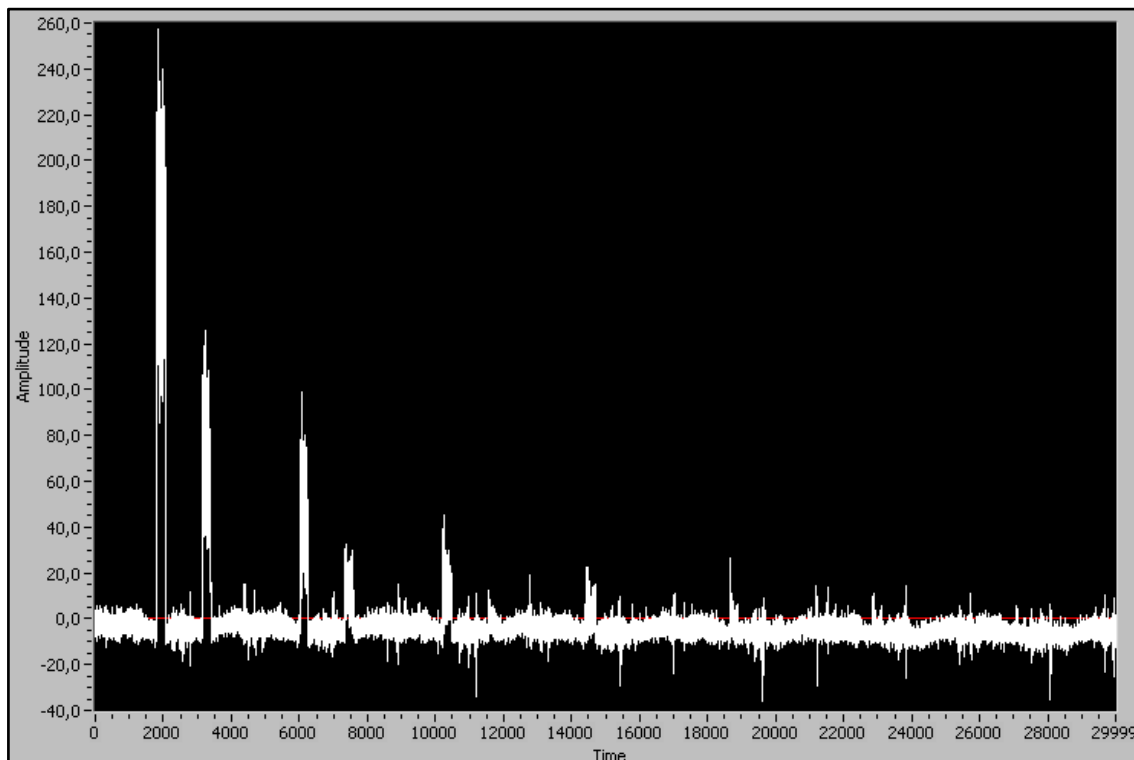
Záznam z experimentálního měření

a) Měření řezných sil

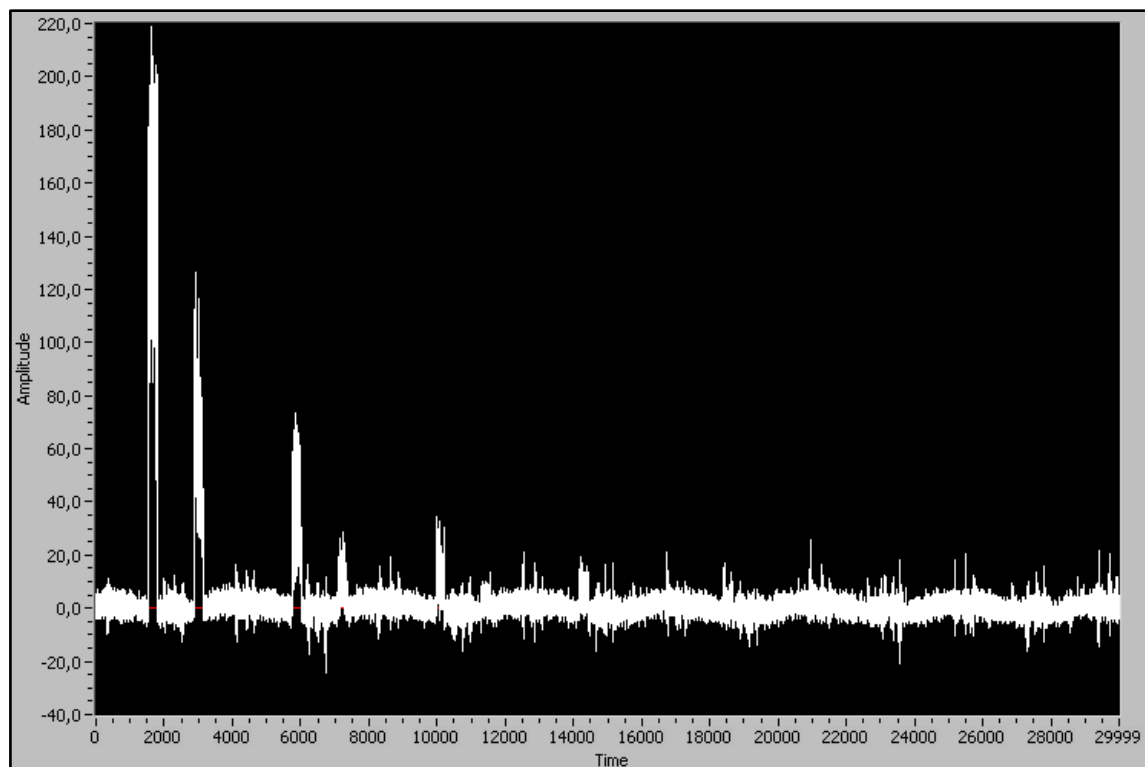
Průběhy řezných sil pro jednotlivá procesní média zpracované programem LabVIEW při měření řezných sil.



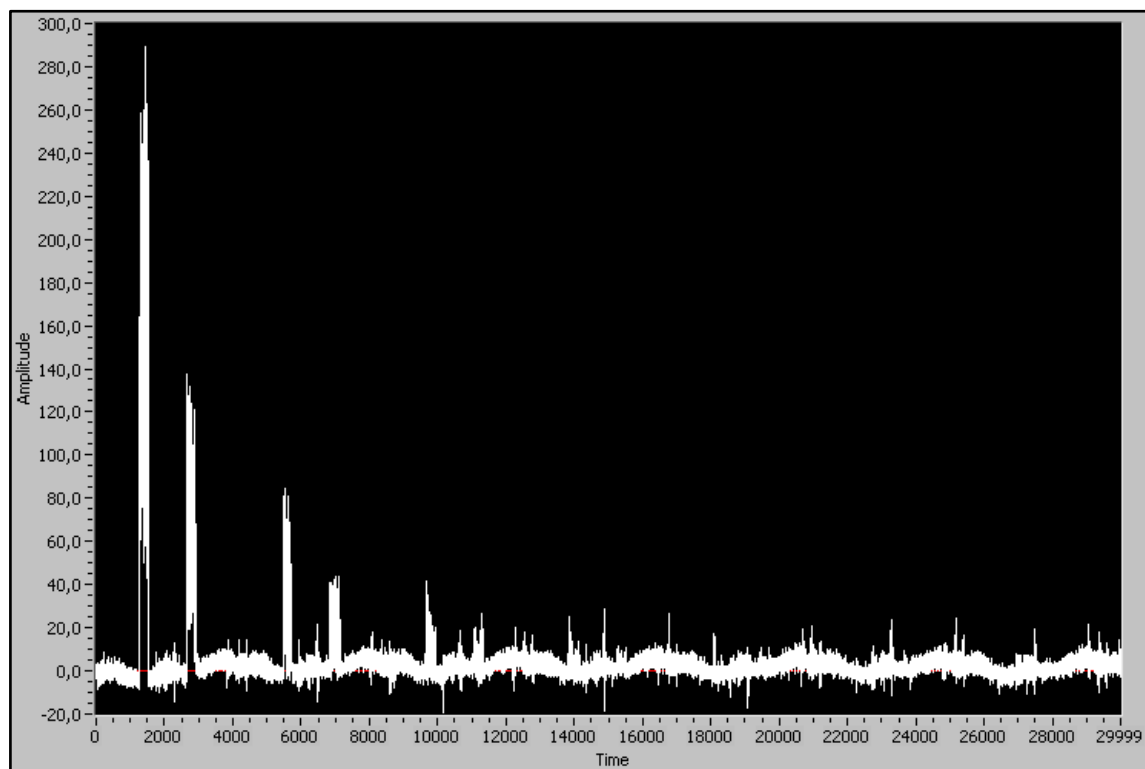
Obr. 1 Záznam z měření řezných sil.



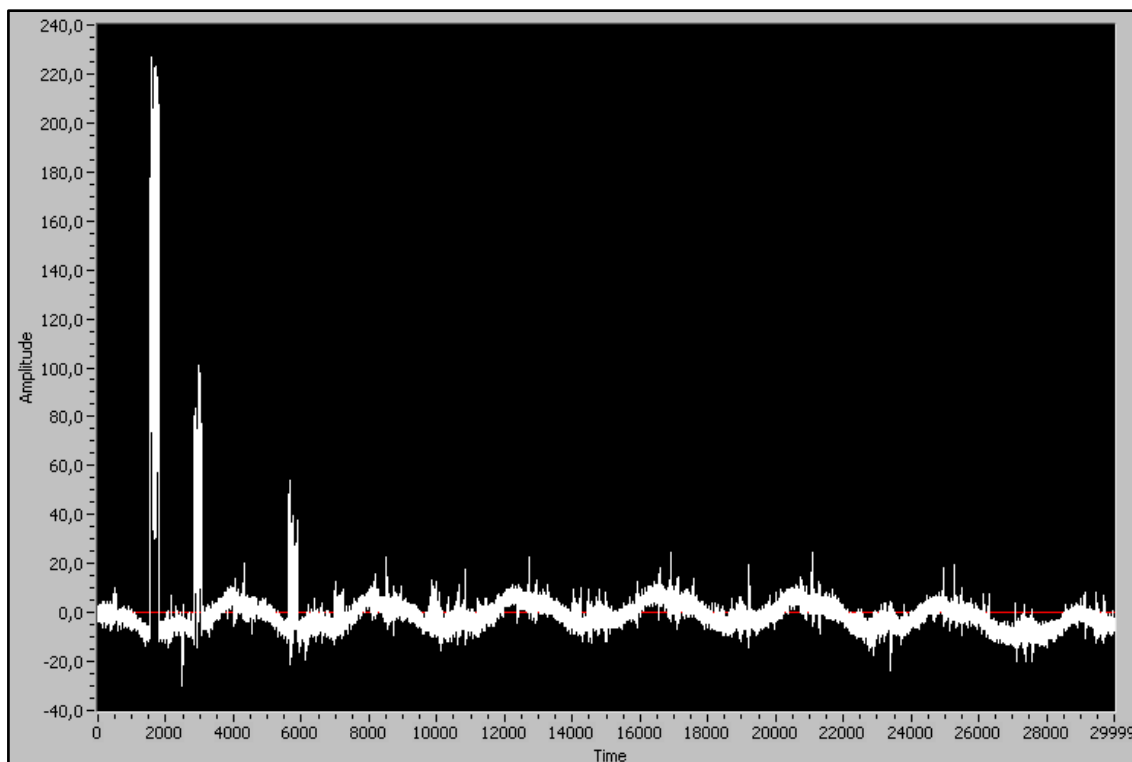
Obr. 2 Průběh řezné síly při broušení bez chlazení.



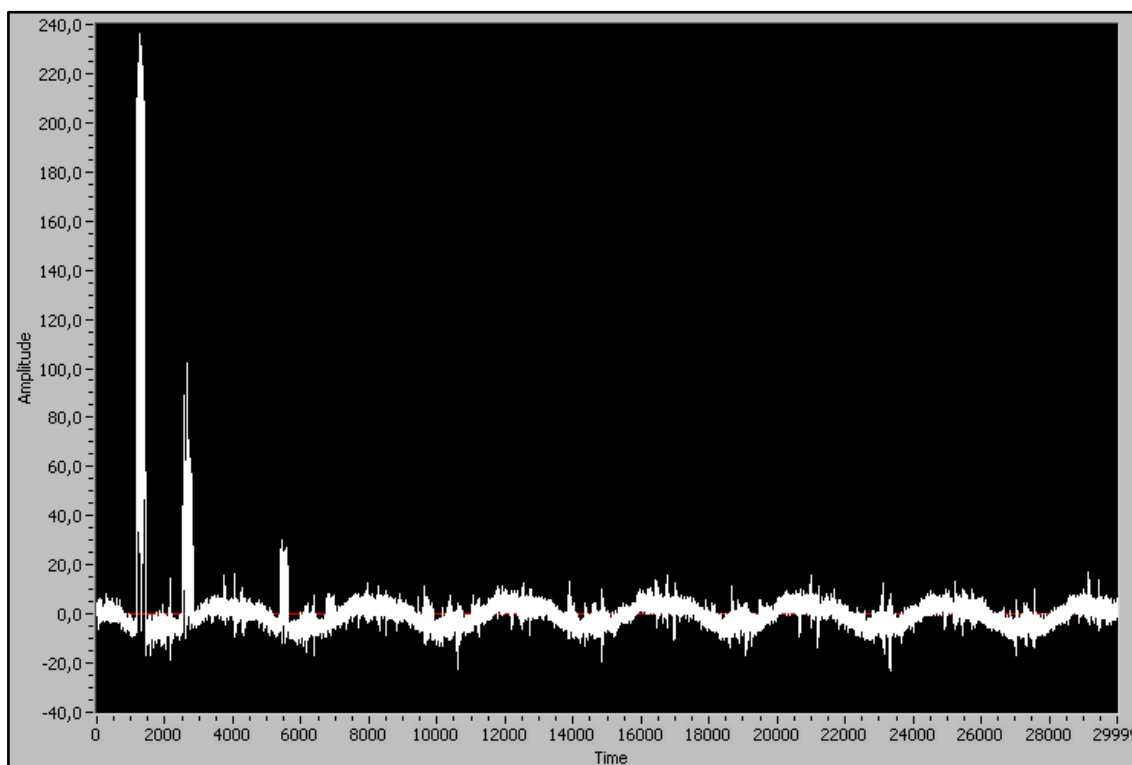
Obr. 3 Průběh řezné síly při broušení s využitím vírové trubice.



Obr. 4 Průběh řezné síly při broušení s využitím zkapalněného dusíku.



Obr. 5 Průběh řezné síly při broušení s využitím kapaliny EOPS 1030.

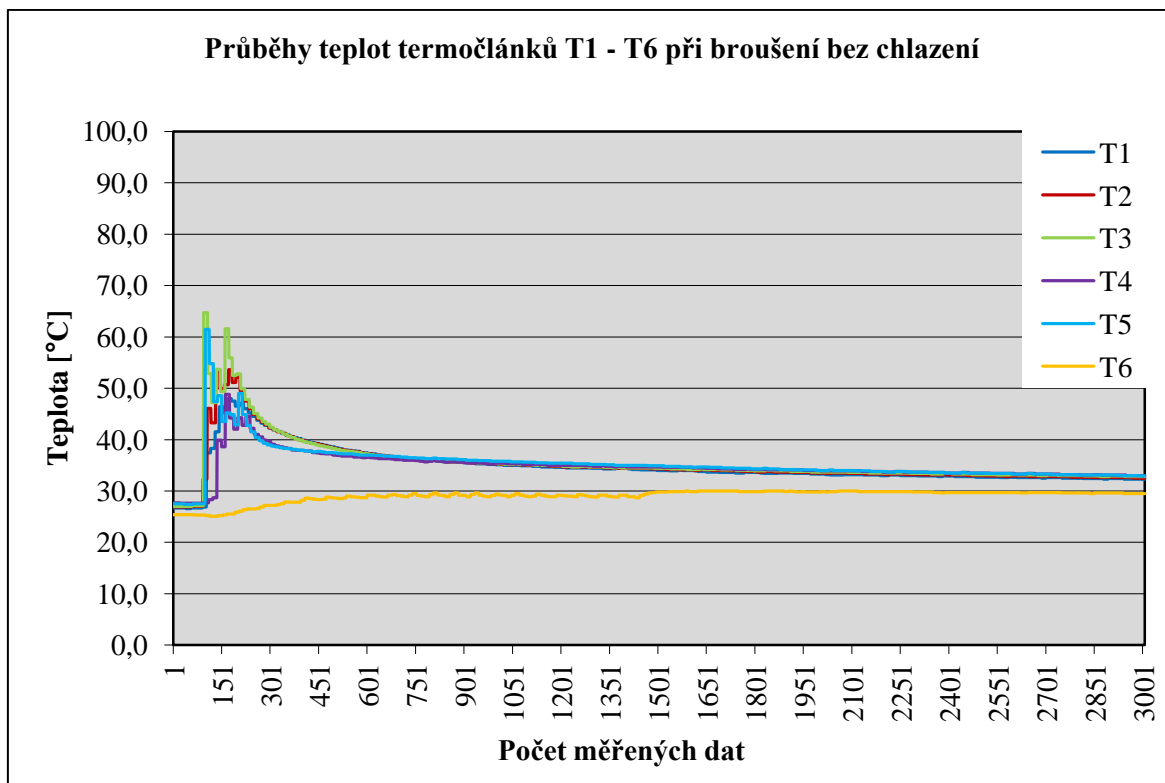


Obr. 6 Průběh řezné síly při broušení s využitím kapaliny HOCUT 795B.

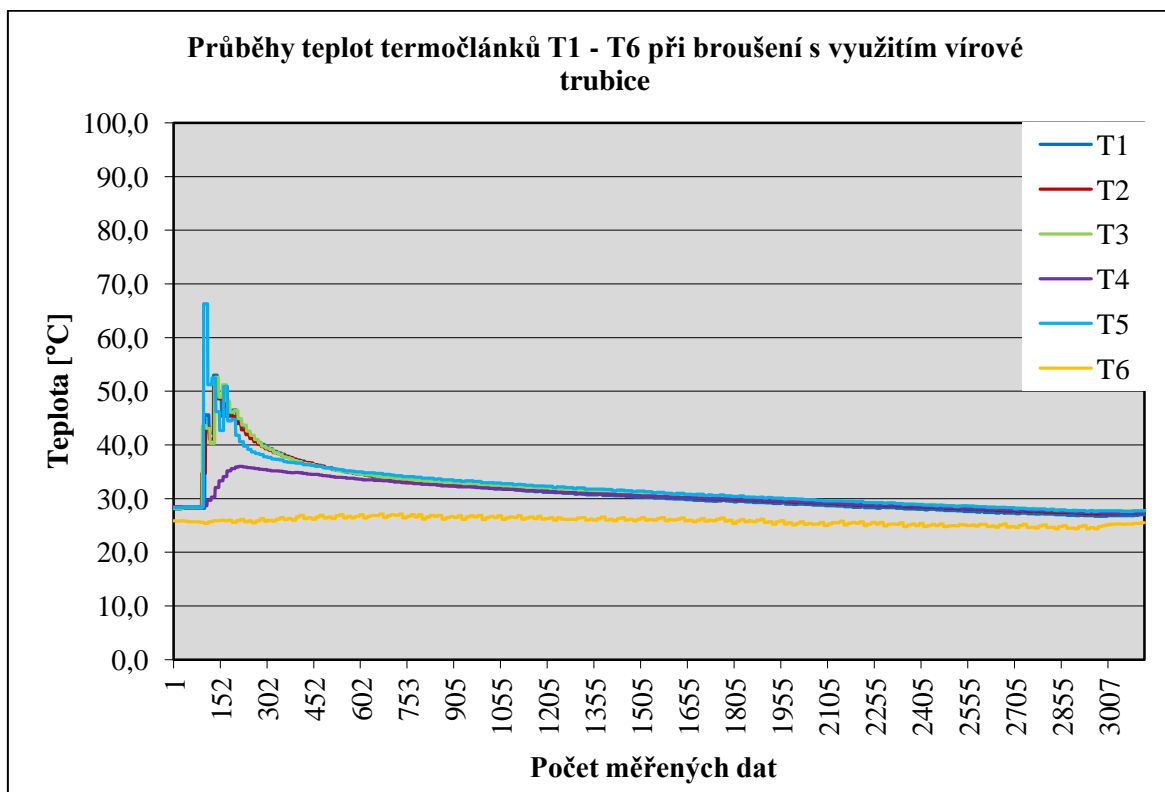
b) Měření teploty

Průběhy všech naměřených teplot při broušení s jednotlivými procesními médii.

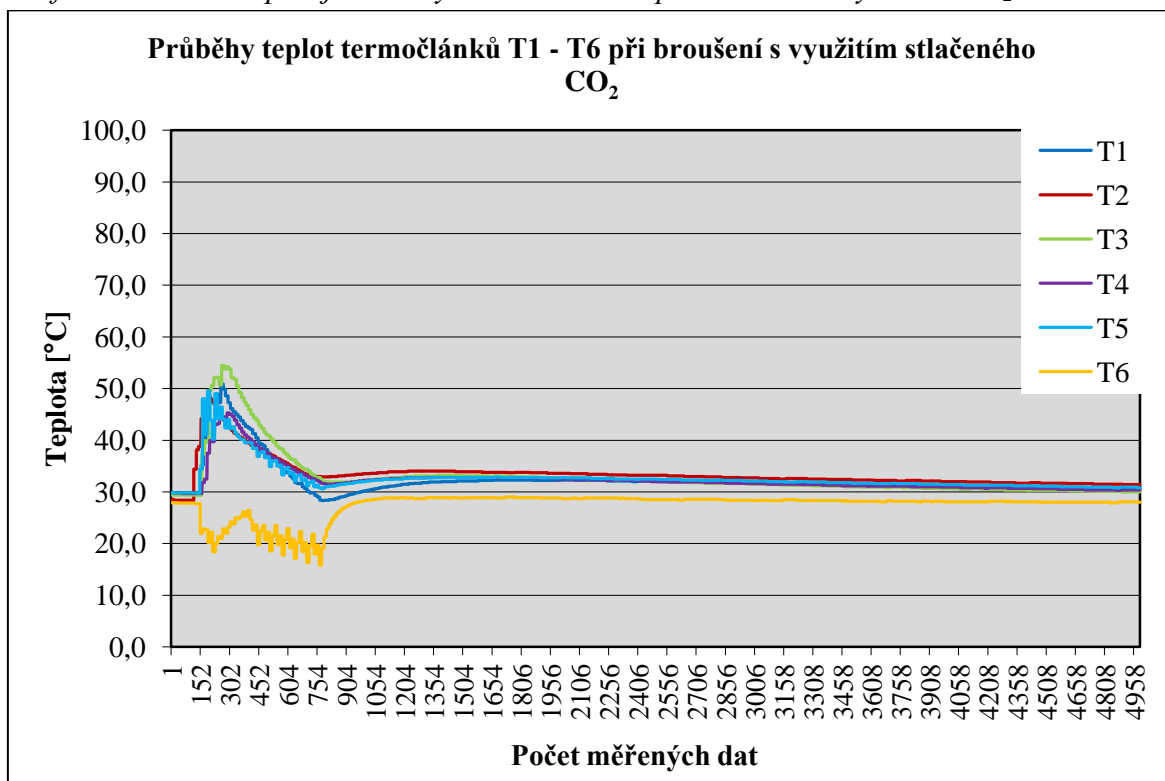
Graf č. 1 Průběh teplot jednotlivých termočlánků při broušení bez chlazení.



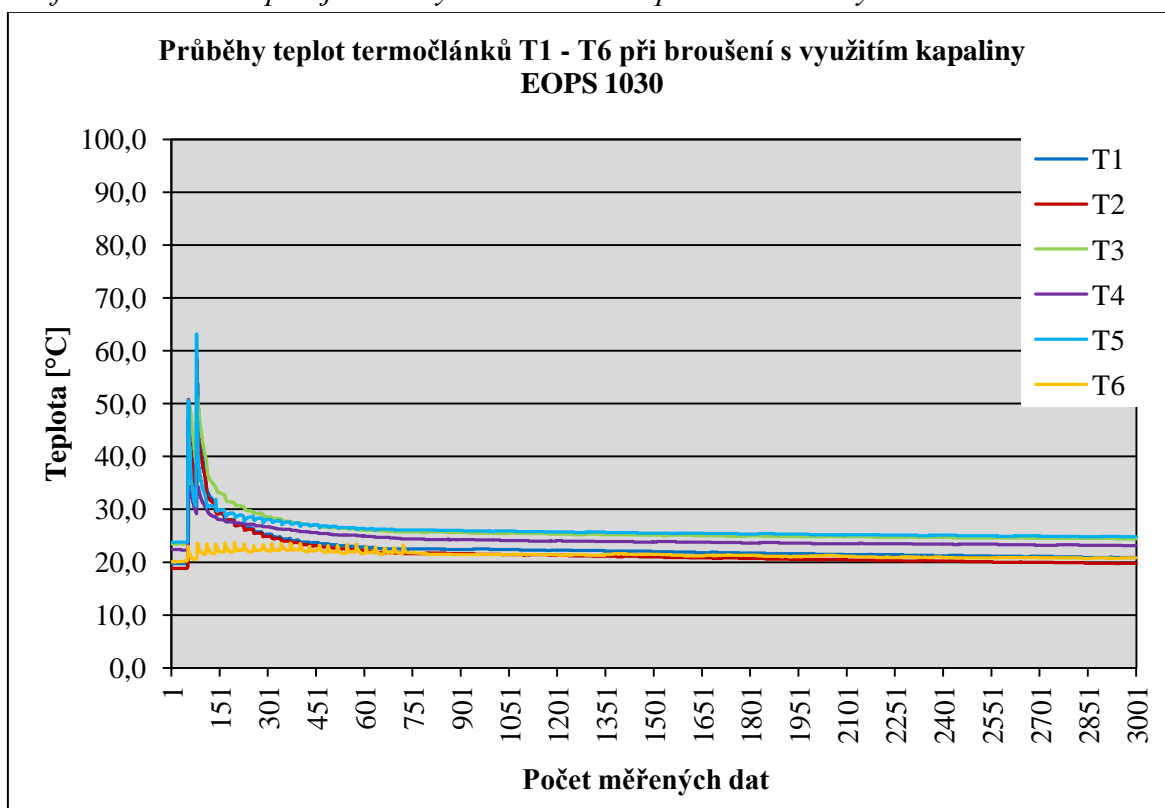
Graf č. 2 Průběh teplot jednotlivých termočlánků při broušení s využitím vírové trubice.



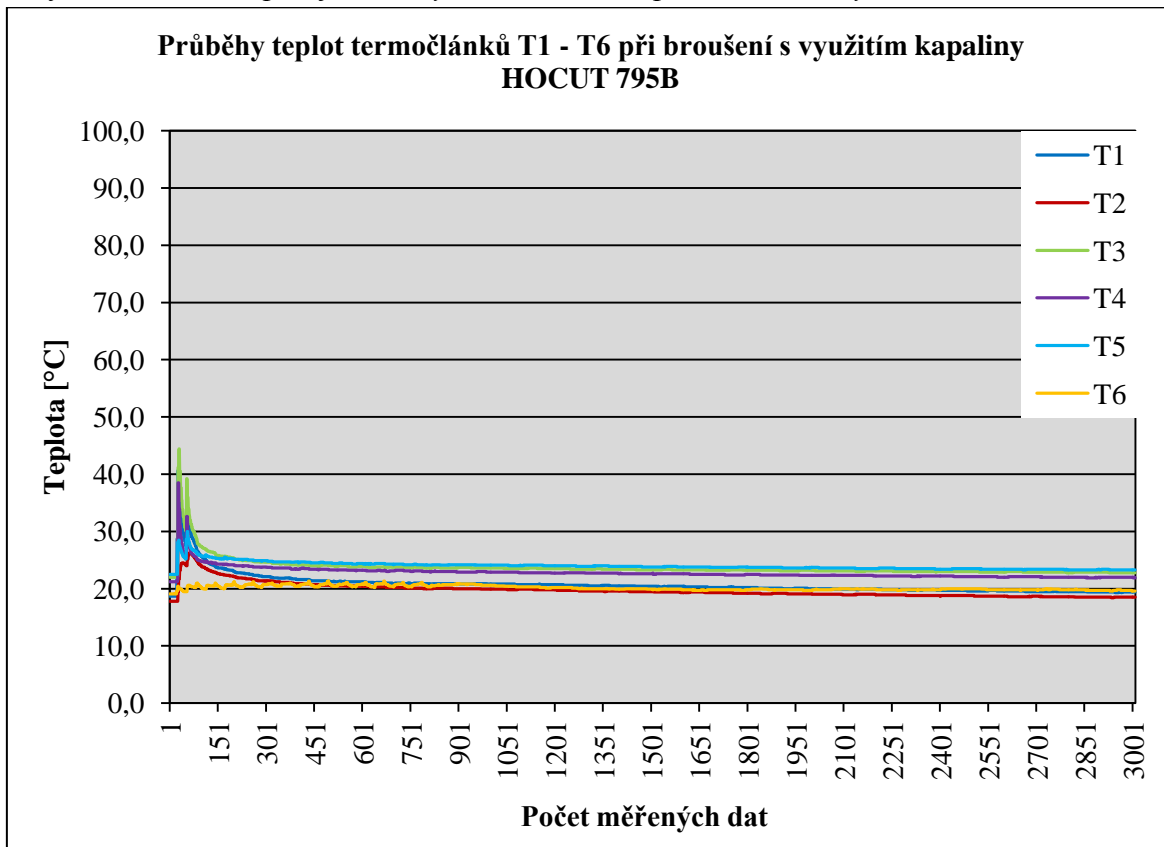
Graf č. 3 Průběh teplot jednotlivých termočlánků při broušení s využitím CO₂.



Graf č. 4 Průběh teplot jednotlivých termočlánků při broušení s využitím kapaliny EOPS 1030.

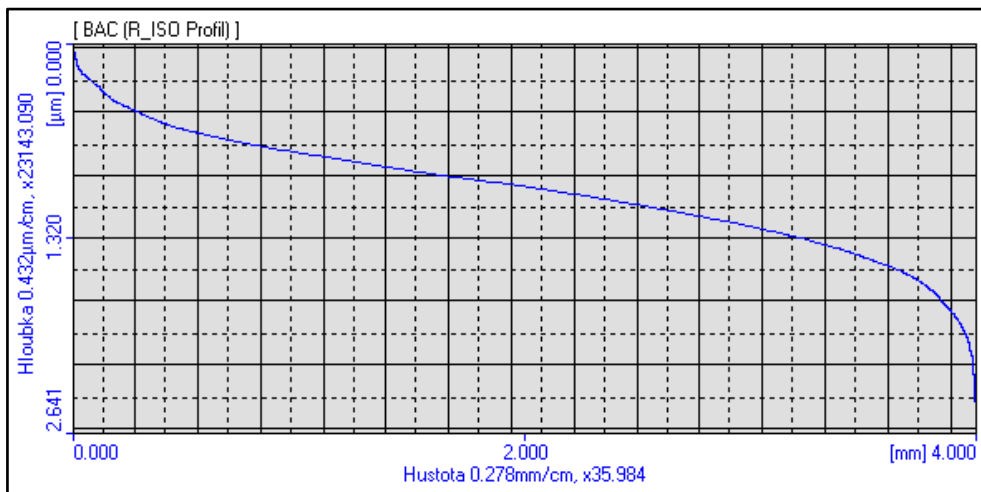


Graf č. 5 Průběh teplot jednotlivých termočlánků při broušení s využitím HOCUT 795B.

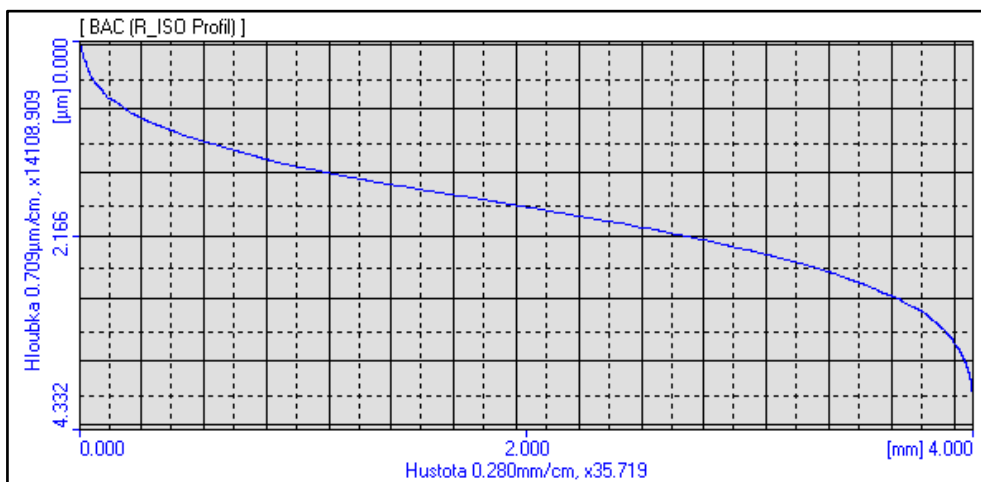


c) Měření drsnosti povrchu

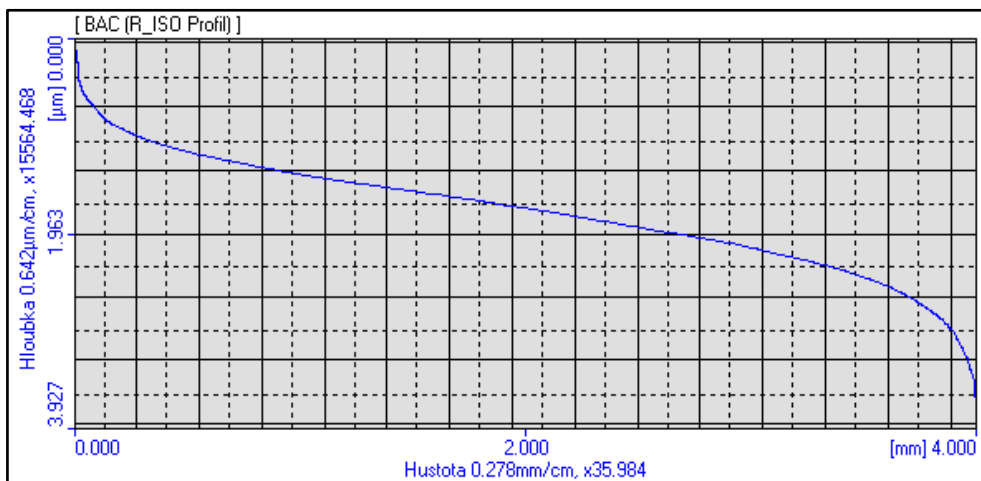
Charakteristické průběhy Abbottových křivek při měření drsnosti pro vzorky s využitím jednotlivých procesních médií.



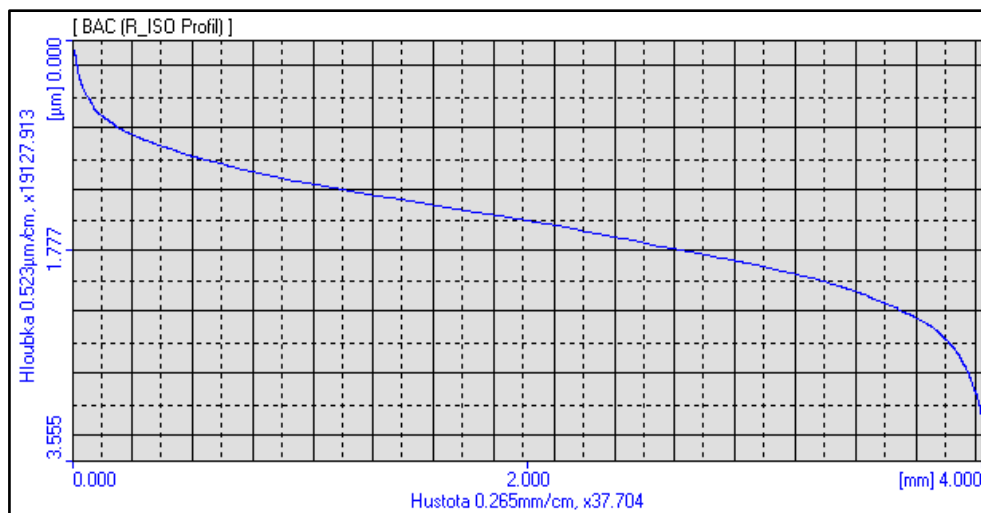
Obr. 7 Abbottova křivka po broušení bez chlazení.



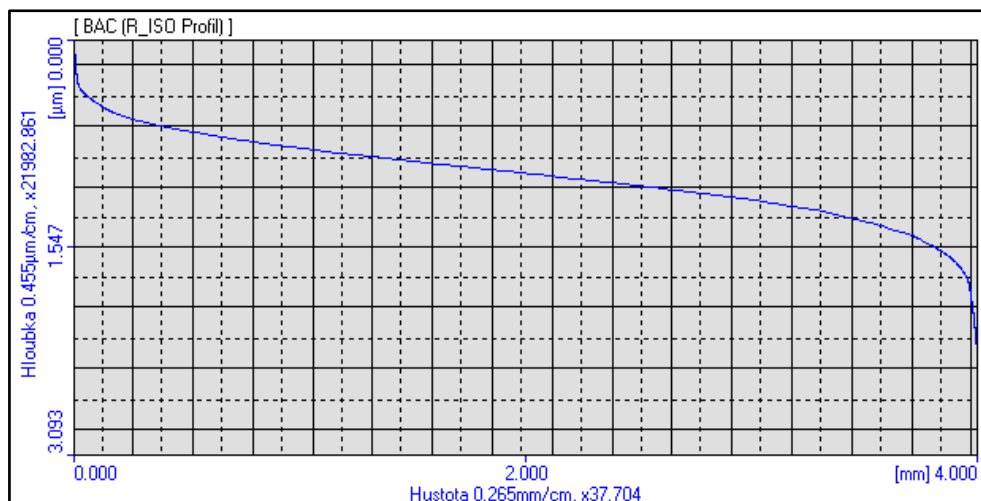
Obr. 8 Abbottova křivka po broušení s vírovou trubicí.



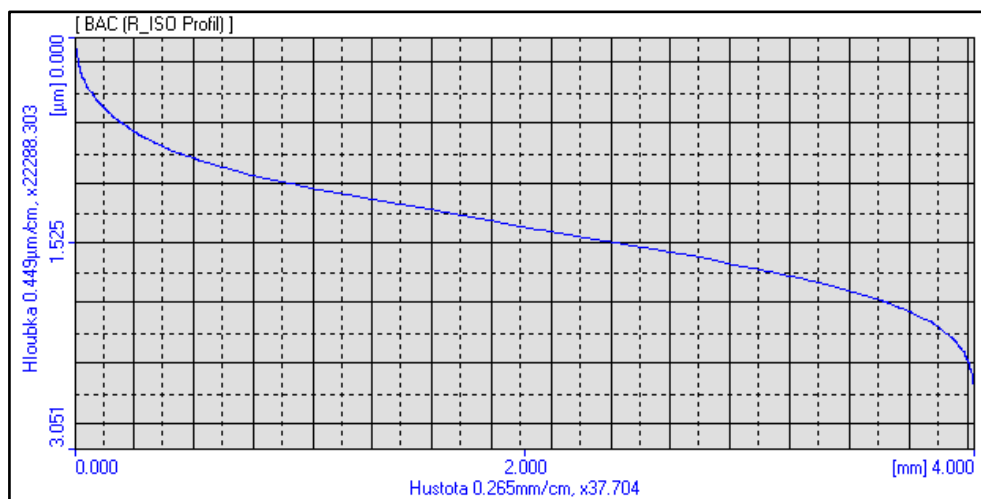
Obr. 9 Abbottova křivka po broušení s CO₂.




Obr. 10 Abbottova křivka po broušení se zkapalněným dusíkem.



Obr. 11 Abbottova křivka po broušení s kapalinou EOPS 1030.



Obr. 12 Abbottova křivka po broušení s kapalinou HOCUT 795B.

PROTOKOL HODNOTÍCÍ VLIV PLYNŮ A KAPALIN PRO BROUŠENÍ						
CHARAKTERISTIKA SOUČÁSTI						
Parametry obrábění				Fotografie		
Způsob obrábění	rovinné broušení					
Stroj	BPH 320 A					
Nástroj	250 x 25 x 76					
Řzná rychlost	31,4 - 34,7 m.s ⁻¹					
Otáčky	2400 - 2650 min ⁻¹					
Posuv	15,5 mm.min ⁻¹					
Hloubka záběru	0,01 - 0,03 mm					
Obráběný materiál	12 050.1					
Rozměry polotovaru	80x60x13 mm					
TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT						
Řzná síla						
	Bez chlazení	Vír. trubice	CO ₂	Dusík	EOPS 1030	HOCUT 795B
F_{eN} [N]	79,6	68,9	76,9	114,8	60,5	58,1
Teplota obrobku						
	Bez chlazení	Vír. trubice	CO ₂	Dusík	EOPS 1030	HOCUT 795B
T3-T5 [°C]	60,5	58,3	46,0	48,4	48,1	39,1
Drsnost povrchu						
	Bez chlazení	Vír. trubice	CO ₂	Dusík	EOPS 1030	HOCUT 795B
Ra [µm]	0,25	0,49	0,41	0,36	0,31	0,32
Rozměrová přesnost						
	Bez chlazení	Vír. trubice	CO ₂	Dusík	EOPS 1030	HOCUT 795B
b [mm]	26,17	26,12	25,99	26,11	26,09	26,10