



Výzkum vlivů progresivních způsobů chlazení u vybraných technologií obrábění

Disertační práce

Studijní program: P2303 – Strojírenská technologie
Studijní obor: 2303V002 – Strojírenská technologie

Autor práce: **Ing. Miloslav Ledvina**
Vedoucí práce: prof. Ing. Nikolaj Ganev, CSc.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

Research of the progressive cooling methods influence at chosen machining technologies

Dissertation

Study programme: P2303 – Engineering Technology
Study branch: 2303V002 – Engineering Technology
Author: **Ing. Miloslav Ledvina**
Supervisor: prof. Ing. Nikolaj Ganev, CSc.



Prohlášení

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

Užiji-li disertační 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.

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

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

Datum:

Podpis:

Anotace

Předkládaná práce poskytuje informace o možnosti využití plyných médií v procesu obrábění.

Hlavním cílem předkládané práce bylo ověřit plyná média v procesu obrábění při zachování stejné kvality výroby jako při použití kapalných médií.

Nezbytné základní pojmy týkající se řešené problematiky a vztahy jsou uvedeny v teoretické části práce. Do této části práce jsou zahrnuty přehledně informace o zvolených technologiích obrábění. Dále je zde stručně uveden vznik tepla při procesu obrábění, odvod vzniklého tepla z místa řezu do okolí a význam procesních médií pro odvod tepla z místa řezu.

Dosažení cíle je věnována kompletně celá experimentální část práce, která obsahuje informace o konkrétních zvolených parametrech, vytvořených metodikách hodnocení a výsledcích výzkumu.

V závěrečné části práce je uvedeno shrnutí výsledků a poznatků.

Klíčová slova: Plyná média, Kapalná média, Soustružení, Broušení

Annotation

The submitted dissertation thesis provides information about utilization of the gaseous coolants in the machining process.

The main aim of this thesis was to verify gaseous coolants applicability in the machining process at keeping the same production quality typical of the liquid coolants that are commonly used.

Essential basic terminology and equations related to the solved issue are summarized in the theoretical part of thesis. In this part are also digestedly given information about the chosen machining technologies. Moreover there is described the heat generation at the machining process, heat removal from the cutting surface into the environment and importance of the process coolants for such heat removal from the cutting surface.

The whole experimental part concerns about achieving the given aim. It contains information about the specific chosen parameters, created methodologies for evaluation and research results.

In the final part of the thesis are summarized measured results and conclusions.

Key words: Gaseous Coolants, Liquid Coolants, Turning, Grinding

Poděkování

Celému kolektivu katedry obrábění a montáže děkuji za veškerou pomoc, kterou mi ochotně poskytli.

Poděkování zajisté směřuje k mé rodině, která mě vždy maximálně podporovala ve studiu.

OBSAH

Seznam použitých zkratk	8
ÚVOD	13
Teoretická část	14
1 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ	14
1.1 Technologie soustružení	14
1.1.1 Řezný nástroj	15
1.1.2 Řezné podmínky při soustružení	17
1.2 Technologie broušení	17
1.2.1 Řezný nástroj	18
1.2.2 Řezné podmínky při broušení	19
2 TEPLA A ODOVD TEPLA PŘI PROCESU OBRÁBĚNÍ	20
2.1 Teplo při procesu obrábění	20
2.2 Měření teploty při procesu řezání	27
2.3 Odvod tepla z procesu řezání	27
2.3.1 Procesní média	29
2.3.1.1 Chlazení procesními plyny	30
2.3.1.2 Chlazení procesními kapalinami	33
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	37
Experimentální část	38
4 MĚŘENÉ PARAMETRY, STANOVENÉ PODMÍNKY A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	38
4.1 Stanovení postupu měření a hodnocení parametrů	38
4.1.1 Měřené parametry pro hodnocení při experimentech	38
4.1.2 Teplota	41
4.1.3 Působící síly	46
4.1.4 Trvanlivost řezného nástroje	47
4.1.5 Integrita povrchu	48
4.1.5.1 Drsnosti povrchu	48
4.1.5.2 Rozměrová přesnost	51
4.1.6 Mechanické zkoušky	52
4.1.6.1 Mechanická zkouška tahem	53
4.1.6.2 Měření tvrdosti a mikrotvrdosti	55
4.1.7 Zvolené stroje a řezné podmínky při experimentech	56
4.1.8 Zvolená zařízení pro přívod procesních médií	59
4.2 Soustružení - dosažené výsledky	63
4.2.1 Teplota	63
4.2.2 Působící síly	66
4.2.3 Trvanlivost řezného nástroje	70
4.2.4 Drsnost povrchu	71
4.2.5 Rozměrová přesnost	74

4.3 Broušení - dosažené výsledky	76
4.3.1 Teplota	76
4.3.2 Působící síly	80
4.3.3 Trvanlivost řezného nástroje	83
4.3.4 Drsnost povrchu	84
4.3.5 Rozměrová přesnost	87
4.4 Mechanické zkoušky - dosažené výsledky	89
4.4.1 Mechanická zkouška tahem	89
4.4.2 Zkouška tvrdosti a mikrotvrdosti	92
4.5 Ekonomické a ekologické hledisko - dosažené výsledky	95
5 DISKUZE	100
5.1 Soustružení	100
5.2 Broušení	102
5.3 Mechanické zkoušky	104
5.4 Ekonomické a ekologické hledisko	104
6 ZÁVĚR	106
7 LITERATURA	108
8 PUBLIKACE A VÝSTUPY STUDENTA	112
9 SEZNAM OBRÁZKŮ	114
10 SEZNAM TABULEK	116
11 PŘÍLOHY	117

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení nejdůležitějších veličin a význam nejpoužívanějších zkratek a symbolů v předkládané disertační práci.

ZKRATKY

Označení

Al

Al₂O₃

B₄C

BK

CBN

CO₂

Cu

ČSN

DIN

EN

ISO

JIS

KOM

KSP

KSR

MLQ

PK

PM

PP

RO

ŘN

SiC

SK

SNOP

ŠL

TAČR

VBD

VT

Význam

hliník

umělý korund

karbid bóru

broušící kotouč

kubický nitrid bóru

oxid uhličitý

měď

česká státní norma

německá národní norma

evropská norma

mezinárodní norma

japonská norma

katedra obrábění a montáže

katedra strojírenské technologie

katedra strojů a robotiky

minimal quantities of lubricant

procesní kapalina

procesní médium

procesní plyn

rychlořezná ocel

řezný nástroj

karbid křemíku

slinutý karbid

stroj – nástroj – obrobek – přípravek

šedá litina

Technologická Agentura České Republiky

vyměnitelná břitová destička

vírová trubice

SYMBOLY

Označení

a

A'_α

A'_{α1}

A'_{α2}

Rozměr

[m².s⁻¹]

Význam

tepelná difuzita

vedlejší hřbet

první vedlejší hřbet

druhý vedlejší hřbet

Označení	Rozměr	Význam
A_5	[%]	tažnost
a_e	[mm]	pracovní (radiální) záběr
A_g		geometrická styková plocha BK
A_g	[%]	plastické prodloužení
a_p	[mm]	hloubka záběru
A_w		průřez odebírané vrstvy
$A_{\alpha 1}$		první hlavní hřbet
$A_{\alpha 2}$		druhý hlavní hřbet
A_Y		čelo nástroje
A_{Y1}		první hlavní čelo
A_{Y2}		druhé hlavní čelo
B	[%]	podíl tepla odvedeného obrobkem při broušení
b	[mm]	šířka odřezávané vrstvy
B_1	[%]	podíl tepla odvedeného obrobkem
c	[K.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrné teplo
$c.p$	[J.K.m ⁻³]	měrné objemové teplo
D	[mm]	jmenovitý průměr
f_r	[mm]	radiální posuv stolu
F_{sh}	[N]	střižná složka řezné síly
h	[mm]	nedeformovaná hloubka odřezávané vrstvy
h_c	[mm]	hloubka třísky
HV0.2	[-]	mikrotvrdost podle Vickerse
HV10	[-]	tvrdost podle Vickerse
K_0		modifikovaná Besselova funkce druhého druhu
l	[mm]	délka broušeného předmětu
L		bezrozměrná konstantní délka
L	[mm]	obráběná vzdálenost (délka)
l_c	[mm]	kontaktní délka
l_g	[mm]	geometrická délka styku
n	[min ⁻¹]	otáčky řezného nástroje nebo obrobku
Pe		Pécletovo číslo
P_f		nástrojová boční rovina
P_n		nástrojová normálová rovina
P_o		nástrojová ortogonální rovina
P_p		nástrojová zadní rovina
P_r		nástrojová základní rovina
P_s		nástrojová rovina ostří
P_s'		nástrojová rovina vedlejšího ostří
Q	[J]	teplo, množství tepla

Označení	Rozměr	Význam
q	[W.m ⁻²]	plošná hustota tepelného toku
Q _f	[J]	teplo vznikající v terciální oblasti,
Q _{f(nástroj)}	[J]	teplo odvedené z terciální oblasti deformací nástrojem
Q _{f(obrobek)}	[J]	teplo odvedené z terciální oblasti deformací obrobkem
Q _k	[J]	teplo vznikající stlačením třísky
Q _m	[J]	střední teplo
Q _{sh}	[J]	teplo vznikající v primární oblasti deformací
Q _{sh(obrobek)}	[J]	teplo odvedené z primární oblasti deformací obrobkem
Q _{sh(třísky)}	[J]	teplo odvedené z primární oblasti deformací třískou
Q _t	[J]	teplo vznikající v sekundární oblasti
Q _{t(nástroj)}	[J]	teplo odvedené ze sekundární oblasti deformací nástrojem
Q _{t(třísky)}	[J]	teplo odvedené ze sekundární oblasti deformací třískou
q _v	[Wm ⁻³]	objemová hustota tepelného toku
R _a	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu
R _m	[MPa]	mez pevnosti
R _{p0,2}	[MPa]	smluvní mez kluzu
R _t	[μm]	celková výška profilu z posuzovaného profilu
R _Z	[μm]	největší výška profilu ze základní vzdálenosti
r _ε	[mm]	poloměr špičky
S		nástrojové hlavní ostří
S'		nástrojové vedlejší ostří
S _{sh}	[mm ²]	plocha střižné roviny
t	[sec., min]	čas, čas řezání
T	[°C]	teplota
VB	[mm]	opotřebení řezného nástroje
v_c		vektor hlavního pohybu
v _c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
v _e	[m.min ⁻¹]	rychlost řezného pohybu
v _f	[m.min ⁻¹]	posuvová rychlost
v _{ft}	[m.min ⁻¹]	tangenciální rychlost posuvu
v _{ch}	[m.min ⁻¹]	rychlost odřezávané třísky
v _o	[m.s ⁻¹]	rychlosti broušeného předmětu
X		bezrozměrná veličina
Y		bezrozměrná veličina
α	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	měrná tepelná prostupnost

Označení	Rozměr	Význam
α	[°]	nástrojový úhel hřbetu
α_o	[°]	nástrojový úhel hřbetu ortogonální
β	[°]	úhel tření
β	[°]	nástrojový úhel břitu
β_o	[°]	nástrojový úhel břitu ortogonální
γ	[°]	nástrojový úhel čela
γ_n	[°]	normálový úhel čelní plochy
γ_o	[°]	nástrojový úhel čela ortogonální
γ_{sh}		střížná deformace v tříске při řezání
τ_{sh}	[N.mm ⁻²]	střížné napětí
λ	[W.K ⁻¹ .m ⁻¹]	měrná tepelná vodivost
λ_s	[°]	úhel sklonu ostří
ε_r	[°]	úhel špičky
η	[°]	úhel řezného pohybu
φ	[°]	úhel posuvového pohybu
ψ_r	[°]	úhel nastavení doplňkový
δ	[°]	nástrojový úhel řezu
θ	[°C]	teplota (termodynamická, běžná)
θ_m	[°C]	střední teplota
θ_{max}	[°C]	maximální teplota
θ_p	[°C]	teplota prostředí
θ_s	[°C]	teplota řezné hrany
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
κ_r'	[°]	úhel nastavení vedlejšího ostří
Φ_1	[°]	úhel střížné roviny
Γ		Wienerova rozdělovací funkce
Λ	[W.K ⁻¹]	tepelná vodivost
$\Delta\theta_{sh}$	[°C]	přírůstek teploty v důsledku střížné deformace
$\Delta\theta_t$	[°C]	přírůstek teploty v důsledku tření třísky

Vztaženo k technologii soustružení

Označení	Rozměr	Význam
f	[mm/ot]	podélný posuv (posuv nožové hlavy)
$F_f=F_x$	[N]	posuvová složka síly v ose „X“
$F_p=F_y$	[N]	přísuvová složka síly v ose „Y“
$F_c=F_z$	[N]	řezná síla složka síly v ose „Z“
T1	[°C]	teplota na špičce ŘN, termočlánek T1
T2	[°C]	teplota středu ŘN, termočlánek T2
T3	[°C]	teplota na čele ŘN, termočlánek T3

Vztaženo k technologii broušení

Označení	Rozměr	Význam
f	[m.min ⁻¹]	posuv stolu brusky
$F_f=F_x$	[N]	posuvová složka síly v ose „X“
$F_c=F_z$	[N]	řezná složka síly v ose „Z“
T1	[°C]	teplota ve stanovené hloubce od obrobeného povrchu, termočlánek T1
T2	[°C]	teplota ve stanovené hloubce od obrobeného povrchu, termočlánek T2
T3, T4, T5	[°C]	teplota ve stanovené hloubce od obrobeného povrchu, termočlánek T3, T4, T5
T6	[°C]	teplota na povrchu zkušební vzorku v těsné blízkosti broušené plochy, termočlánek T6

ÚVOD

Procesní kapaliny používané při opracování kovových materiálů formou třískového obrábění odvádějí teplo z řezu, snižují třecí odpor, odplavují třísky a zvyšují trvanlivosti nástrojů a jakosti obráběných povrchů.

K zavedení procesních médií (především kapalin) došlo v době, kdy zvýšeným technologickým požadavkům již neodpovídaly vlastnosti řezných materiálů. Nasazením procesních kapalin se vyřešily potíže s trvanlivostí bříty, s kvalitou a přesností obrobeného povrchu, s odstraňováním třísek a s řadou dalších záležitostí. Negativem takového řešení však byla, a nadále zůstává, náročnost na technologické vybavení procesu a tím i zvýšení nákladů na výrobu. V posledních letech k tomu ještě přistupují ekologická a zdravotní hlediska, jejichž význam rychle narůstá nejen z legislativních důvodů, ale především z hlediska nákladů spojených s likvidací případných ekologických havárií a zdravotních odškodnění. Dalším neméně důležitým omezujícím faktorem v používání procesních kapalin jsou rozšiřující se zákonné předpisy o manipulaci s chemickými látkami.

Současným trendem v obrábění je proto snaha o omezení nebo úplné vyloučení používání procesních kapalin.

Obsahem předkládané disertační práce je výzkum v oblasti procesních médií. Práce reaguje na silící potřebu omezení procesních kapalin, náhradu za jiná média (např. podchlazený vzduch, zkapalněný CO₂, zkapalněný dusík) nebo úplné odstranění procesního média z třískového obrábění, tj. obrábění za sucha.

Předložená disertační práce, zpracovaná na téma „**Výzkum vlivů progresivních způsobů chlazení u vybraných technologií obrábění**“, poskytuje informace o možnosti využití plynných médií v procesu obrábění.

Hlavním cílem bylo ověřit plynná média v procesu obrábění při zachování stejné kvality výroby jako při použití kapalných médií.

K dosažení vytyčeného cíle je nejprve nutné:

- navrhnout vhodné hodnotící parametry a vytvořit příslušné metodiky v laboratorních podmínkách,
- zvolit představitele z procesních médií, jak kapalného tak plynného skupenství,
- zvolit představitele pro technologie s definovanou a nedefinovanou geometrií řezného nástroje, v rámci kterých budou procesní média zkoumána,
- navrhnout experimenty pro dané technologie (technologické podmínky, řezné podmínky, zkušební vzorky),
- realizovat experimentální měření zaměřená na vliv procesního média při obrábění,
- shrnout, zhodnotit dosažené výsledky měření a vyvodit závěry.

Pro dosažení plánovaného cíle práce jsou nezbytné teoretické znalosti dané problematiky, které jsou uvedeny v teoretické části práce.

TEORETICKÁ ČÁST

Průmyslový obor obrábění je jedním z nejdůležitějších oborů zpracování materiálu. V tomto oboru se vyskytuje mnoho typů základních technologií. Mezi tyto technologie patří soustružení, frézování, vrtání, obrážení, hoblování, protahování, které spadají do technologie s definovanou geometrií řezného nástroje (ŘN). Mezi technologie s nedefinovanou geometrií ŘN patří broušení, lapování, honování a superfinišování. Všechny tyto technologie mají jedno společné, a to při opracování obrobku do požadovaného tvaru, dochází, za stanovených řezných podmínek, k postupnému odebrání materiálu formou třísek ŘN.

Mezi nejjednodušší ale i nejrozšířenější technologie obrábění patří soustružení. Soustružením se vyrábějí rotační součásti, které lze nalézt v mnoha strojích či zařízeních. Další velmi důležitou technologií, neméně užívanou, je broušení. Broušením se docílí významného zvýšení jakosti povrchu a rozměrové přesnosti, je tak důležitým hlediskem užité hodnoty obrobku. Obě uvedené technologie jsou silně ovlivňované vývinem tepla a jeho odvodem.

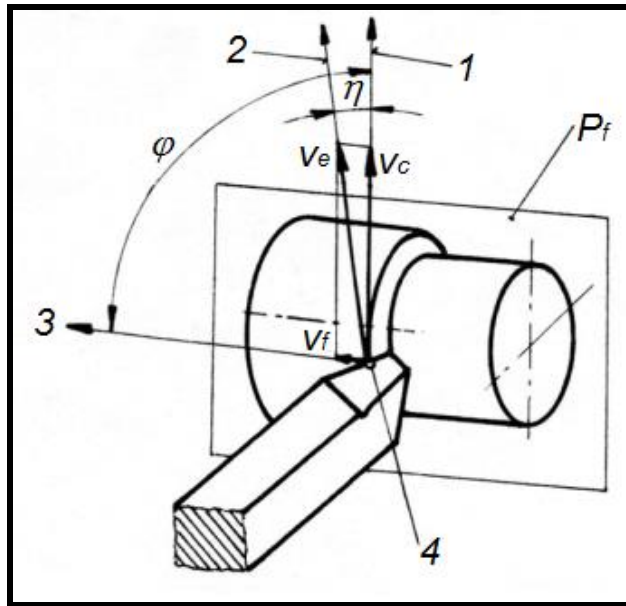
Z těchto důvodů se tato práce zabývá zkoumáním a hodnocením vlivů procesních médií (PM) u těchto dvou technologií, tj. u technologie soustružení a technologie broušení.

1 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

1.1 Technologie soustružení

Soustružení je technologie výroby vnějších nebo vnitřních rotačních ploch. Ve většině případů jednobřítým ŘN různých tvarů. Při soustružení koná hlavní řezný pohyb obrobek (rotační pohyb). Vedlejší pohyb koná ŘN a to rovnoběžně (podélně) nebo kolmo (příčně) k ose otáčení obrobku. Výsledný řezný pohyb je tedy šroubovice, na obrázku 1.1 – 1, nebo spirála. Lze vyrábět součásti s vnější či vnitřní válcovou, kuželovou i tvarovou plochou (např. závity), rovinnou čelní plochou, zápichy [18], [31].

Pro vytvoření těchto jednotlivých ploch a prvků stanovené kvality, rozměru a geometrie je důležité zvolit vhodný typ ŘN a stanovit řezné podmínky [18], [35].



Obr. 1.1 – 1 Kinematika řezného procesu při podélném soustružení; 1 - směr hlavního pohybu; 2 - směr řezného pohybu; 3 - směr posuvového pohybu; 4 - uvažovaný bod ostří; P_f - nástrojová boční rovina; v_c – řezná rychlost; v_f – posuvová rychlost; v_e – rychlost řezného pohybu; φ - úhel posuvového pohybu; η - úhel řezného pohybu [18].

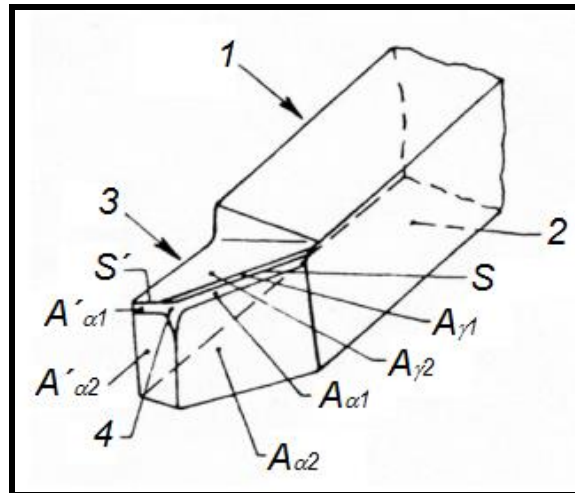
1.1.1 Řezný nástroj

Soustružnické nože (ŘN) dělíme podle směru posuvu na pravé a levé, podle způsobu opracování ploch na vnější nebo vnitřní, podle účelu na nože ubírací (přímé, ohnuté, čelní, stranové), hladící (široké, úzké, rohové), zapichovací, upichovací a tvarové [3], [35].

V současné době jsou nejčastěji používány ŘN s vyměnitelnou břitovou destičkou (VBD). Tyto nástroje mají výraznou výhodu ve snadné manipulaci s výměnou znehodnocené (opotřeбенé) VBD při soustružení [3].

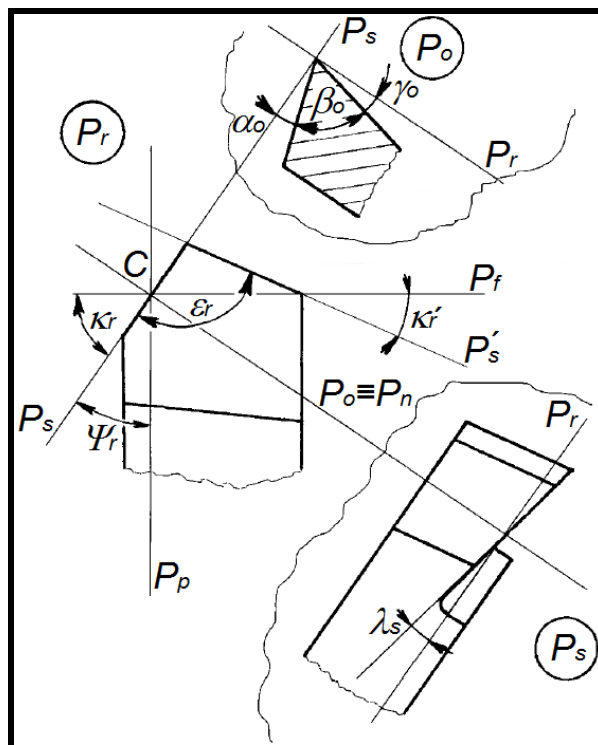
Geometrie soustružnického nože

Geometrie ŘN má značný vliv na velikost síly řezání, na utváření a odvod třísky, kvalitu obrobené plochy, trvanlivost břitu a hospodárnost obráběcího procesu. Chceme-li při využívání ŘN minimalizovat ztráty, je při jeho konstrukci, na obrázku 1.1 – 2, a zejména jeho ostření nezbytná dokonalá znalost jeho vhodné geometrie, na obrázku 1.1 - 3 a jejího vlivu na proces obrábění [3], [31].



Obr. 1.1 – 2 Ostří a plochy na řezné části soustružnického nože;
 1 – stopka; 2 – základna; 3 – řezná část; 4 – špička; S – nástrojové hlavní ostří;
 S' – nástrojové vedlejší ostří; $A_{\gamma 1}$ – první hlavní čelo; $A_{\gamma 2}$ – druhé hlavní čelo;
 $A_{\alpha 1}$ – první hlavní hřbet; $A_{\alpha 2}$ – druhý hlavní hřbet; $A'_{\alpha 1}$ – první vedlejší hřbet;
 $A'_{\alpha 2}$ – druhý vedlejší hřbet [18].

Geometrie ŘN (soustružnického nože) je definovaná úhlem břitu, hřbetu, čela a je platná i pro VBD. Nástrojové a geometrické parametry jsou charakterizovány pomocí úhlů, které jsou definovány v příslušných rovinách, které jsou na obrázku 1.1 – 3 [2], [35].



Obr. 1.1 - 3 Roviny a úhly v nástrojové souřadné soustavě - úhel nastavení χ_r , vedlejší nastavení χ'_r , špičky ϵ_r , nastavení doplňkový ψ_r , sklonu ostří λ_s , čela ortogonální γ_o , břitu ortogonální β_o , hřbetu ortogonální α_o [18].

1.1.2 Řezné podmínky při soustružení

Řezné podmínky volíme podle obrobku, jeho materiálu a hmotnosti, druhu opracování a požadované jakosti obrobené plochy. Dále musíme brát při volbě řezných podmínek v úvahu ekonomické hledisko, především hospodárnou trvanlivost ŘN, výrobní stroj a energetickou náročnost [18], [26].

Řezné podmínky při soustružení volíme obecně tak, že z celkového přídávku na obrábění nejprve stanovíme hloubku záběru. Přídavek odebíráme pokud možno na jednu třísku, avšak hloubka záběru je omezena délkou ostří nože (v záběru nemají být více než 2/3 délky ostří). Dále také výkonem a tuhostí stroje a obrobku. Hloubka záběru při soustružení se obvykle pohybuje v rozsahu 0,03 až 30 mm [26], [30].

Následně stanovíme hodnotu posuvu. Volba posuvu závisí na požadované jakosti obrobené plochy a je ovlivněna též geometrií bříty, výkonem a tuhostí stroje a obrobku. Posuv se volí co největší, tak aby vyhovoval uvedeným kritériím. Obvykle se pohybuje v rozsahu 0,05 až 2 mm/ot [31].

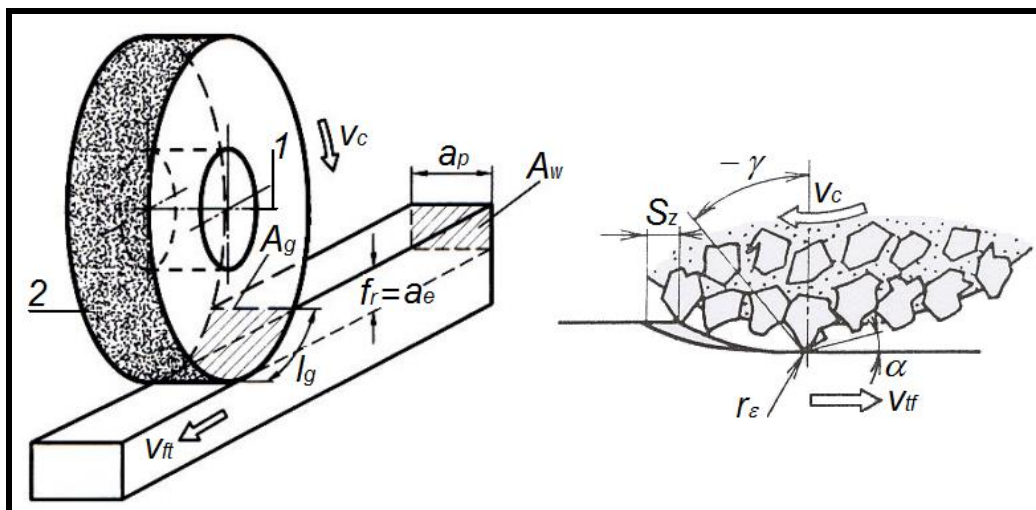
Řezné rychlosti jsou závislé zejména na druhu obráběného materiálu, na způsobu obrábění a na materiálu ŘN. Pro slinuté karbidy (SK) se obvykle stanovují v rozsahu 40 až 600 m.min⁻¹ [26].

V daném rozsahu zpravidla platí nejnižší řezné rychlosti pro obrábění legovaných ocelí, vyšší řezné rychlosti je možno volit pro obrábění nelegovaných uhlíkových ocelí a litiny. Vysoké rychlosti lze použít pro obrábění hliníku a jeho slitin. Maximální hodnoty řezné rychlosti, uvedené v jednotlivých rozsazích, platí pro nástroje povlakované. Při vnitřním soustružení se hodnoty řezných rychlostí snižují až o 20 % [26].

1.2 Technologie broušení

Broušení je proces obrábění, který se uskutečňuje ŘN s nedefinovanou geometrií, jehož pracovní část je tvořena velkým množstvím geometricky neurčitých břitů, představovaných aktivními brusnými zrnky. Tato zrna jsou vzájemně vázána pojivovými můstky. Spojením zrn a pojiva v ŘN vznikají volné prostory, které se nazývají póry [26], [45], [51].

ŘN se nejčastěji používá ve formě broušících kotoučů (BK). Při broušení vytváří hlavní řezný pohyb BK (rotační pohyb a posuv ve svislé ose). Vedlejší řezný pohyb vytváří obrobek (podélný a příčný posuv), na obrázku 1.2 – 1. Řezná rychlost a podélný posuv jsou oproti ostatním způsobům obrábění relativně velmi vysoké. Broušení se využívá jako dokončovací operace, kterou se dosahuje velké rozměrové přesnosti a jakosti konečného povrchu obrobku. Převážně následuje po obrobení předchozími technologiemi [4], [26], [45].



Obr. 1.2 -1 Kinematika broušícího procesu; 1 – osa nástroje, 2 – řezná část, v_c – řezná rychlost; v_{ft} – tangenciální rychlost posuvu; f_r – radiální posuv; a_e – pracovní (radiální) záběr; a_p – zadní (axiální) záběr; A_g – geometrická styková plocha broušícího kotouče; A_w – průřez odebírané vrstvy; l_g – geometrická délka styku, γ – úhel čela, α – uhel hřbetu, r_ϵ – zaoblení špičky, S_z – plocha na zub.[3], [4]

1.2.1 Řezný nástroj

ŘN pro technologie broušení jsou broušící kotouče (BK), broušící segmenty a broušící tělíska. Nejvíce používané jsou BK, různých tvarů, velikostí a používání.

Vlastnosti BK se určují dle druhu operace. Podle normy ČSN ISO 525 (22 4503), dříve značené ČSN 22 4501, označujeme BK soustavou čísel a písmen, která jednoznačně určují jeho druh, jakost a pracovní podmínky. Hlavní vlastnosti BK určuje materiál a zrnitost brusiva, materiál pojiva, tvrdost, struktura, rozměry kotouče a maximální pracovní rychlost [2], [3], [24].

Charakteristika BK

Podle původu lze rozdělit brusivo na přírodní a umělé. Přírodní brusiva jsou diamant, křemičitý písek, pískovec, korund, pazourek, granát aj. Umělá brusiva jsou Al_2O_3 - oxid hlinitý (umělý korund), SiC - karbid křemíku (karborundum), B_4C – karbid bóru, CBN - kubický nitrid bóru, syntetický diamant. V současné době se vzhledem k výhodnějším vlastnostem používají brusiva umělá, jsou tvrdší a houževnatější [2], [3].

Zrnitost neboli velikost zrn je označena číslem dle normy ČSN ISO 525. Číslo udává počet ok síta na 1 anglický palec (25,4 mm), kterými zrna dané velikosti ještě propadla. Velikost zrn ovlivňuje jakost povrchu broušeného obrobku [3], [2].

Pojivo zajišťuje požadovaný tvar BK a určuje jeho použití. Spojuje zrna brusiva tak, aby docházelo k postupnému uvolňování zrn opotřebovaných a otupených, a do záběru se dostala zrna nová a ostrá. Tento mechanismus nazýváme samoostřicí schopností BK. Pojiva můžeme rozdělit do dvou kategorií, tj. organická (umělá pryskyřice, pryž, šelak, kliš) a anorganická (keramická, silikátová, magnezitová, kovová) [2], [3].

Tvrdość BK je dána odporem, který klade pojivo proti vylomení zrna brusiva. Tvrdość je označena písmenem od A do Y a určuje se dle obráběného materiálu a způsobu broušení. Čím vyšší je tvrdość obrobku a větší plocha styku BK s obrobkem, tím volíme menší tvrdość BK [2], [3].

Struktura charakterizuje poměr zrn brusiva, pojiva a pórů. Označuje se číslem, které vyjadřuje podíl pórů v procentech od 1 – 13. Struktura se ovlivňuje přísadami v pojivu při výrobě BK. Strukturu můžeme dělit na hutnou, pórovitou a zvláště pórovitou. Struktura ovlivňuje charakter obrábění (řezivost BK, jakost povrchu obrobku) [2], [3].

Vyvažování a orovnáování BK

Velmi důležitou součástí správné funkce BK je kvalitní vyvážení a orovnáání před samotným obráběním. Při nesprávném postupu může docházet k vibracím BK, tím k pálení povrchu obrobku, ke snížení jeho kvality či jeho zničení. U nevyváženého BK mohou odstředivé síly při velkých otáčkách vést až k jeho destrukci.

Vyvažování BK je statické a dynamické. Statické vyvažování je pomocí tělísek, které se nastavují v drážce příruby BK. Dynamické vyvažování spočívá v elektronicky řízeném posouvání těžiště BK do osy nástroje (vřetena stroje). Jeho výhodou je okamžitá změna těžiště v reálném čase přímo při procesu obrábění [3], [9], [26].

Udržování tvaru a ostrosti BK ovlivňuje velikost řezné síly a dosahovanou jakost povrchu. Orovnáování je obrobení pracovní části BK, kdy se jednotlivá zrna brusiva vylamují, tříští a přeřezávají, a tím obnovují řezivost, obnovují jeho tvar, odstraňují zachycené třísky. K orovnáování se používají orovnávače diamantové – jednokamenné, destičkové, kotoučové, prachové a orovnávací kladky [2], [3], [9].

1.2.2 Řezné podmínky při broušení

Geometrickou přesnost obrobku a jakost obrobené plochy určují řezné podmínky, tj. hloubka záběru, posuv, řezná rychlost BK. [2], [24].

Hloubka záběru závisí na druhu a způsobu broušení, tj. obvodové (hrubování do 0,075 mm/ot, na čisto do 0,001 mm/ot) nebo rovinné (hrubování do 0,04 mm, na čisto do 0,005 mm) [18], [26].

Posuv při broušení závisí na druhu a způsobu broušení, tj. obvodové (hrubování – ob. rychlost obrobku 15-35 m.min⁻¹, pod. posuv obrobku 5/6 šířky BK/ot nebo na čisto - ob. rychlost obrobku 8-16 m.min⁻¹, pod. posuv obrobku 1/10 šířky BK/ot) a rovinné (hrubování – rychlost posuvu stolu 8-18 m.min⁻¹, příčný posuv stolu 4/5 šířky BK nebo na čisto - rychlost posuvu stolu 8-18 m.min⁻¹, příčný posuv stolu 1/10 šířky BK) [24] [26].

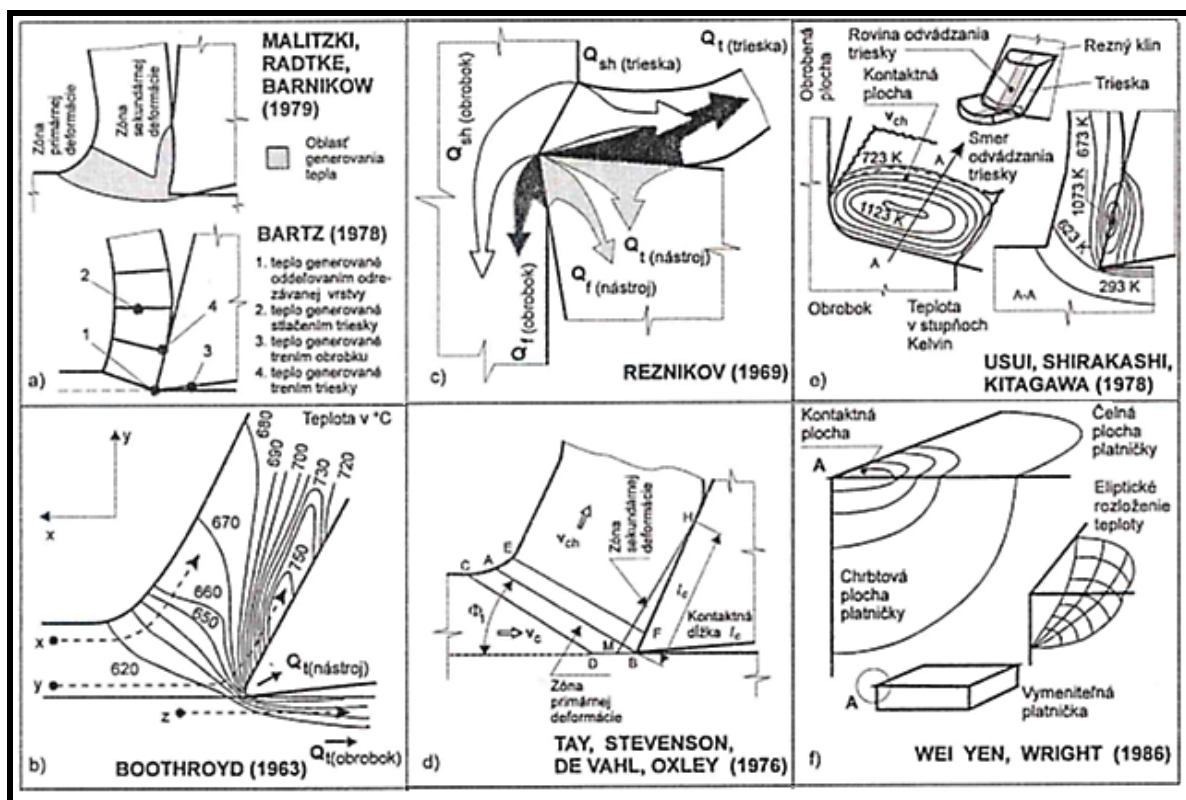
Řezná rychlost (obvodová rychlost BK) při broušení závisí na druhu broušení a druhu pojiva BK, tj. 20 až 35 m.s⁻¹ (běžné broušení, keramické pojivo BK), nad 120 m.s⁻¹ (rychlostní broušení, speciální BK s keramickou vazbou) a řezací kotouče rychlostí nad 100 m.s⁻¹ s pryskyřičným pojivem a vyztužených skelnými vlákny [2], [26].

Pro zpřesnění rozměru broušené plochy se provádí „vyjiskřování“, kdy se BK obrobek několikrát přebrousí bez přísuvu. V soustavě stroj - nástroj - obrobek - přípravek se tak vyrovnají pružné deformace způsobené vlivem řezných sil. [26].

2 TEPLA A ODVOD TEPLA PŘI PROCESU OBRÁBĚNÍ

2.1 Teplo při procesu obrábění

Průběhem tepelných jevů tvořících se při procesu řezání, tj. princip vnikání řezného klínu do obrobku, se zabývalo v průběhu let mnoho autorů (pro představu jsou zde uvedeni někteří významní autoři – 2.1 - 1).



Obr. 2.1 - 1 Zdroje tepla, rozložení teploty a teplotních polí při řezání;
a) MALITZKI, RADTKE, BARNIKOW (1979) objemové a plošné zdroje,
b) BOOTHROYD (1963) teplotní pole třísky,
c) REZNIKOV (1969) šíření tepla do třísky, obrobku a řezného klína,
d) TAY, STEVENSON, DE VAHL, OXLEY (1979) objemové zdroje tepla,
e) USUI, SHIRAKASHI, KITAGAWA (1978) teplotní pole na kontaktní ploše mezi třískou a řezným klímem,
f) WEI YEN WRIGHT (1986) eliptický model teplotního pole v řezném klínu [12]

Obecná charakteristika tepelného procesu

Vznik tepla a působení teploty při řezání, v řezném klínu, v tříse a na obrobené ploše, je důsledkem přeměny energie, která je potřebná na střižnou deformaci v primární oblasti, na překonání tření třísky na čelní ploše řezného klínu

a také na překonání tření hřbetu řezného klínu s povrchem obrobené plochy. Teplo Q je nevratnou veličinou, která se neustále obnovuje v zdrojích tepla určených oblastí řezání (místo řezu). V samotné oblasti řezání lze vymezit následující zdroje vznikajícího tepla [4], [12], [43]:

- 1) Teplo Q_{sh} vznikající deformací v střižné rovině, resp. teplo vznikající v primární oblasti deformací,
- 2) Teplo Q_t vznikající vnějším třením třísky na čele řezného klínu A_γ , resp. teplo vznikající v sekundární oblasti jako důsledek vnějšího a vnitřního tření při deformaci odřezávané vrstvy,
- 3) Teplo Q_f vznikající třením hřbetu plochy řezného klínu A_α na obrobené ploše, resp. teplo vznikající v terciální oblasti,
- 4) Teplo Q_k vznikající stlačením třísky, resp. teplo vznikající texturou třísky, zdrojem třísky je současně tvoření nehomogenity v plynulé tříске.

Teplo Q není stavovou veličinou, ale závisí na jevech deformace a tření při úběru odřezávané vrstvy. Jeho velikost se mění zároveň s časem řezání, tj. teplo Q se projevuje tzv. kumulativním efektem na řezném klínu a na obrobku. Jeho velikost se po určitém časovém okamžiku v řezném klínu nebo v obrobku nezvyšuje. Kumulativní účinek tepla sehrává významnou pozici při vysvětlování jevů při opotřebením řezného klínu [4], [16], [31].

Uvolňováním tepla $Q = Q_{sh} + Q_t + Q_f + Q_k$ se současně mění teplota v řezném klínu, v tříске a v povrchové vrstvě pod obrobenou plochou. Teplota tak vytváří spojitě rozložené teplotního pole v řezném klínu, v tříске a obrobku.

Tepelná bilance představuje jednu z forem bilance energie a přitom udává, že v daném místě a časovém intervalu je množství tepla odvedeného (prouděním, zářením či sáláním) rovno součtu tepla do daného místa přivedeného [12], [31].

$$Q = Q_{sh} + Q_t + Q_f + Q_k = Q_{sh(\text{obrobek})} + Q_{sh(\text{tříska})} + Q_{t(\text{tříska})} + Q_{t(\text{nástroj})} + Q_{f(\text{obrobek})} + Q_{f(\text{nástroj})} = Q_O + Q_N + Q_T + Q_P \text{ [J]} \quad (2 - 1)$$

Tato rovnice vyjadřuje pohlcení tepla vytvořeného střižnou rovinou a třením řezného klínu, třísky a obrobku při zanedbání účinků složky Q_k (tvořených sekundární deformací a stlačením třísky). Rovnice platí při zidealizovaném případě bez odvedeného tepla do okolního prostředí a současně vyjadřuje stav, při kterém je teplo konstantní [12].

Teplota θ (termodynamické veličina udávaná v °C nebo v °K) je fyzikální veličinou patřící mezi základní jednotky soustavy SI. Teplota tak charakterizuje tu skutečnost, kdy teplotně rovnovážný systém bude, resp. nebude, při teplotním kontaktu s jinými systémy v rovnováze. Teplotu při řezání lze uvést ve dvojnásobném vyjádření [12], [43]:

- 1) jako okamžitou hodnotu θ na izotermě teplotního pole řezného klínu, v tříске a v obrobku,

- 2) jako střední hodnotu θ_m získanou z rozličných způsobů měření teploty (např. termoelektrickými, resp. kalorimetrickými měřeními teploty apod.).

Vydané teplo způsobuje změny teploty, vytvořením teplotního pole, resp. teplotní vlnoplochy, kterým je charakterizován tzv. teplotní gradient teploty. Teplotní gradient představuje změnu teploty na jednotce určité vzdálenosti ve směru největší změny teploty. Pochopení významu a interpretace teplotního gradientu je nevyhnutelné pro popis okamžitých teplot a teplotního pole při řezání nástroji **s definovanou geometrií -soustružení** (Fourier - Kirchhoffova rovnice) a **s nedefinovanou geometrií -broušení** (Jaeggerův pohyblivý zdroj tepla) [12].

Střední teplo Q_m a střední teplota θ_m při řezání, jako veličiny zjišťované měřeními, vykazují vždy závislost na řezných podmínkách. Vliv řezné rychlosti na střední teplo Q_m a na střední teplotu θ_m při řezání určuje tzv. kumulativní efekt středního tepla Q_m a střední teploty θ_m , přestože u obou veličin je možný jen po určitou hodnotu řezné rychlosti, po jejím překročení se vznikající teplo nezvyšuje. Střední teplota θ_m roste vlivem řezné rychlosti jen v kontaktu čelní plochy řezného klínu a třísky, kumulativní efekt se vyskytuje přednostně při střední teplotě v tříске a v obrobku [12].

Zdroje tepla při řezání je možné popsat prostřednictvím účinků působících složek řezných sil, tj. F_c , F_{sh} , F_t , resp. účinkem střížného napětí působícího ve střížné rovině. Pro vznik tepla má význam kontaktní délka l_c mezi čelní plochou řezného klínu a třískou a kontaktní délkou mezi plochou opotřebenou VB a obrobenou plochou. Vztahy pro geometrickou interpretaci oblasti řezání a řezné síly umožňují vyjádřit velikost vznikajícího tepla rovinnými zdroji, které jsou popsány vztahy [12], [34]:

- 1) plochou střížné roviny S_{sh} :

$$Q_{sh} = F_{sh} \times v_{sh} = \frac{\tau_{sh} \times b \times h \times \cos \gamma_n}{\sin \Phi_1 \times \cos(\Phi_1 - \gamma_n)} \times v_c \quad (2 - 2)$$

- 2) a třením dvojice tříska – čelní plocha řezného klínu:

$$Q_t = F_t \times v_{ch} = \frac{\tau_{sh} \times b \times h \times \sin \beta}{\cos(\Phi_1 + \beta - \gamma_n) \times \cos(\Phi_1 - \gamma_n)} \times v_c \quad (2 - 3)$$

Potom „celkové“ teplo $Q = Q_{sh} + Q_t$ tvoří účinek složky řezné síly F_c a řezné rychlosti v_c :

$$Q = F_c \times v_c = \frac{\tau_{sh} \times b \times h \times \cos(\beta - \gamma_n)}{\sin \Phi_1 \times \cos(\Phi_1 + \beta - \gamma_n)} \times v_c \quad (2 - 4)$$

Do obrobku přechází jen část tepla Q_{sh} určená tzv. Wienerovou rozdělovací funkcí Γ , která je závislá na hodnotě úhlu Φ_1 . Přeměnou části tepla Q_{sh} v tříске nabude střední přírůstek teploty v důsledku střížné deformace [12]:

$$\Delta\theta_{sh} = \frac{(1 - B_1) \times \gamma_{sh} \times \tau_{sh}}{\rho \times c} = \frac{(1 - B_1) \times Q_{sh}}{\rho \times c \times v_c \times h \times b} \quad (2 - 6)$$

B_1 - se určuje podle teoretického průběhu Weinerové rozdělovací funkce $\Gamma = f(Pe; \Phi_1)$,

a v důsledku tření na čelní ploše:

$$\Delta\theta_t = \frac{Q_t}{\rho \times c \times v_c \times h_c \times b} \quad (2 - 7)$$

Teplo vztažené k procesu soustružení

Popisem vedení tepla, resp. teploty, při řezání nástroji s definovanou geometrií - soustružení řeší Fourier – Kirchhoffovu rovnice, která vyjadřuje přeměny vznikajícího tepla Q_{sh} a Q_t (popř. dalších zdrojů tepla vyjádřených třením hřbetu plochy řezného klínu s obrobenou plochou) na přírůstek teploty v řezném klínu, v třísce a obrobku [12], [15].

Všeobecný tvar Fourier – Kirchhoffovy rovnice pro neustálený teplotní proces:

$$\nabla^2\theta(x, y, z) - \frac{v}{a} \times \text{grad}\theta(x, y, z) + \frac{q_v}{\lambda} = \frac{1}{a} \times \frac{\partial\theta}{\partial t} \quad (2 - 8)$$

Rovnice (2 – 8) byla sestavena dle 1. věty termodynamické a Fourierova zákona vedení tepla [12], [37], [43].

Neustálený teplotní proces podle rovnice (2 – 8) vyjadřuje teplotu θ proměnnou v čase (pravá strana rovnice) vlivem přenosu tepla ve směrech $[x; y; z]$. Ustálený teplotní proces nastává při $\partial\theta/\partial t = 0$. Z rovnice (2 – 8) potom je možná pro ustálený teplotní proces (tvorba plynulé třísky, deformace řezného klínu při soustružení) vyjádřit v tvaru [12], [15]:

$$\nabla^2\theta(x, y, z) - \frac{1}{a} \left(v_x \frac{\partial\theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial\theta}{\partial y} + v_z \frac{\partial\theta}{\partial z} \right) + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \quad (2 - 9)$$

Při formulaci je nevyhnutelné vždy formulovat interpretaci vektoru $\mathbf{v} = \mathbf{v}[v_x; v_y; v_z]$. Například při zkoumání teplotního pole v plynulé třísce $v_x \equiv v_c$ a změnou orientace souřadné soustavy „xy“ možno uvažovat $v_x \equiv v_{ch}$, na obrázku 2.1 – 2.

Další podmínkou pro řešení Fourier – Kirchhoffovy rovnice (2 – 9) jsou okrajové podmínky, které specifikují izolaci teplotního systému vůči prostředí. Pro ustálený teplotní proces jsou formulovány okrajové podmínky jako [12], [15]:

$$1. \text{ druhu: } -\theta = \theta_s \quad (2 - 10)$$

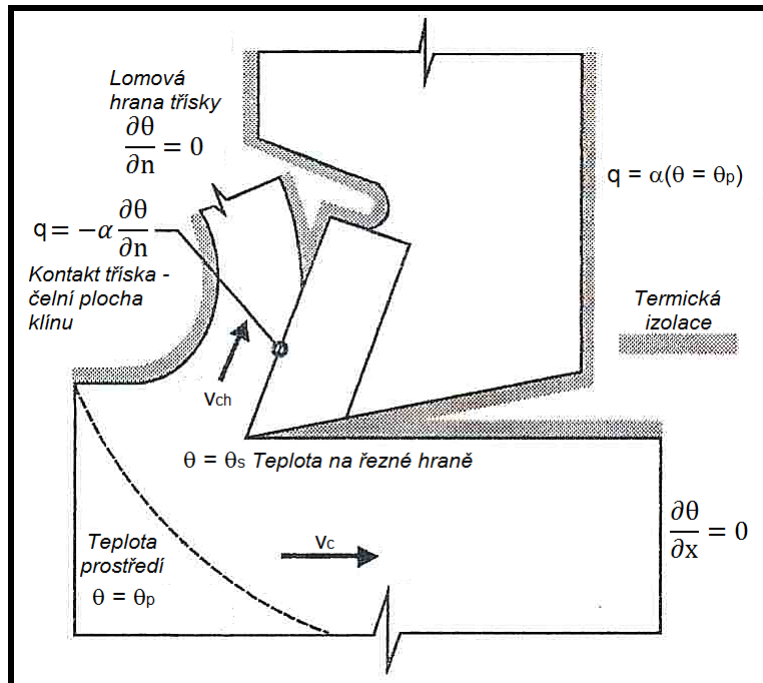
teplota řezného klínu odpovídá teplotě řezné hrany S,

$$2. \text{ druhu: } q = -\lambda \times \frac{\partial\theta}{\partial n} \quad (2 - 11)$$

jako podmínka šíření tepla, resp. teploty (do řezného klínu, třísky a obrobku) přes určitou plochu (třísky s řezným klínem $l_c \times b$, střižná rovina S_{sh} , opotřebený hřbet s obrobenou plochou $V_B \times b$) přičemž n je normála k příslušné ploše.

$$3. \text{ druhu: } \lambda \times \frac{\partial\theta}{\partial n} = \alpha(\theta - \theta_p) \quad (2 - 12)$$

jako podmínka tvorby tepelného toku pro plochy teplotní soustavy (plocha řezného klínu, obráběná plocha, volná plocha vytvořené třísky). Podmínka 3. druhu vyjadřuje teplotní prostupnost vůči teplotě prostředí θ_p a představuje přenos tepla konvekcí, na obrázku 2.1 – 2 [12].



Obr. 2.1 – 2 Okrajové podmínky pro ustálený teplotní proces [12]

Při řešení přenosu tepla, rozložení teplotních polí a termických napětí v řezném klínu je zapotřební formulovat podmínky $\theta = \theta(x; y; z)$ a $q_v = f(t)$, případně $q_v = \text{konst.}$, přičemž q_v obsahuje všechny zdroje tepla. Při ustáleném teplotním toku platí $\partial\theta/\partial t = 0$ a Fourier – Kirchhoffova rovnice má tvar [12], [16], [37]:

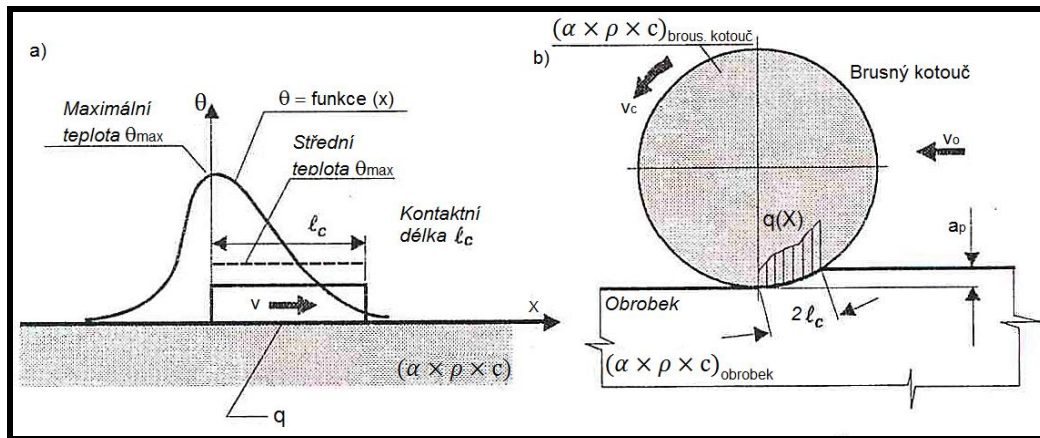
$$a \times \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) - \left(v_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial \theta}{\partial y} + v_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{q_v}{\rho \times c} = 0 \quad (2 - 13)$$

Teplo vztažené k procesu broušení

Teplo u nástrojů s nedefinovanou geometrií – broušení vzniká jako důsledek jevů spojených s abrazivním mechanismem úběru odřezávané vrstvy, tj. účinkem mikrořezání, mikrorytí a mikrozahlazování brusnými zrnny. BK je pojímán jako složené těleso, které určuje jeho struktura. Přenos se uskutečňuje konvekcí [12].

Teorie pohyblivého tepelného zdroje (Jaeger) představuje kluzný kontakt pro spojitě rozložené hustoty teplotního toku $q=q(X)$ s délkou l_c , na obrázku 2.1 – 3 a) pro dvojrozměrný kluzný kontakt s délkou l_c rozložení okamžité teploty θ , střední teploty θ_m a velikost maximální teploty θ_{\max} ve směru pohybu x ; na obrázku 2.1 – 3 b) interpretace dvojrozměrného kluzného kontaktu při broušení). Kluzný kontakt l_c je úplný izolant vykazující rychlost v (při broušení to odpovídá veličině rychlosti broušeného předmětu v_o [m.s⁻¹] odpovídající rychlosti pohybu tepelného zdroje)

na tělese s délkou $x \rightarrow \infty$ (čemu při broušení odpovídá délka broušeného předmětu $l \gg l_c$) [12].



Obr. 2.1 – 3a/b Jaegerův pohyblivý zdroj tepla [12]

Použití Jaegerovy teorie pohyblivého tepelného zdroje lze definovat rozložení hustoty tepelného toku q formou bezrozměrných veličin. Když vyjádříme bezrozměrné veličiny X a Y pomocí souřadnic x a y v přirozeném měřítku a podobnou transformaci vykonáme pro veličinu l_c , potom pomocí tepelné difuzivity a [$m^2 \cdot s$] dostaneme vztahy [12]:

$$X = v \times \frac{x}{2a}; \quad Y = v \times \frac{y}{2a}; \quad L = v \times \frac{l_c}{2a} \quad (2-14)$$

Veličina L odpovídá Pecletovu číslu $L \equiv Pe = v_o \times l_c/a > 10$, které představuje kritérium geometrické a termodynamické podobnosti a vyžaduje teplotní proces při uvažování pohybu prostředí a fyzikálních vlastnostech materiálu BK [12].

Všeobecný tvar velikosti θ pro Jaegerův pohyblivý zdroj:

$$\frac{\pi \times \theta \times \lambda \times v}{2 \times q \times a} = \int_{X-L}^{X+L} \exp\left[-\frac{v \times (x-X)}{2a}\right] \times K_0\left\{\frac{v}{2a} \times \sqrt{(x-X)^2 + y^2}\right\} \times q(X) \times dX \quad (2-15)$$

kde: K_0 – je modifikovaná Besselova funkce druhého druhu a řádu nula.

Základní vztahy pro Jaegerův pohyblivý tepelný zdroj při broušení uvažuje $q(X) = 1$. Pro dvourozměrný kluzný kontakt s délkou l_c s rozložením okamžité teploty θ na střední a maximální teploty θ_m a θ_{max} na broušeném povrchu vyjádřitelné vztahy [12]:

$$\theta_m = \frac{0,754 \times q(X) \times l_c}{\lambda \times \sqrt{L}} \quad (2-16)$$

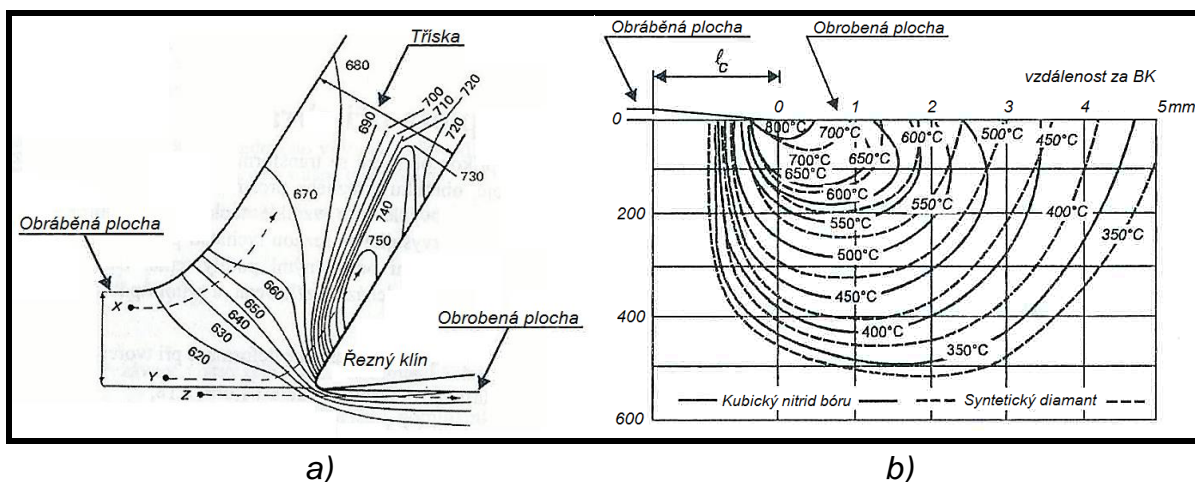
$$\theta_{max} = \frac{1,131 \times q(X) \times l_c}{\lambda \times \sqrt{L}} = 1,50 \times \theta_m$$

Použití Jaegerového pohyblivého tepelného zdroje pro výpočty tepelných jevů při broušení musí splňovat následující základní předpoklady (podmínky):

- 1) Obrobek je poloohraničené těleso, čemu odpovídá vysoký poměr průměru BK vůči délce kontaktu l_c . Tato podmínka je splněná také vůči rozměru y broušeného předmětu.
- 2) Pohyblivý tepelný zdroj je rovnoměrný, podmínka rovnoměrnosti je splněna šířkou BK.
- 3) Rovnoměrně rozložený pohyblivý zdroj tepla s plošnou hustotou $q(X) = 1$ představuje pás se šířkou odpovídající šířce odřezávané (broušené) vrstvy. Podmínce 1) taktéž odpovídá poměr šířky broušení b vůči délce kontaktu l_c ,
- 4) Ve směru pohybu není vykazované vedení tepla konvekcí,
- 5) Pohyblivý tepelný zdroj působí jen na horizontální rovině (podmínka odpovídá operaci při rovinném broušení) [12].

Z výše uvedených skutečností vyplývá, že teplo resp. teplota nepřímo, ale zásadně, ovlivňuje řezné procesy při obrábění a tím produktivitu a ekonomičnost výroby, a proto je sledování, resp. měření, teploty nejčastěji měřenou veličinou.

Teplo vznikající v procesu obrábění přechází z míst s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou a způsobuje tak jejich ohřátí, tj. změnu jedné jejich stavové veličiny teploty, na obrázku 2.1 – 4. To se týká především řezného klínu, třísky nebo obrobku a nejméně okolního prostředí. Každý hmotný bod této soustavy je, podle vzdálenosti od zdroje tepla a podle své tepelné vodivosti, zasažen různým jeho množstvím. Různé body mají proto různou teplotu, nazývanou „okamžitá teplota“ hmotného bodu řezného klínu, třísky nebo obrobku. Mezi nimi je možno najít body o stejné teplotě. Tyto body vytvářejí isotermickou plochu. Soustava těchto ploch představuje teplotní pole a to buď v řezném klínu, v třísce nebo v obrobku. Určovat teplotu těchto hmotných bodů je velmi obtížné, proto se zpravidla zjišťuje „střední teplota“. Za ní považujeme průměrnou teplotu hmotných bodů jednotlivých členů soustavy řezný klín, tříska a obrobek. Podle toho pak jde o střední teplotu řezného klínu, třísky a obrobku. Při obrábění vzniká nejvíce tepla na místech styku řezného klínu s třískou a s obrobkem. Střední hodnota těchto stykových ploch je označována pojmem „teplota řezání“ [4], [31], [36].

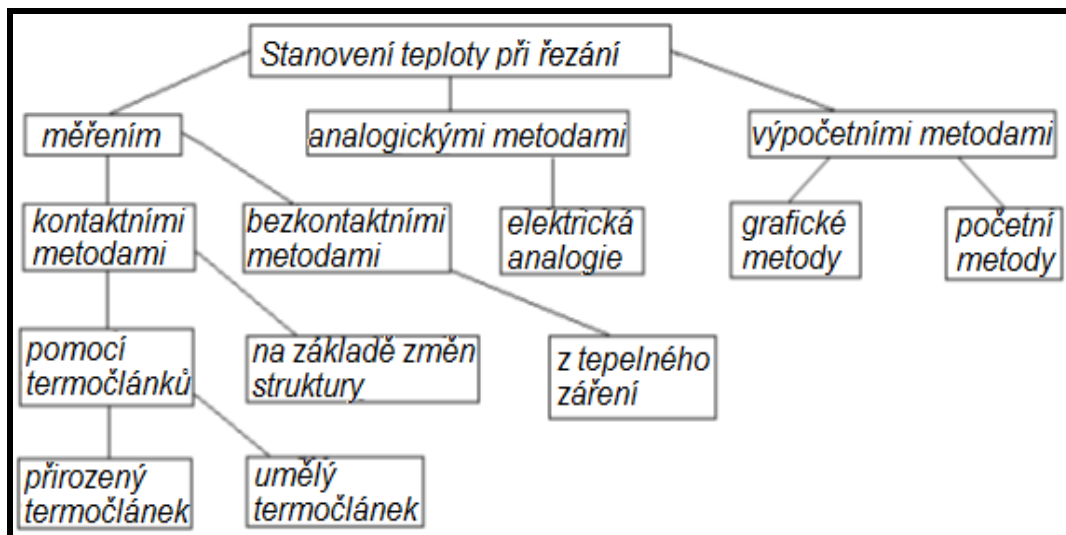


Obr. 2.1 - 4 Rozložení teplot při procesu a) soustružení, b) broušení [12], [18]

2.2 Měření teploty při procesu řezání

Pro studium teplotních stavů a stanovení teploty při řezání byla vyvinuta řada metod fyzikálních, fyzikálně-chemických či chemických, na obrázku 2.2 – 1.

Pro měření teploty řezání, se dají z hlediska měřicí techniky použít zejména ty metody, které využívají termoelektrického efektu, změny struktury a tepelného záření. První dvě metody umožňují měření uvnitř materiálů, třetí pak ke stanovení teploty povrchu materiálů měřením ze vzdálenosti [2], [3], [17].



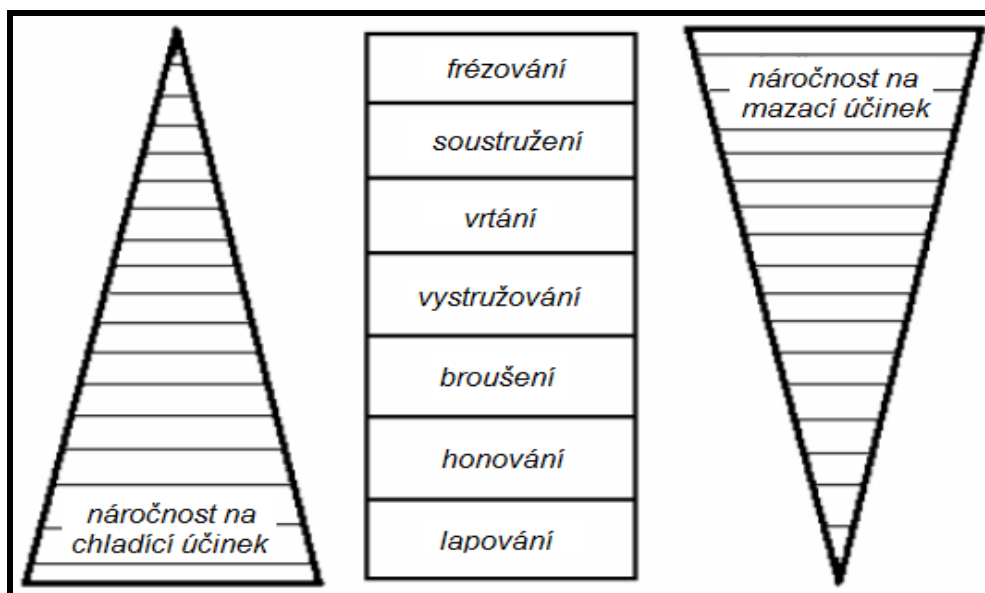
Obr. 2.2 - 1 Rozdělení metod měření teplotních stavů [2]

K měření teploty řezání u obrábění jsou, vzhledem k specifikám jednotlivých technologií a získané přesnosti, nejvýhodnější metody přímého měření a to pomocí termočlánků, přirozených či umělých. Převážná část tepla se kumuluje v řezném klínu a v obrobku. Termočlánek je možné umístit přímo do řezného prostoru a to do řezného klínu či obrobku. Jednoduchostí a universálností použití se ukazuje jako výhodnější umělý termočlánek. Zařízení k měření je složeno z termočlánku, jako snímače termoelektrického napětí, ze sběrnice, k převodu mV na °C, a z provozní a řídicí jednotky, na zpracování dat a jejich uložení. Umělý termočlánek typu „K“ tvoří spoj špiček dvou vodičů z různých slitin kovů (Ni-Cr a Ni-Al), připevněný k povrchu řezného klínu nebo obrobku [2], [4].

2.3 Odvod tepla z procesu řezání

Při procesu řezání se výrazná část vložené energie transformuje na teplo, které nepříznivě ovlivňuje různé aspekty tohoto procesu. Z tohoto důvodu je snahou vznikající teplo co nejrychleji odvést z místa řezu do okolního prostředí a tím docílit snížení tohoto vlivu na proces řezání. Použitím PM docílíme výrazného snížení teploty a množství tepla vznikajícího při procesu řezání. PM mohou nejen snížit teplotu – chladící účinek, ale také podpořit proces řezání – mazací účinek, a také se podílejí na odstranění vytvořených třísek z místa řezu – čistící účinek. U jednotlivých druhů technologií se vyžaduje různý poměr těchto účinků od

daného PM. Na obrázku 2.3 – 1 je zobrazen poměr náročnosti dané technologie na chladicí nebo mazací účinek [2], [35], [41].



Obr. 2.3 – 1 Náročnost technologie na účinky procesního média [31]

Chladicím účinkem se rozumí schopnost PM odvádět teplo z místa řezu. Tuto schopnost má každé PM, které smáčí či ofukuje (omývá) místo řezu a způsobuje tepelný spád mezi stykovými plochami a médiem. Čím je vyšší teplota v místě řezu, tím větší jsou požadavky na odvod tepla. Velikost chladicího účinku spolurozhoduje o tom, do jak vysoko exponovaných řezných podmínek může být ŘN použit [17], [43].

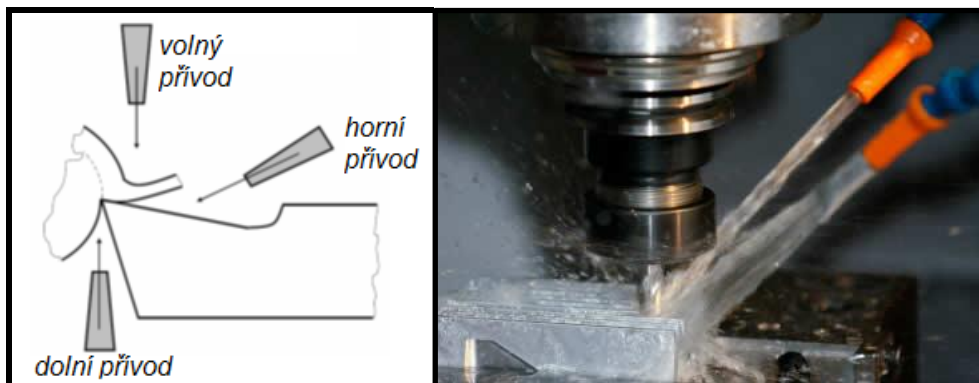
Mazací účinek je schopnost PM vytvořit v místě řezu příslušnou tlakovzdornou vrstvu zajišťující snížení tření mezi nástrojem a třískou a mezi nástrojem a obrobkem. Tento účinek se silně projevuje při obrábění na čisto. Vzhledem k velikosti tlaků, které se objevují při řezání kovů, nemůže proto nikdy dojít ke kapalnému tření, s jakým se setkáváme při mazání strojů. Mazací schopnost PM má významný vliv i na velikost řezných odporů a spotřebované energie [4], [17].

Důležitým úkolem PM je odstraňovat třísky, které při řezání vznikají. Kovové částičky spolu s prachem z ovzduší se slepují a způsobují jednak zhoršení řezné schopnosti nástrojů (např. zanášení, zalepování a otupování ŘN) a jednak poškození funkčních ploch obráběcích strojů. Čisticí účinek je nutný téměř při všech výrobních operacích a je také jedním z důvodů, proč se při třískovém opracování kovů používají PM. Zvláštní důležitost má tento účinek při broušení, a to pro nutnost čistit BK, při řezání závitů či při hlubokém vrtání, kde je třeba velmi rychle odstraňovat třísky z místa řezu [4], [35].

Způsob přívodu procesního média

Nepřímá metoda chlazení spočívá v ochlazování místa řezu přívodem PM přes trysku umístěnou mimo ŘN, na obrázku 2.3 - 2. Tato metoda velmi závisí na tepelné vodivosti materiálu ŘN a obrobku, protože přímému přístupu PM do místa

řezu brání odcházející tříska. Tím se snižuje efektivita tohoto způsobu chlazení. Na druhou stranu lze tento způsob použít víceméně pro jakoukoliv technologii obrábění [2], [17], [41].



Obr. 2.3 – 2 Přívod PM – nepřímá metoda [31], [41]

Přímá metoda chlazení umožňuje přivedení PM mezi třísku a čelo ŘN či mezi hřbet ŘN a obrobek, na obrázku 2.3 - 3. Proud média pomáhá zvednout třísku, tím zároveň sám sobě umožňuje lepší přístup k místu řezu, a ještě lépe chladí. Na rozdíl od předchozího způsobu tříska neblokuje proudění PM. Médium nejen absorbuje teplo, ale tvoří kapalino-plynový polštář mezi třískou a čelem ŘN, který funguje jako mazivo. V důsledku toho se snižuje koeficient tření, jakož i sekundární deformace třísky. Mazací a chladicí efekt na nejteplejším místě snižuje teplotu ŘN, čímž účinně snižuje jeho opotřebení. Pomocné trysky mohou být dodatečně přidány na ochlazování hřbetu ŘN a tím dalšímu snížení opotřebení [2], [17].



Obr. 2.3 – 3 Přívod PM – přímá metoda [38], [41].

2.3.1 Procesní média

PM se obecně dělí na procesní plyny (PP), procesní kapaliny (PK) a vzájemná kombinace těchto dvou typů PP + PK. PP by se dali obecně rozdělit na vzduch, tlakový podchlazený vzduch a zkapalněné plyny. PK je možné rozdělit na kapaliny vodou mísitelné (vodné roztoky, emulze, polysyntetické a syntetické kapaliny) a kapaliny vodou nemísitelné (mastné oleje a tuky, minerální oleje, zušlechtěné

řezné oleje). Při vzájemnou kombinací PP a PK lze získat výhody od obou médií (chlazení mlhou, neboli chlazení za minimálního přívodu PK - metoda MQL) [3], [4], [26].

2.3.1.1 Chlazení procesními plyny

Nejjednodušší chlazení místa řezu PP je řezání za sucha, tj. pouze vzduchem. Některé obráběné materiály, jako například nástrojové, se chladí přivedeným tlakovým podchlazeným vzduchem. A některé těžkoobrobitelné materiály přívodem zkapalněného oxidu uhličitého či zkapalněného dusíku [2], [19], [39].

Obrábění za sucha

Obrábění za sucha je jedním z nových trendů v oblasti obrábění. Důležitým faktorem při obrábění za sucha je vysoká teplota v místě řezu, která ovlivňuje především trvanlivost ŘN, ale i volbu obráběného materiálu. Je dokázáno, že snížením teploty o 25°C se jeho trvanlivost prodlouží až trojnásobně. Obrábění za sucha se využívá především u soustružení při vyšších řezných rychlostech, na obrázku 2.3 – 4 [19] [39].



Obr. 2.3 – 4 Obrábění za sucha [50]

Výhodou obrábění za sucha je snížení vlivu na lidské zdraví (dýchací obtíže, alergie, onemocnění pokožky při kontaktu) a také na životní prostředí (kontaminace okolí stroje, prostoru skladování, manipulace a dopravy). Významným aspektem jsou ekonomické úspory (náklady manipulaci, skladování a likvidaci použitých PK a likvidaci znečištěných třísek).

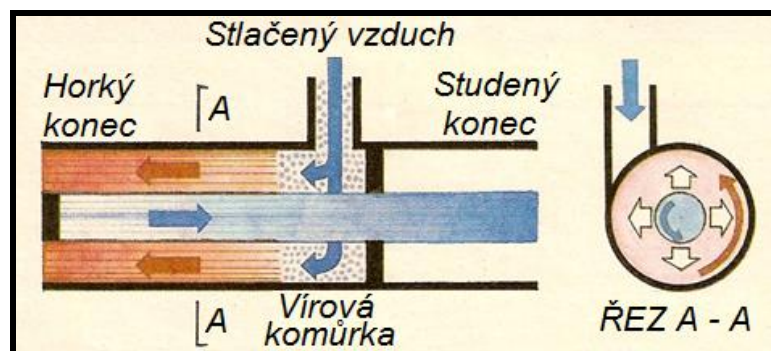
K nevýhodám obrábění za sucha patří nutnost volby materiálu ŘN a jeho vhodné geometrie (odolnost vůči vysokým teplotám), řešení tvorby třísek a jejich odvodu z místa řezu.

Chlazení za použití podchlazeného vzduchu

Podchlazený vzduch lze získat např. zařízením zvaným „vírová trubice“ (VT), která, použitím pouze filtrovaného stlačeného vzduchu o tlaku 5,5 - 7 barů,

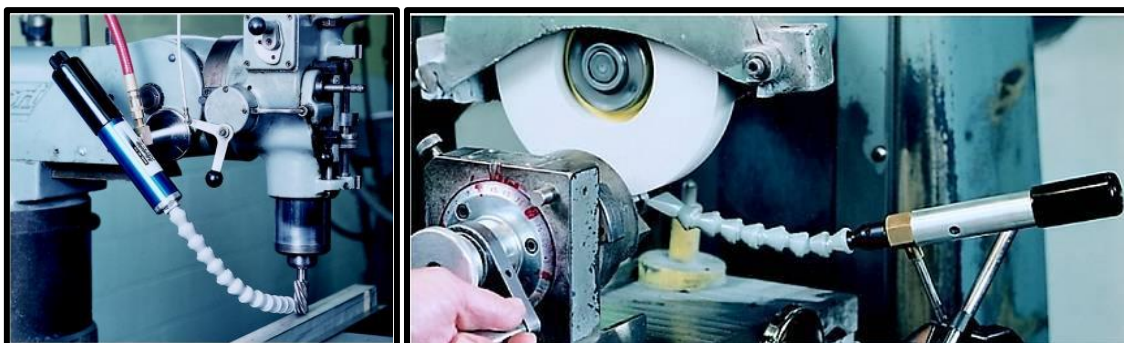
vytvoří dva proudy vzduchu. Jeden studený (až $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$) a druhý horký (až $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$) bez nutnosti použití elektrické energie, freonů nebo pohyblivých součástí [19], [33].

Princip vírové trubice, na obrázku 2.3 – 5, je založen na stavu dynamické rovnováhy, kterého dosáhneme takto: Proud vzduchu vstupuje do trubice, je odstředivou silou držen v blízkosti stěn trubice a postupuje po spirále směrem k ventilu (na obrázku doleva), přičemž rotuje velkou úhlovou rychlostí dosahující až desítek tisíc otáček za sekundu. Na konci trubice je umístěn výstupní ventil, kterým je možné regulovat množství vzduchu vycházejícího tímto „horkým koncem“ trubice, protože vzduch zde vystupuje silně zahřátý. Část vzduchu se však odráží zpět směrem k opačnému konci (na obrázku k pravému). Tato část vzduchu postupuje opět za současného vířivého pohybu, vírovou komůrkou a otvorem na jejím „studeném konci“ ven z přístroje, protože tudy vycházející vzduch je silně zchlazený. Regulace chlazení a ohřívání, jakož i poměrné množství obou složek, se provádí výstupním ventilem [33], [47].



Obr. 2.3 – 5 Princip RanqueHilschovi vírové trubice. [47]

Průmyslově byla tato metoda využita například v zařízení - *Cold Air Gun*, na obrázku 2.3 – 6, která využívá filtrovaný stlačený vzduch a princip vírové trubice pro vytvoření mrazivého proudu vzduchu k vytvoření bodovém chlazení u mnoha průmyslových aplikací. Chlazení podchlazeným vzduchem významně zvyšuje životnost ŘN (až o 50%) a produktivitu práce (až o 36%), v porovnání s obráběním za sucha. Účinné chlazení pomocí *Cold Air Gun* eliminuje přehřívání v místě řezu [33], [47].



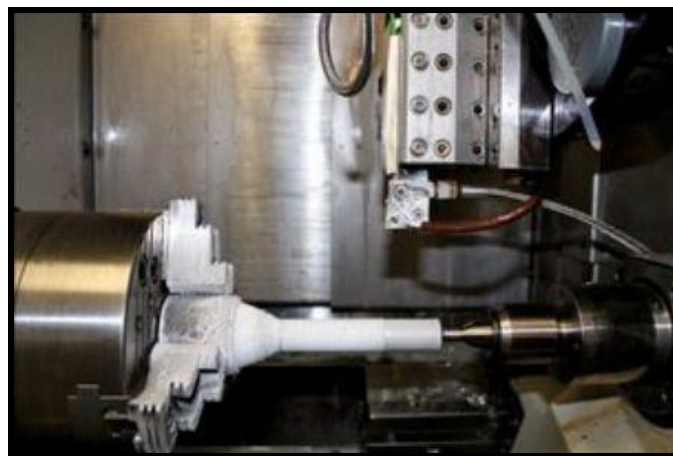
Obr. 2.3 – 6 Průmyslová využití principu vírové trubice – *Cold Air Gun* [33]

Výhodou využití principu vírové trubice je okamžitý náběh chlazení nebo ohřívání, ekologický provoz (odstraňuje problém s kontaminací prostředí a další náklady spojené s používáním PK). Vystupující proud vzduchu pomáhá čistit obrobek od třísek ofukováním, zlepšuje dodržování rozměrové tolerance a kvalitu povrchu obráběné plochy.

Nevýhodou této metody může být její použitelnost pouze pro nepřímý způsob chlazení, nutnost dostatečného prostoru v okolí ŘN a obrobku pro umístění vírové trubice.

Chlazení za použití zkapalněného oxidu uhličitého

Metoda chlazení spočívá v přívodu tenkého paprsku plynu CO₂ tryskou (Ø 0,3 mm) do místa řezu pod tlakem až 7 MPa. Vycházející plyn je podchlazený, s teplotou až – 120°C. Rozpínání způsobuje krystalky “sněhánky“, na obrázku 2.3 – 7. Ty místo řezu ochlazují a krystalky snižují tření, působí stejně jako mazivo, a ještě mechanicky odstraňují z povrchu ŘN a obrobku všechn odebíraný materiál (třísky). Tento způsob chlazení je zvláště vhodný u těžkoobrobitelných materiálů (například titanu, slitin niklu, duplex ocelí), kdy při řezání dochází k velkému tepelnému zatížení, hlavně ŘN a tím k jeho vysokému opotřebením. S cíleným chlazením do místa řezu lze dosáhnout zvýšení trvanlivosti ŘN a také zvýšení řezných rychlostí, a tím zvýšení produktivity obrábění [40], [42].



Obr. 2.3 – 7 Přívod CO₂ ve formě tryskaného sněhu [40].

Výhodou využití zkapalněného CO₂ je okamžitý náběh chlazení, ekologický provoz (odstraňuje problém s kontaminací prostředí a další náklady spojené s používáním PK). Vystupující proud pomáhá čistit obrobek od třísek ofukováním a zlepšuje dodržování rozměrové tolerance a kvalitu povrchu obráběné plochy.

Nevýhodou použití jsou především vyšší pořizovací náklady na zkapalněný CO₂ (fixní i provozní). Dále bezpečnost práce při jeho používání. Musí být zajištěn dokonalý systém odsávání a větrání pracoviště, systém skladování a manipulace se zkapalněným CO₂ na pracovišti, skladování i dopravě.

Chlazení za použití zkapalněného dusíku

Dusík je v plynné podobě součástí vzduchu, nejčastěji se používá jako inertní ochranný plyn v železářském, ocelářském průmyslu a v dalších metalurgických a chemických procesech. Pro účely obrábění se používá ve zkapalněném stavu. Za atmosférického tlaku dochází k varu při teplotě $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, což odpovídá teplotě $77\text{ }^{\circ}\text{K}$. Z jednoho litru kapalného dusíku vznikne odpařením (při teplotě 20°C) asi 680 litrů plynu. Zkapalněný dusík je přepravován ve speciálních zásobnících „Dewarových nádobách“ určených k jeho skladování a transportu [E], [32], [40].

Přívod zkapalněného dusíku do místa řezu umožňuje jeho var za atmosférického tlaku a teploty. Plynná fáze dusíku se využívá k vytlačení kapalné fáze do trysky či ŘN. Při využití topné spirály umístěné v zásobníku dusíku lze odpařování zintenzivnit a tím docílit vyššího tlaku a výstupní rychlosti kapalné fáze z trysky, na obrázku 2.3 – 8 [E], [32], [52].



Obr. 2.3 - 8 Přímé chlazení pomocí zkapalněného dusíku [50]

Výhodou použití zkapalněného dusíku je vysoký chladicí účinek, ekologický provoz (odstraňuje problém s kontaminací prostředí a další náklady spojené s používáním PK). Vystupující proud pomáhá čistit obrobek od třísek (omýváním a ofukováním) a zlepšuje dodržování rozměrové tolerance a kvalitu povrchu obrobene plochy.

Nevýhodou jsou především vysoké pořizovací náklady na zkapalnění dusíku (fixní a provozní). Dále bezpečnost práce při jeho používání. Musí být zajištěn dokonalý systém odsávání a větrání pracoviště, systém skladování a manipulace se zkapalněným dusíkem na pracovišti, skladování i dopravě.

2.3.1.2 Chlazení procesními kapalinami

Chlazení PK je v současné době nejrozšířenější způsob chlazení v průmyslu, které se převážně uskutečňuje s použitím kapalin vodou mísitelnými (vodné roztoky, emulze, polysyntetické a syntetické kapaliny) a kapalin vodou nemísitelnými (mastné oleje a tuky, minerální oleje, zušlechtné rezní oleje). PK kombinují chladicí i mazací účinek a dle poměru složení lze jeden či druhý účinek zvýšit [17], [19], [53].

Chlazení za použití vodou mísitelné PK

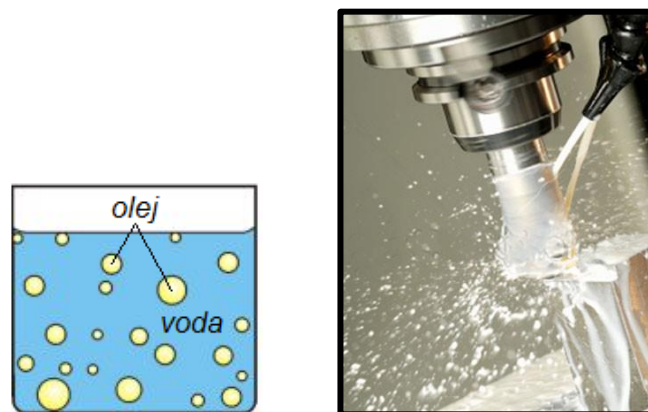
Voda je nejdostupnější i nejlevnější formou chladicí kapaliny, která dobře odvádí teplo z prostoru řezu. Neupravená voda má mnoho nedostatků, pro které ji není možné používat přímo jako PK.

Spojením vody a minerálního oleje vzniká emulzní kapalina, tj. disperzní soustava dvou vzájemně nerozpustných kapalin, z nichž jedna tvoří mikroskopické kapky rozptýlené v kapalině druhé. Spojuje, do určité míry, přednosti vody i mazacích olejů. Největším podílem emulzní kapaliny je voda, na obrázku 2.3 – 9 [2], [10].

Polysyntetické emulzní kapaliny jsou směsí minerálního oleje doplněného, v určitém procentu, o syntetické komponenty.

Syntetické emulzní kapaliny jsou homogenní roztoky vzájemně mísitelných látek, na rozdíl od plně minerálních a polysyntetických kapalin, neobsahují olej [2], [10].

Polysyntetické a syntetické emulzní kapaliny jsou stabilní, mají výborné chladicí schopnosti a dlouhodobou ochranu proti korozi, proto jsou především používány u obráběcích center [2], [10], [41].



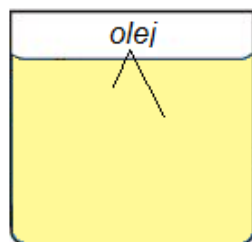
Obr- 2.3 – 9 Vodou mísitelné procesní kapaliny [41]

Chlazení za použití vodou nemísitelné PK

Mastné oleje a tuky jsou látky živočišného nebo rostlinného původu, které mají velice dobrý mazací účinek, vzhledem k značné přilnavosti ke kovům [2], [19].

Minerální oleje jsou vyrobeny z ropy, mají dobrou mazací schopnost, horší chladicí účinek, velmi dobrý ochranný účinek a dobrou odolnost vůči stárnutí. Mají příznivý vliv na ŘN, obráběcí stroj i obrobek, na obrázku 2.3 – 10 [2], [9].

Řezné oleje jsou minerální oleje zušlechtěné přísadami ke zvýšení mazivosti a tím ke zlepšení řezných a mazacích schopností ŘN. Pro zušlechtění olejů se nejlépe osvědčily sloučeniny síry, chloru a fosforu [2], [10].



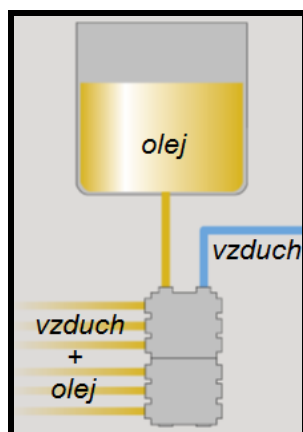
Obr. 2.3 – 10 Vodou nemísitelné procesní kapaliny [41]

Výhodou použití PK je okamžitý náběh chladícího, mazacího i čistícího účinku. Vystupující proud kapaliny zvýší několikanásobně trvanlivost ŘN, zlepšuje dodržování rozměrové tolerance a kvalitu povrchu obrobeneé plochy.

Nevýhodou této metody je možný problém s kontaminací okolního prostředí a další náklady spojené s používáním PK i jejich likvidace. Zavedení následných operací pro odstranění PK z třísek nebo z obrobku.

Chlazení pomocí metody MQL (mlhy)

Chlazení MQL je chlazení pomocí stlačeného vzduchu (z prvního zásobníku) a PK, které je přisávána v minimálním množství (z druhého zásobníku). Metoda MQL (Minimal Quantities of Lubricant) je nová varianta, u nás již dříve známé metody mazání mlhou, na obrázku 2.3 – 11a. Tento princip je používán především tam, kde není možné obrábět zcela za sucha nebo nelze použít větší množství PK. Jedním z průmyslově využívaných zařízení se nazývá „ACCU-LUBE“, na obrázku 2.3 – 11b [2], [19].



a)



b)

Obr.2.3– 11 a) Základní princip metody mazání mlhou; b) Průmyslové využití „ACCU-LUBE“ [41], [20].

Výhoda této metody je v její ekonomičnosti. Jestliže je přístroj pro MQL optimálně seřízen, spotřebuje se méně než 50 ml PK (oleje) na hodinu obrábění.

Nástroje, obrobky i třísky zůstávají téměř suché, tudíž nejsou nutné další technologické operace pro odstranění PK z třísek nebo z obrobků. Použitím MQL se sníží koeficient tření i teplota řezání oproti čistému obrábění za sucha.

Nevýhoda této metody spočívá ve vznikajícím aerosolu, který může vyvolat problémy s hygienou pracovního prostředí (např. respirační potíže obsluhy). Proto se většinou vyžaduje dobré utěsnění pracovního prostoru obráběcího stroje od okolí a odsávání vzniklého aerosolu přes účinné filtry. Samozřejmě to zapříčiní zvýšení nákladu (fixních i provozních).

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Předložená disertační práce, zpracována na téma „**Výzkum vlivů progresivních způsobů chlazení u vybraných technologií obrábění**“, přispívá k rozšíření poznatků o procesních médiích používaných v těchto procesech obrábění.

Disertační práce reaguje na sílící potřebu nahrazení klasických procesních kapalin za jiná média např. plyny. Tato potřeba je reakcí na požadavky průmyslu, ochrany zdraví a životního prostředí.

Popisuje vlastní testování a vzájemné vyhodnocení vlastností plyných a kapalných médií v procesu obrábění.

V současné době jsou běžně používaným médiem pro chlazení při obrábění procesní kapaliny. Tento způsob chlazení se převážně uskutečňuje s použitím kapalin vodou mísitelnými (vodné roztoky, emulze, polysyntetické a syntetické kapaliny) a kapalin vodou nemísitelnými (mastné oleje a tuky, minerální oleje, zušlechtěné řezné oleje). Procesní kapaliny vynikají svými chladícími, mazacími a čistícími účinky. Mezi „netradiční“ média pro chlazení při obrábění patří procesní plyny, které jsou využívány zejména při obrábění nástrojových nebo těžkoobrobitelných materiálů (podchlazený vzduch, zkapalněný oxid uhličitý a zkapalněný dusík). Mezi plyná média lze také zahrnout obrábění „za sucha“, kde je procesním médiem vzduch.

Hlavním cílem disertační práce je výzkum využití zkapalněných technických plynů a porovnání s klasickými procesními médii v procesu obrábění. K dosažení vytyčeného hlavního cíle je nutné specifikovat dílčí cíle.

Dílčí cíle:

Navrhnout konkrétní hodnotící parametry a vytvořit příslušné metodiky hodnocení.

Zvolit konkrétní představitele procesních médií, jak kapalného tak plyného skupenství.

Zvolit konkrétní představitele technologie s definovanou a nedefinovanou geometrií řezného nástroje, v rámci kterých budou procesní média zkoumána.

Stanovit a vytvořit podmínky pro konkrétní experimenty zvolených technologií (technologické a řezné podmínky, zkušební vzorky apod.)

Provést realizaci experimentálních měření zaměřených na vliv procesních médií při obrábění z pohledu strojních a mechanických vlastností, ekonomickou a ekologickou náročnost.

Vyhodnotit a celkově posoudit vhodnost plyného či kapalného média na konkrétní proces obrábění.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4. MĚŘENÉ PARAMETRY, STANOVENÉ PODMÍNKY A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

V kapitole 4 jsou uvedeny hodnocené parametry, metodika měření, získané a zpracované výsledky z experimentů, které jsou podkladem pro hodnocení jednotlivých PM.

4.1 Stanovení postupu měření a hodnocení parametrů

V kapitole jsou uvedeny hodnotící parametry pro konkrétní technologie a podmínky k jejich získání. Pro jednotlivé technologie je ve zkratce popsán konkrétní obráběcí stroj, řezný nástroj, zkušební vzorek (zastupuje obrobek) a stanovené řezné podmínky při experimentech.

4.1.1. Měření parametry pro hodnocení při experimentech

Telopta ŘN (obrobku)

Soustružení

- T_1 – teplota na špičce ŘN (VBD),
(teplo, které se akumuluje ve špičce ŘN při procesu řezání),
- T_2 – teplota jádra ŘN,
(teplo, které se akumuluje uvnitř ŘN),
- T_3 – teplota na čele ŘN,
(teplo, které vzniká na čele ŘN a odcházející třísky).

Broušení

- T_1 – teplota ve stanovené hloubce od obrobeného povrchu, tj. 1,5 mm,
(teplo, které prostupuje do stanovené hloubky 1,5 mm obrobku při průchodu ŘN),
- T_2 – teplota ve stanovené hloubce od obrobeného povrchu, tj. 1,0 mm,
(teplo, které prostupuje do stanovené hloubky 1,0 mm obrobku při průchodu ŘN),
- T_3, T_4, T_5 – teplota ve stanovené hloubce od obrobeného povrchu, tj. 0,5 mm,
(teplo, které prostupuje do stanovené hloubky 0,5 mm obrobku při průchodu ŘN),
- T_6 – teplota na povrchu zkušební vzorku v blízkosti broušené plochy,
(teplo, které prostupuje obrobkem a je ovlivněno PM).

Působící síly

Soustružení

- $F_F = F_x$ – posuvová síla
(síla vyvolaná při stanoveném posuvu ŘN a velikosti radiusu špičky VBD),

- $F_p=F_y$ – přísluvová síla
(síla vyvolaná ŘN při stanovené hloubce záběru a velikosti rádiusu špičky VBD),
- $F_c=F_z$ – řezná síla
(síla vyvolaná ŘN při stanoveném posuvu, hloubce záběru a velikosti rádiusu špičky VBD).

Broušení

- $F_f=F_x$ – posuvová síla
(síla vyvolaná podélným posuvem stolu brusky, hloubkou záběru a velikostí plochy styku ŘN s obrobkem),
- $F_c=F_z$ – řezná síla
(smluvní kolmá síla vyvolaná stykem ŘN s obrobkem).

Trvanlivost ŘN (resp. opotřebení)

- VB_{pr} – průběžná hodnota opotřebení ŘN po dosažení stanovené délky obrábění, tj. po dosažení 250 mm.
- VB_{max} – dosažená maximální velikost opotřebení ŘN po dosažení stanovené délky obrábění, tj. po obrobení vzdálenosti 2000 mm.

Drsnost povrchu

- R_a – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu,
(aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic v rozsahu základní délky),
- R_z – největší výška profilu,
(součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky),
- R_t – celková výška profilu,
(součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky).

Rozměrová přesnost

- Hodnota odchylky rozměru, průměru zkušební vzorku při soustružení či odchylka hloubky záběru při broušení, v průběhu obrábění zkušební vzorku,
(jedná se o změně odchylky závislé na použitém PM v průběhu obráběné délky zkušební vzorku).

Mechanická zkouška tahem

- R_m – mez pevnosti,
(napětí potřebné k přetržení zkušební tělesa),
- $R_{p0,2}$ – smluvní mez kluzu,
(smluvní mez kluzu je napětí, při kterém celkové prodloužení zkušební tyče dosáhne předepsané hodnoty),

- A_5 – tažnost,
(vychází z poměrného prodloužení vzorku a udává tvárnost materiálu),
- A_g – plastické prodloužení,
(rovnoměrná tažnost ukazuje na dobrou tvárnost bez ztenčování stěny zkušební vzorku).

Tvrдость a mikrotvrдость

- $HV10$ – tvrдость
(hrot předepsaného tvaru je vtlačován do vzorku silou 100N (10 kg), výdrž při vtisku 5s, odměření okulárem 4x zvětšujícím),
- $HV0.2$ – mikrotvrдость
(hrot předepsaného tvaru je vtlačován do vzorku silou 2N (200g), výdrž při vtisku 5s, odměření okulárem 40x zvětšujícím).

Ekonomická a ekologická náročnost

- Fixní náklady – náklady na pořízení zařízení a vybavení pro uskutečnění jednotlivých experimentů,
- Provozní náklady – náklady na realizaci experimentů, tj. potřebné náplně PM, energie na provoz zařízení,
- Dodatečné náklady – náklady vynaložené po ukončení experimentů, tj. ekologická likvidace odpadů
- Ekologická náročnost jednotlivých PM – popis nebezpečí využívání použitých PM a možná eliminace nebezpečí.

Obráběný materiál

- Konstrukční ocel EN C45+N (dle ČSN 12 050.1),
 - materiálové složení C45 dle ČSN v % - C (0,42 - 0,50), Mn (0,50 – 0,80), Si (0,17 – 0,37), Cr (max. 0,25), Ni (max. 0,30), Cu (max. 0,30), P (max. 0,04), S (max. 0,04),
 - výchozí stav C45+N – normalizačně žíhaný,
 - tabulková mez kluzu $R_{p0,2}$ (390 – 650 MPa), tabulková mez pevnosti R_m (640 – 850 MPa), tabulková tažnost A_5 (14 – 17 %) [28].

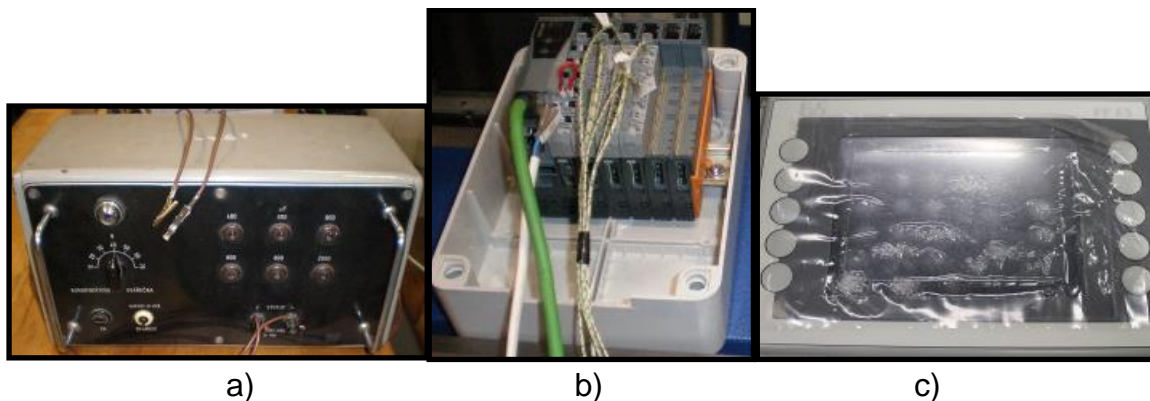
Procesní média

- za sucha
- podchlazený vzduch – Cold Air Gun
- zkapalněný CO_2
- zkapalněný dusík
- minerální olej HOCUT 795B
- syntetický kapalina EOPS 1030

4.1.2 Teplota

Pro zjištění vlivu PM na teplotu v místě řezu bylo k měření využito metody využívající principu umělého termočlánku. Výhodou je možné přímé umístění termočlánků k určenému místu měření teploty – místu řezu. Byly použity termočlánky typu K, které jsou schopny snímat teploty v rozsahu od minimální teploty -270°C až do maximální teploty 1372°C . Vodiče termočlánku K byly tvořeny ze dvou slitin materiálů, tj. Ni-Cr (+) a Ni-Al (-).

Pomocí těchto dvou cizích vodičů lze měřit teplotu v různých místech na ŘN i zkušební vzorku, vyjma stykových ploch břitu ŘN s třískou. Upravený a izolovaný termočlánek byl umístěn na ŘN, na obrázku 4.1 – 2a nebo na zkušební vzorek, na obrázku 4.1 – 3. Vlastní zabudování termočlánků do ŘN i zkušební vzorku bylo poměrně složité a náročné na přesné umístění. Termočlánky byly připevněny k povrchu ŘN i zkušební vzorku pomocí kondenzátorové svářečky, na obrázku 4.1 - 1a. Výstupní konce termočlánků byly zapojeny do modulu převodníku, na obrázku 4.1 – 1b, kde dochází k převodu z analogového vstupu mV na dále zpracovatelné data v $^{\circ}\text{C}$. Získaná data jsou ukládána do provozní a řídicí jednotky s nastavenou vzorkovací frekvencí 16 – 20 hodnot za vteřinu, na obrázek 4.1 - 1c. Odkud je lze dále zpracovávat ve formátu *.csv a nebo jiným výpočetním programem [29].

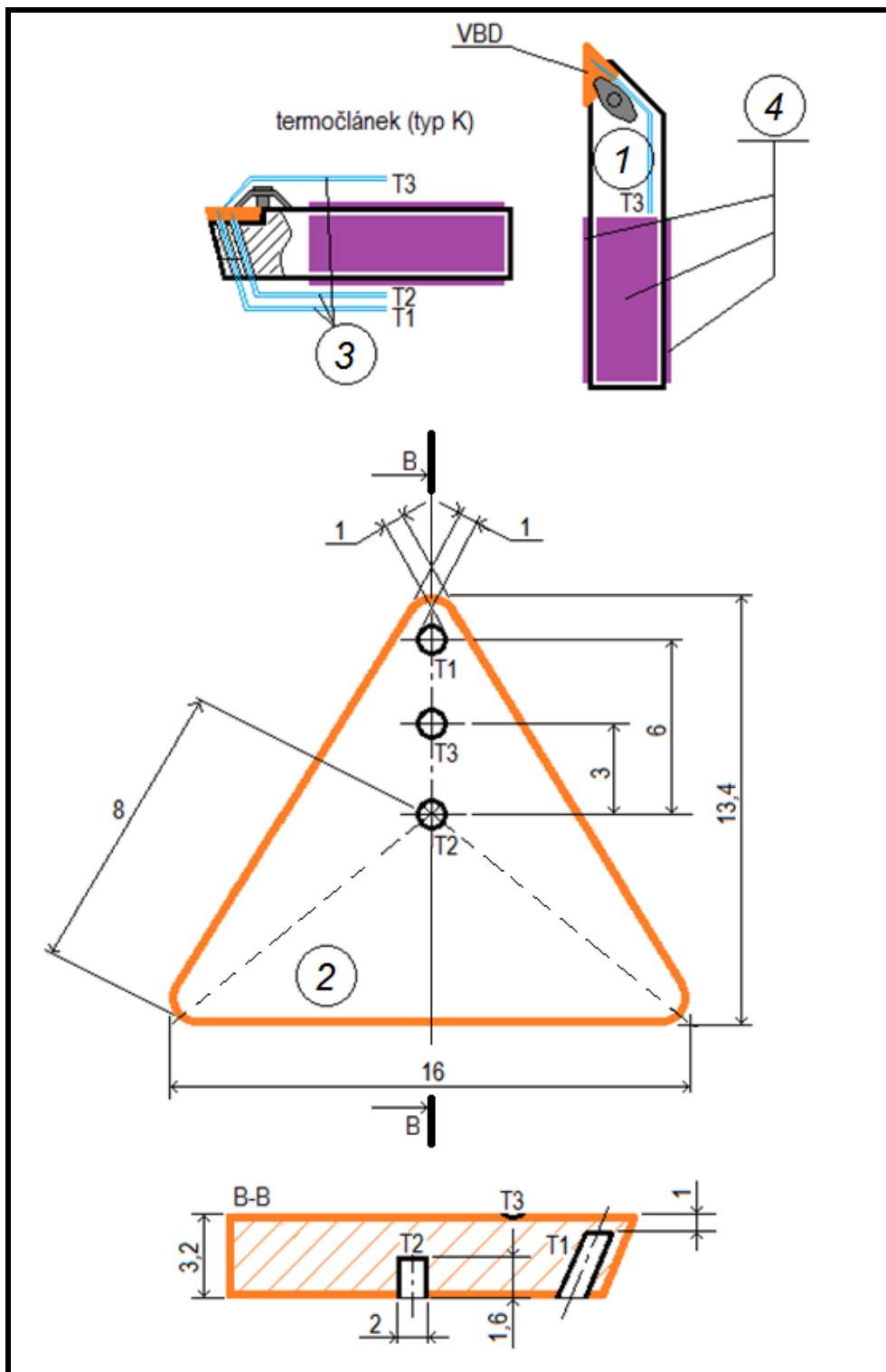


Obr. 4.1 – 1 a) Kondenzátorová svářečka, b) převodník s termočlánky, c) Provozní jednotka PP65

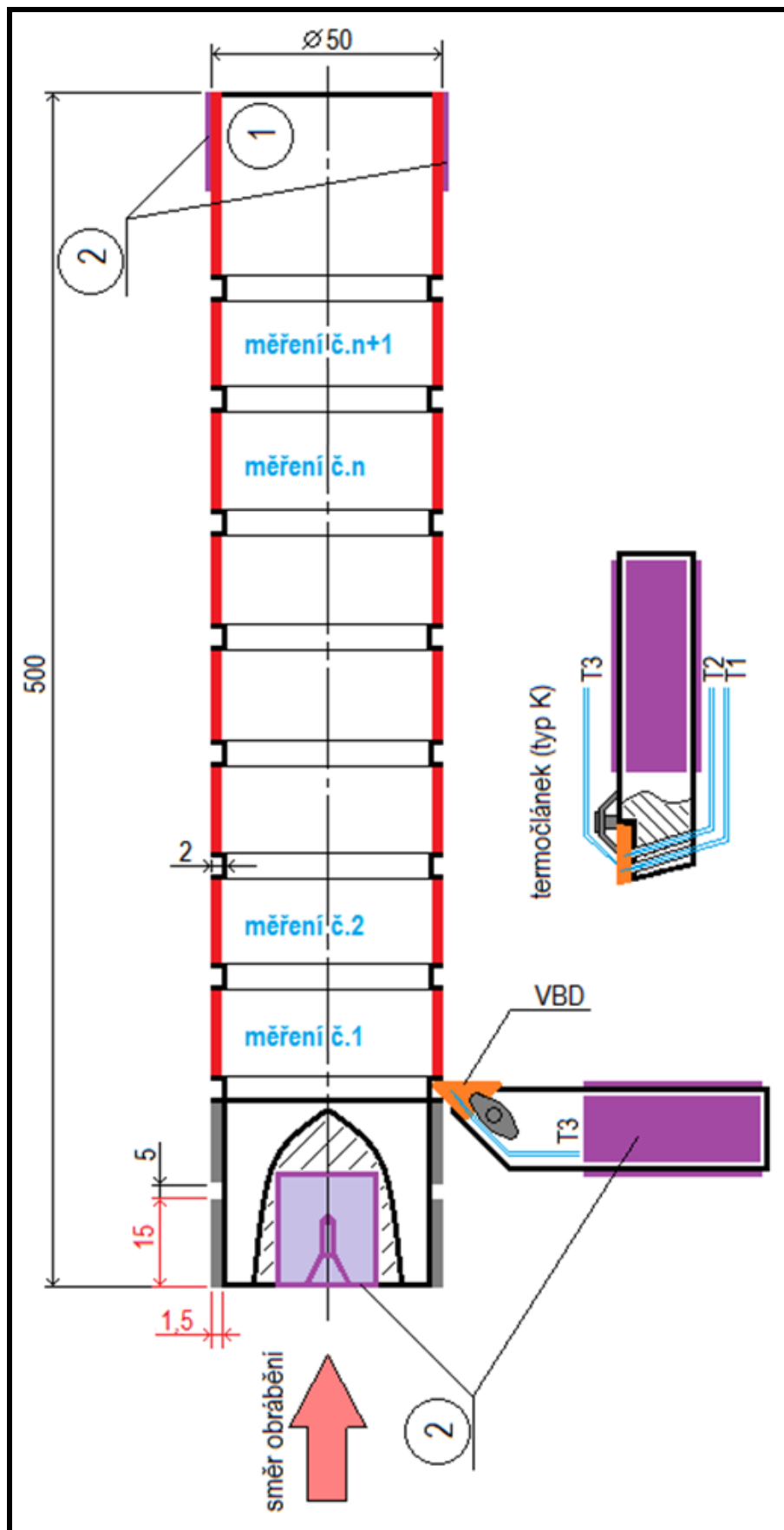
Pro technologii soustružení bylo, z důvodu rotace obrobku, použito měření teploty prostřednictvím ŘN. Protože se v praxi častěji používají nástroje s vyměnitelnou břitovou destičkou (VBD), byl při experimentech použit ŘN, na obrázku 4.1 – 2a – označen č. 1, s VBD, na obrázku 4.1 – 2a – označena č. 2, se zabudovanými termočlánky, na obrázku 4.1 – 2a – označeny č. 3. Teplota byla měřena třemi termočlánky, na obrázku 4.1 – 2a – řez B-B. Na špičce VBD byl zabudován termočlánek T_1 , (v předem vyrobeném otvoru ze spodní strany VBD). Termočlánek T_2 byl umístěn uprostřed VBD (v předem vyrobeném otvoru ze spodní strany VBD). Termočlánek T_3 byl umístěn na čele VBD (v předem vyrobeném zahloubení na horní straně VBD). Takto připravený ŘN byl upnut do dynamometru, upevněným na obráběcím stroji, přes izolaci, na obrázku 4.1 – 2a – označenou č. 4.

ŘN byl soustružen zkušební vzorek na obrázku 4.1 – 2b – označen č. 1, na kterém byly předem vytvořeny zápichy ve stanovené vzdálenosti, které oddělovaly jednotlivá měření. Takto upravený zkušební vzorek byl upnut do stroje přes izolující prvky, na obrázku 4.1 – 2b – označených č. 2. Experimenty byly realizovány za technologických podmínek popsanych v kapitole 4.1.7.

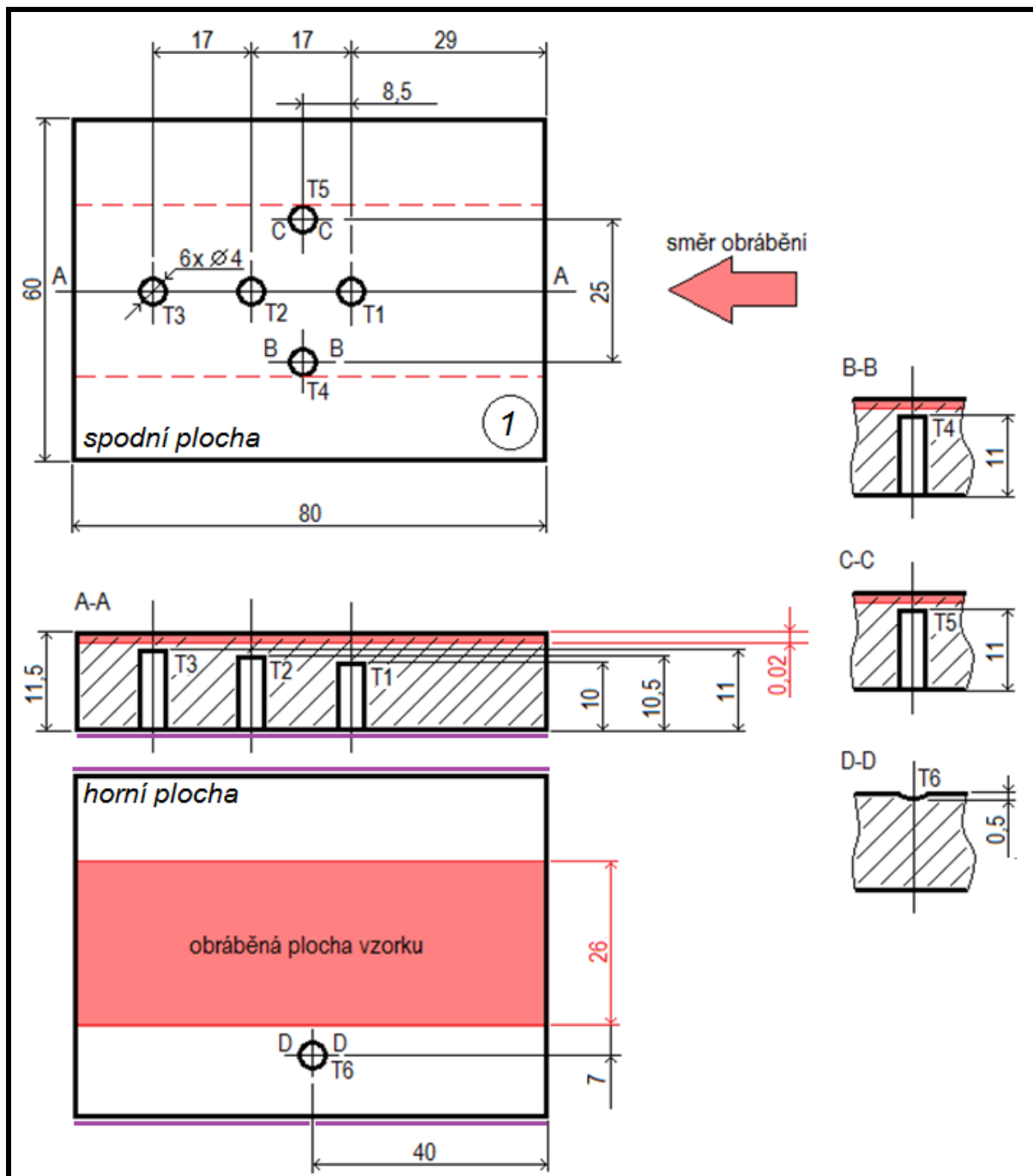
Pro technologii broušení bylo, z důvodu rotace ŘN, použito měření teploty prostřednictvím zkušební vzorku se zabudovanými termočlánky na obrázku 4.1 – 3. Teplota byla měřena na šesti termočláncích, na obrázek 4.1 – 3 – řez A-A, B-B, C-C, D-D. Termočlánky T_1 , T_2 , T_3 byly zabudovány v ose symetrie zkušební vzorku ve stanovené vzdálenosti od broušeného povrchu pro zjištění velikosti a šíření teploty uvnitř zkušební vzorku. Termočlánek T_1 byl umístěn ve vzdálenosti 1,5 mm od broušené plochy (v předem vyrobeném otvoru ze spodní strany zkušební vzorku). Termočlánek T_2 byl umístěn ve vzdálenosti 1,0 mm od broušené plochy (v předem vyrobeném otvoru ze spodní strany zkušební vzorku). Termočlánek T_3 byl umístěn ve vzdálenosti 0,5 mm od broušené plochy (v předem vyrobeném otvoru ze spodní strany zkušební vzorku). Pro naměření plošné teploty v hloubce 0,5 mm byly zabudovány termočlánky T_3 , T_4 a T_5 . Termočlánky T_4 a T_5 byly umístěny 12,5 mm od osy symetrie zkušební vzorku (v předem vyrobených otvorech ze spodní strany zkušební vzorku). Z termočláneků T_3 , T_4 a T_5 byla vypočtena průměrná hodnota pro plošnou teplotu ve vzdálenosti 0,5 mm od broušené plochy. Termočlánek T_6 byl umístěn na povrchu zkušební vzorku ve vzdálenosti 7 mm od místa průjezdu BK (v předem vyrobeném zahloubení z horní strany zkušební vzorku) Takto připravený zkušební vzorek byl upnut přes izolaci do dynamometru na obráběcím stroji. Experimenty byly realizovány za technologických podmínek popsanych v kapitole 4.1.7.



Obr. 4.1 – 2a Měření teploty na VBD u technologie soustružení



Obr. 4.1 – 2b Zkušební vzorek u technologie soustružení



Obr. 4.1 – 3 Zkušební vzorek pro měření teploty na obrobku u technologie broušení

Z naměřených hodnot u jednotlivých termočlánků při soustružení, nebo broušení, byla získána hodnota maximální teploty. Průběh změny teploty při experimentu, tj. okamžik najetí ŘN do záběru, dobu řezání a dobu potřebnou k ustálení teploty ŘN či zkušebního vzorku, na teplotu před započítáním experimentu.

Pro každé PM bylo uskutečněno celkem 5 opakování měření teploty pro eliminaci chyby měření. Z těchto měření byla vypočtena průměrná hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření.

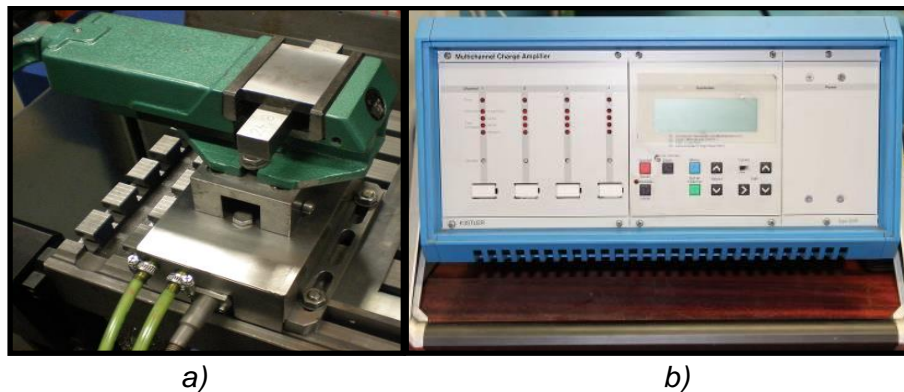
4.1.3 Působící síly

Působící síly, při soustružení a broušení a vliv PM na ně, byly měřeny tzv. přímou metodou, která je založena na měření v reálném čase, a měřené hodnoty jsou zaznamenávány přímo v průběhu procesu obrábění.

Přímé měření složek působících sil a točivých momentů se zakládá na měření deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek – přípravek (SNOP) během obrábění prostřednictvím dynamometrů. Dynamometr, jakožto měřicí přístroj, musí zaručit nezávislost měřené veličiny na provozních vlastnostech přístroje. Dále se od něj požaduje schopnost měřit sledovanou veličinu ve zvoleném rozsahu s maximální přesností. Musí zaručit stálost naměřených hodnot, včetně jejich reprodukovatelnosti.

K měření působících sil byl použit tříoskový piezoelektrický dynamometr KISTLER, typ 9265B, na obrázku 4.1 – 4a. Piezoelektrické dynamometry využívají pro snímání deformace piezoelektrického jevu, který je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů při mechanickém zatížení. Mezi nejužívanější piezoelektrické materiály patří především křemen, materiály na bázi titaničitanu barnatého, Seignettovy soli a podobně. Základem piezoelektrického snímače pro tyto druhy dynamometrů je měřicí destička vhodně vyříznutá z příslušného krystalu. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly a s poklesem zatížení se lineárně snižuje, až zcela vymizí při zatížení nulovém.

Náboj z piezoelektrického snímače je zesilován nábojovým zesilovačem 5019 B, na obrázek 4.1 – 4b. Signál z nábojového zesilovače vstupuje do sběrné a měřicí karty v připojeném počítači, kde jsou data zpracována příslušným softwarem LabVIEW.



Obr. 4.1 – 4 Dynamometr KISTLER, typ 9265B; nábojový zesilovač typ 5019 B

Experimenty byly realizovány za technologických podmínek popsaných v kapitole 4.1.7 a probíhaly současně s experimenty měření teploty ŘN, resp. zkušebního vzorku.

Z jednotlivých zaznamenaných průběhů působících sil byly zjištěny v případě technologie soustružení hodnoty sil posuvových $F_f=F_x$, přísuvových $F_p=F_y$ a řezných $F_c=F_z$, a to v druhé, desáté a osmnácté vteřině záběru ŘN se zkušebním vzorkem (označených jako začátek, střed a konec vzorku). Tyto časové hodnoty byly

stanoveny z kontaktu ŘN se zkušební vzorkem, vycházející ze stanovených technologických podmínek (otáčky zkušební vzorku a posuvu ŘN). Z těchto hodnot byly vytvořeny průměrné hodnoty pro tyto tři časy, které byly porovnávány pro jednotlivá PM.

Pro každé PM bylo uskutečněno celkem 5 opakování působících sil pro eliminaci chyby měření. Z těchto měření byla vypočtena průměrná hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření.

4.1.4 Trvanlivost řezného nástroje

Během obrábění vzniká v řezné části nástroje velké množství tepla, které se vyvíjí na ploše jeho čela a hřbetu. Procesem utváření třísky se průběžně vytváří při vysokém tlaku a teplotě kovově čistý povrch, který má sklon k chemickým reakcím nebo k difúzním procesům. Většina obráběných materiálů obsahuje tvrdé částice různého druhu, které často dosahují tvrdosti materiálu břitu ŘN. Dochází tak k abrazivnímu efektu. Kombinací výše uvedených mechanických, tepelných, chemických a abrazivních faktorů dochází ke složitému zatěžování břitu ŘN, které se promítá jako opotřebenění a snižování trvanlivosti ŘN, a které ovlivňuje používání PM.

Při zkouškách trvanlivosti u soustružení bylo možné díky definované geometrii ŘN provést standardní měření opotřebenění.

Při dlouhodobé zkoušce trvanlivosti u soustružení byl sledován abrazivní otěr hřbetu ŘN, na obrázku 4.1 – 5, u jednotlivých PM. Kritériem byla stanovena celková soustružená délka, která činila $L=2000\text{mm}$ (2m). Tato délka byla rozdělena na osm dílčích délek, tj. po 250 mm, kdy došlo k zastavení obrábění a kontrole velikosti opotřebenění VB. Jako druhým kritériem byla stanovena mezní velikosti opotřebenění VB na hřbetu řezného nástroje, která měla hodnotu $VB_{kr} = 0,3\text{ mm}$.

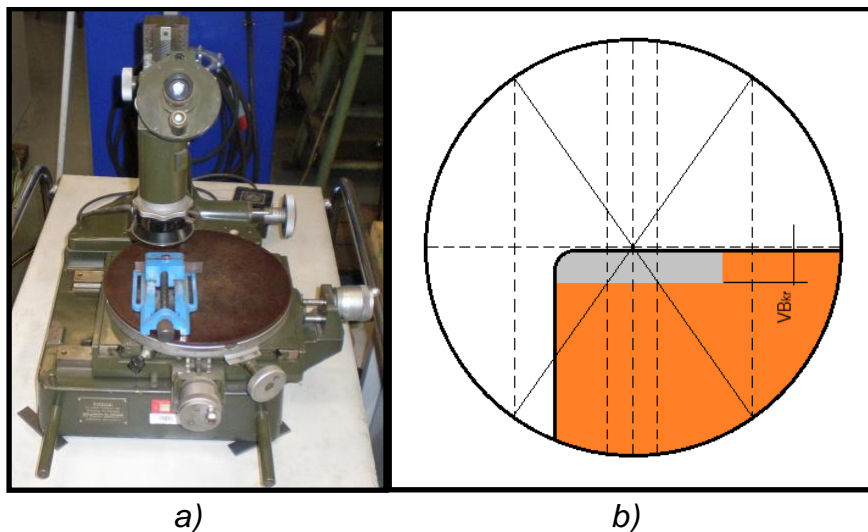


Obr. 4.1 - 5 Měřené opotřebenění VB a příklad reálného opotřebenění [46]

U technologie broušení nebylo možné provést měření opotřebenění ŘN (BK) z důvodu nedefinované geometrie nástroje. Proto se u broušení vycházelo z měření působících sil. Jejich rozdíly u jednotlivých PM prokázaly jejich vliv na trvanlivost ŘN, resp. řezivost BK. Při tomto hodnocení se posuzují tzv. vyjiskřovací křivky. Čím nižší působící síly jsou zjištěny, u konkrétního PM, tím je BK méně zatížen a vyjiskřovací

křivka je nižší. BK je schopen mnohem déle brousit bez nutnosti provést orovnění (naostření).

Měření abrazivního opotřebení ŘN bylo provedeno na dílenském mikroskopu ZEISS, na obrázku 4.1–6a. Stolem mikroskopu je možné ve vodorovném směru vykonávat lineární posuv v osách X, Y. Stůl se pohybuje pomocí vodících mikrometrických šroubů na vodících lištách. Odečítání hodnot posunutí je realizováno mikrometrickými hlavicemi s udávaným rozlišením 0,01 mm. Polohování měřeného vzorku se provádí optickým způsobem přes okulár pomocí nitkového kříže, na obrázku 4.1 – 6b.



Obr. 4.1 – 6 a) dílenský mikroskop ZEISS, b) nitkový kříž okuláru

Pro každé PM byla uskutečněna celkem 3 opakování měření dlouhodobé zkoušky trvanlivosti (opotřebení VB). Z těchto měření byla délka vypočtena průměrná aritmetická hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření.

4.1.5 Integrita povrchu

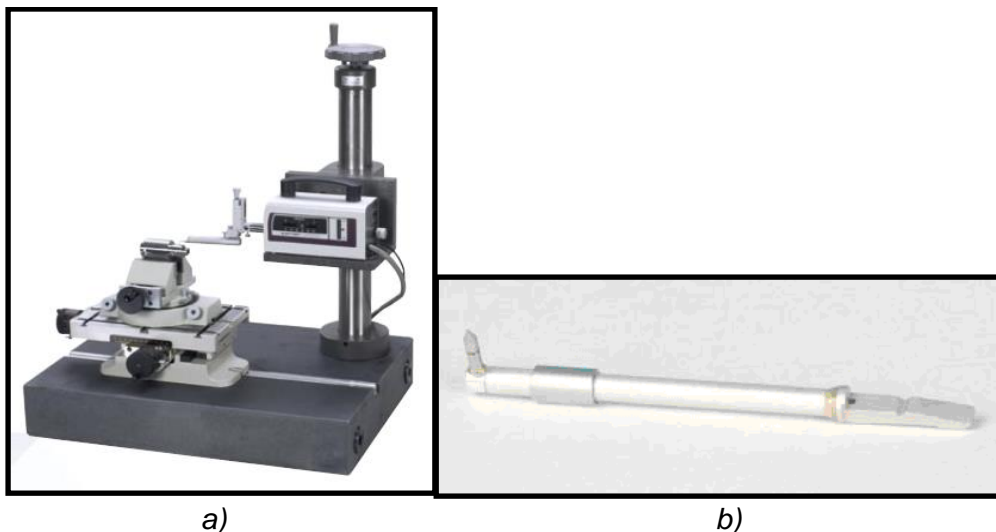
Hodnotí důsledky působení technologických metod na jakost obrobenej plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek. Ovlivnění funkčnosti povrchu výrobními metodami (použitou technologií, geometrií ŘN, PM, apod.). Tuto jakost povrchu lze definovat drsností povrchu, rozměrovou přesností a vlastností povrchové vrstvy.

4.1.5.1 Drsnost povrchu

Skutečný povrch obrobku je vrstva, která ohraničuje obrobek a odděluje ho od okolí. Tato vrstva se liší od ideálního povrchu různými nerovnostmi. Drsností povrchu rozumíme část geometrických nerovností s poměrně malou vzdáleností sousedních nerovností způsobených stopami nástrojů při třískovém obrábění na povrchu.

K měření drsnosti povrchu zkušebních vzorků byl použit profiloměr Mitutoyo SurfTest SV–2000N2, na obrázku 4.1 – 7a. Příklad pracuje na principu dotykové metody snímání povrchu a skládá se z mechanické a elektronické části. Mechanická

část snímá nerovnosti povrchu pomocí hrotu s diamantovým dotekem, s kuželovou špičkou s úhlem kužele 90° a zaoblením špičky 5μm, na obrázku 4.1 – 7b. Vertikální pohyb hrotu je v převodníku transformován na elektrický signál, který je zpracován do souřadnicového záznamu profilu měřeného povrchu.



Obr. 4.1 – 7 a) Profiloměr Mitutoyo Surf test SV–2000N2, b) měřící rameno s dotekem s diamantovou kuželovou špičkou [21]

Měřitelný rozsah přístroje je uveden v tabulce 4.1 – 1 [21].

Tab. 4.1 – 1 Rozsah profiloměru Mitutoyo Surf test SV–2000N2

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

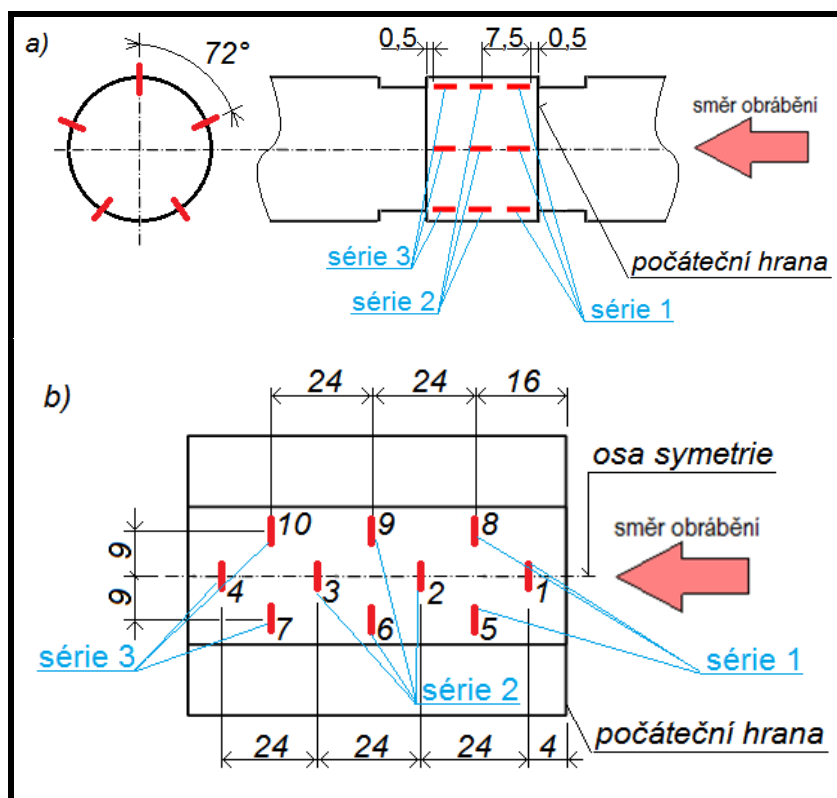
Na zpracování naměřených dat byl využit software „Surfpak“ v připojeném počítači. Tento software umožňuje vyhodnocení mnoha parametrů drsnosti povrchu podle norem ISO, DIN a JIS, zobrazení profilu v různém nastavení a vyjádření profilu pomocí zvoleného diagramu. Velkou výhodou tohoto softwaru je možnost exportu nasnímaných souřadnic bodů ve formátu *.csv, kdy je následně možné zpracovat údaje i jiným výpočetním programem. K vyhodnocení drsnosti povrchu zkušebních vzorků byly zvoleny parametry uvedené v tabulce 4.1 – 2, které jsou definovány dle norem ČSN EN ISO 3274 a ČSN EN ISO 4287 [7], [6]

Tab.4.1 – 2 Měřené parametry drsnosti povrchu

Parametr	Popis parametru
Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Rz	největší výška profilu
Rt	celková výška profilu

Pro měření drsnosti povrchu po soustružení byl použit zkušební vzorek z experimentů měření teploty a působících sil, na obrázku 4.1 – 2b. Drsnost povrchu u soustruženého zkušební vzorku se měřila v místech dle obrázku 4.1 – 8a. První série 5 měření byla provedena po obvodu zkušební vzorku (úhel mezi měřeními místy byl 72°), 0,5 mm od počáteční hrany měřeného segmentu (jedné měřené plochy) na zkušebním vzorku. Druhá série 5 měření byla provedena ve středu soustružené vzdálenosti segmentu (to odpovídá 7,5 mm od počáteční hrany). Třetí série 5 měření byla provedena, tak aby dojezd hrotu končil, 0,5 mm od konce soustružené plochy segmentu.

Pro měření drsnosti povrchu po broušení byly použity zkušební vzorky z experimentů měření teploty a působících sil, na obrázku 4.1 – 3. Drsnost povrchu u broušeného zkušební vzorku se měřila na 10 místech dle obrázku 4.1 – 8b. Měření č. 1–4 byla provedena v ose symetrie zkušební vzorku (broušené plochy), měření č. 1 bylo ve vzdálenosti 4 mm od hrany (směru obrábění - prvního průjezdu BK). Mezi měřeními č. 1-2, 2-3 a 3-4 byla vzdálenost 24 mm. Měření č. 5-10 byla provedena 9 mm od osy symetrie zkušební vzorku (broušené plochy), měření č. 5 a č. 8 bylo ve vzdálenosti 16 mm od hrany (směru obrábění - prvního průjezdu BK). Mezi měřeními č. 5-6, 6-7, 8-9 a 9-10 byla vzdálenost 24 mm. Stejně jako u soustružení byl zkušební vzorek rozdělen na 3 série měření (počátek, střed, konec). Snímač urazil po povrchu vzdálenost 4,8 mm, to odpovídá 6 x jmenovité vzdálenosti 0,8 mm nastavené v softwaru Surfpack. Vyhodnocena byla délka 4mm, což odpovídá 5x0,8 mm jmenovité vzdálenosti. Vzdálenost 2x0,4mm (na začátku a konci měřené vzdálenosti) nebyla zahrnuta do hodnocení.



Obr. 4.1 – 8 Měření drsnosti; a) u soustruženého vzorku, b) u broušeného vzorku

Pro každé PM bylo uskutečněno 15 měření na jedné soustružené ploše. Při soustružení bylo vytvořeno pět obrobených ploch.

Pro každé PM bylo uskutečněno 10 měření na jedné broušené ploše. Při broušení bylo vytvořeno pět obrobených ploch.

Z těchto měření byla vypočtena průměrná aritmetická hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření.

4.1.5.2 Rozměrová přesnost

Skutečné obrobené plochy se liší od ideálních (teoretických) ploch svými rozměry, tvary a vzájemnou polohou (geometrické tolerance přesnosti). Tzn., že nikdy nejsou vyrobeny s absolutní přesností (vycházející z normy ČSN EN ISO 1101 z roku 2007). Protože výrobu součástí lze zajistit pouze s určitou přesností, je vhodné předepisovat dovolenou nepřesnost výše uvedených faktorů formou tolerancí rozměrů, úchylek tvaru a polohy s požadovanou drsností povrchu. Volba těchto podmínek určuje cenu jejich realizace [5].

K měření odchylky průměru u soustruženého zkušební vzorku, nebo výšky u broušeného zkušební vzorku, byla použita měřidla uvedená v tabulkách 4.1 – 3 a 4.1 - 4.

Tab. 4.1 – 3 Digitální třmenový mikrometr Mitutoyo 0-25 mm

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

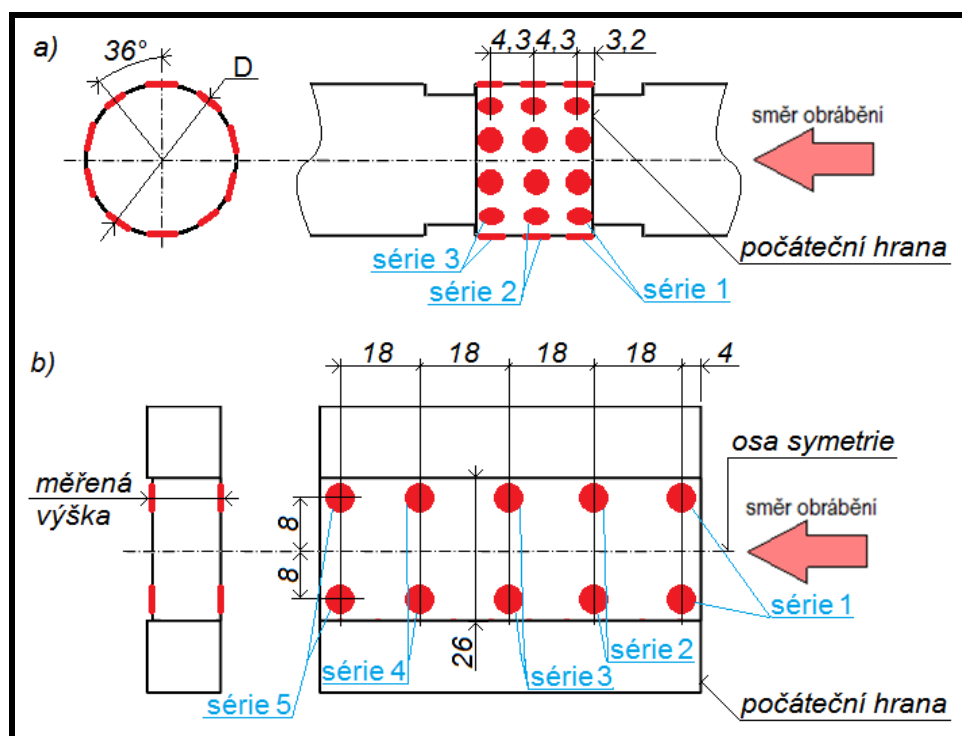
Tab. 4.1 – 4 Digitální třmenový mikrometr Mitutoyo 25 - 50 mm

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

Na soustruženém zkušebním vzorku, na obrázku 4.1 – 2b, byly měřeny průměry v místech označující červené body, na obrázku 4. – 9a. Měření bylo rozděleno do tří sérií měření, ve směru soustružení. První série 5 měření, které bylo vždy pootočeno po 36°, bylo 3,2 mm od počáteční hrany měřeného místa (vytvořeném na zkušebním vzorku, na obrázku 4.1 – 2b). Druhá série měření byla ve středu měřené plochy, resp. 7,5 mm od počáteční hrany. Třetí série měření byla na konci měřené plochy, resp. 11,8 mm od počáteční hrany. Pro každou sérii byly dále vypočteny střední hodnoty odchylek. Od změřených průměrů (15 měření) byl odečten nejmenší změřený průměr pro danou soustruženou plochu. Tento rozdíl byl použit v dosažených výsledcích a diskuzi pro hodnocení vlivu PM na nejvyšší velikost odchylky průměrů soustružené plochy.

Na broušeném zkušebním vzorku dle obrázku 4.1 – 3 byla měřena výška v místech označených červenými body, na obrázku 4. – 9b, před broušením a po přebroušení danou hloubkou záběru. Plocha zkušební vzorku byla přebroušena, po 15 minutách přeměřena (počáteční výška po eliminaci možného

zahřátí) a přebroušena danou hloubkou záběru 0,02 mm. Po čtrnácti přejitích BK byl stroj zastaven. Zkušební vzorek odepnut ze stroje a po 24 hodinách přeměřen (konečná výška po eliminaci zahřátí broušením), v bodech dle obrázku 4.1 – 9b. Na zkušebním vzorku bylo provedeno pět sérií měření po dvou měřených pozicích. Z těchto pěti sérií (10 měření výšky před a 10 měření výšky po broušení) opět byly dále vypočteny střední hodnoty odchylek pro jednotlivé série. Z rozdílu naměřených hodnot výšky před a po broušení byla vypočtena skutečná hodnota odebrané hloubky záběru pro jednotlivá PM. Dále byla spočítána odchylka rozdílu mezi hodnotou nastavenou na stroji (0,02 mm) a skutečnou odebranou hodnotou. Tento rozdíl byl použit v dosažených výsledcích a diskuzi pro hodnocení vlivu PM na odchylku hloubky záběru broušené plochy. Broušená plocha byla v případě popisu rozdělena na „počátek, střed a konec“ broušené plochy, kde počátek značí stranu prvního najetí BK na zkušební vzorek, střed značí broušenou plochu a konec značí výjezd BK ze zkušebního vzorku.



Obr. 4.1 – 9 Měření rozměrové přesnosti; a) měření průměru soustruženého vzorku, b) měření šířky drážky broušeného vzorku

Pro každé PM bylo uskutečněno 15 měření na jedné soustružené ploše. Při soustružení bylo vytvořeno pět obrobených ploch.

Pro každé PM bylo uskutečněno 10 měření na jedné broušené ploše. Při broušení bylo vytvořeno pět obrobených ploch.

Z těchto měření byla vypočtena průměrná aritmetická hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření.

4.1.6 Mechanické zkoušky

Byly zvoleny dva typy zkoušek hodnocení mechanických vlastností. První typ zkoušky byla mechanická zkouška tahem, která byla provedena v případě technologie soustružení. Byla vybrána z důvodu, že v případě této zkoušky dle normy ČSN EN ISO 6892-1 z roku 2010, jsou zkušební vzorky (tyče) soustruženy na stanovený průměr a délku [8].

Druhým typem zkoušky bylo stanoveno měření tvrdosti a mikrotvrdosti, které bylo realizováno na vzorcích po technologii broušení. Bylo vybráno broušení z důvodu, že se jedná převážně o dokončovací technologii, u které je kladen důraz na kvalitu povrchu. Jedním z parametrů je zvýšení povrchové tvrdosti a podpovrchové mikrotvrdosti obrobku.

4.1.6.1 Mechanická zkouška tahem


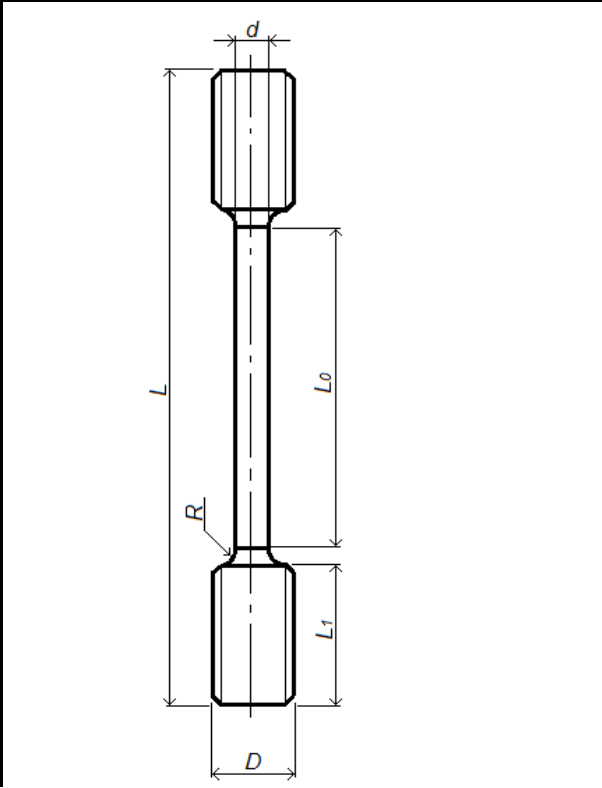
Zkouška tahem spočívá v deformování zkušební tyče o standardizovaných rozměrech daných normou v tahovém přístroji, tj. jednoosým tahovým zatížením (vyvolaným silou F [N]) obvykle do jejího přetržení. Zkouška je ukončena ve chvíli, kdy dojde k poklesu síly o 20% z F_{max} . Ze záznamů tahové zkoušky se stanovuje jedna nebo více napěťových a deformačních charakteristik zavedených v normě ČSN EN ISO 6892-1 z roku 2010 (nahrazuje normu ČSN EN 10002 – 1 a ČSN EN 10002 – 5z roku 2002). Mezi napěťové charakteristiky patří mez kluzu (smluvní mez kluzu) a mez pevnosti, mezi deformační charakteristiky patří tažnost a kontrakce [8].

Zkušebním zařízením použitým při experimentu byl trhací stroj TIRA TEST 2300 řízený počítačem, v tabulce 4.1 – 5a. Použité zkušební vzorky byly tyče kruhového průřezu se závitem dle výkresu, v tabulce 4.1 – 5b. Zkouška tahem byla prováděna za teploty laboratoře 23 ± 2 °C.

Zkušební tyčky, dle normy ČSN EN ISO 6892-1 z roku 2010, soustružené a chlazené zkoumanými PM byly podrobeny zkoušce tahem na trhacím stroji. Výstupní protokoly z měření pro jednotlivá PM jsou uvedeny v příloze (Příloha č. 3 – str. XVIII) [8].

Pro výrobu zkušebního vzorku (tyče) u mechanické zkoušky tahem byly zvoleny řezné podmínky uvedené v tabulce 4.1 – 6. Tyto řezné podmínky byly zvoleny, tak aby se co nejvíce blížily podmínkám použitým při experimentech měření teploty a působících sil u soustružení. Obráběný materiál zkušebních tyček byl zvolen stejný jako v případě předchozích experimentů (konstrukční ocel EN C45+N) se specifikací dle kapitoly 4.1.1.

Tab. 4.1 – 5 Trhací stroj TIRA test 2300 a zkušební tyčky

		
a)	a)	b)
<p><i>Vybrané parametry trhacího stroje</i></p> <p><i>mezní zatížení</i></p> <p><i>přesnost měření</i></p> <p><i>šířka pracovního prostoru</i></p> <p><i>maximální rozsah pohyblivého ramene</i></p> <p><i>celkový maximální příkon stroje</i></p>	<p><i>Hodnota</i></p> <p>100</p> <p>± 1</p> <p>550</p> <p>800</p> <p>1,5</p>	<p><i>Jednotky</i></p> <p>[kN]</p> <p>[%]</p> <p>[mm]</p> <p>[mm]</p> <p>[kVA]</p>
<p><i>Zkušební vzorek (tyče)</i></p> <p><i>průměr upínací části D</i></p> <p><i>průměr pracovní části d</i></p> <p><i>délka zkušební tyčky L</i></p> <p><i>délka pracovní části L0</i></p> <p><i>délka upínací části L1</i></p> <p><i>rádius přechodu R</i></p>	<p><i>Hodnota</i></p> <p>12(M12)</p> <p>8</p> <p>85</p> <p>40</p> <p>20</p> <p>2</p>	<p><i>Jednotky</i></p> <p>[mm]</p> <p>[mm]</p> <p>[mm]</p> <p>[mm]</p> <p>[mm]</p> <p>[mm]</p>

Tab. 4.1 – 6 Řezné podmínky použité při soustružení zkušebních vzorků

<p><i>Řezné parametry</i></p>	<p><i>Hodnota</i></p>	<p><i>Jednotky</i></p>
<p><i>řezná rychlost v_c</i></p>	<p>17 - 33,9</p>	<p>[m/min]</p>
<p><i>otáčky n</i></p>	<p>900</p>	<p>[min⁻¹]</p>
<p><i>posuv f</i></p>	<p>0,05</p>	<p>[mm/ot]</p>
<p><i>hloubka záběru a_p při hrubování</i></p>	<p>1,5</p>	<p>[mm]</p>
<p><i>hloubka záběru a_p na čisto</i></p>	<p>1</p>	<p>[mm]</p>
<p><i>průměr tyčoviny (polotovaru)</i></p>	<p>12</p>	<p>[mm]</p>


Pro každé PM bylo uskutečněno 5opakování pro eliminaci chyby měření. Z těchto měření byla vypočtena průměrná aritmetická hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření.

4.1.6.2 Tvrdost a mikrotvrdost

Pro měření tvrdosti a mikrotvrdosti byl použit přístroj Mikrotvrdoměr Qness Q30A, v tabulce 4.1 – 7 a použity zkušební vzorky po broušení s chlazením PM. Měření tvrdosti bylo realizováno na šesti místech na broušené ploše zkušební vzorku. První měřený bod byl 12 mm od počáteční hrany zkušební vzorku (hrana prvního najetí BK). Další body měření byly po 11 mm, v tabulce 4.1 – 7. Zkušební vzorky

pro měření mikrotvrdosti byly rozřezány na metalografické brusce Abrasi-met – delta. Dále byly segmenty zkušební vzorku zality do dentakrylu a pomocí Metalografické brusky-leštičky PHOENIX 4000 broušeny do finální podoby. Po umístění zkušební vzorku do přístroje Qness Q30A byla měřena mikrotvrdost, tabulka 4.1 – 7. Mikrotvrdost v povrchové vrstvě pod broušeným povrchem byla měřena do hloubky 1,5 mm s krokem 0,1 mm mezi měřenými body.

Tab. 4.1 – 7 Mikrotvrdoměr Qness Q30A

		
<i>Měřené parametry na zařízení Qness Q30A</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotky</i>
<i>Měření tvrdosti a mikrotvrdosti</i>	<i>Vickers HV0.001 – HV30</i>	<i>[HV]</i>
<i>Měření tvrdosti a mikrotvrdosti</i>	<i>Knoop HK0.001 – HK2</i>	<i>[HK]</i>
	<i>Brinell HBW1/1 - HBW2.5/31.25</i>	<i>[HBW]</i>
<i>Optické členy (okuláry) zvětšení</i>	<i>4x 40x</i>	<i>[-] [-]</i>

		65x	[-]
Zkušební vzorek tvrdost		Hodnota	Jednotky
		Rozměry vzorku dle Obr. 4.1 - 3	
Zkušební vzorek mikrotvrdost		Hodnota	Jednotky
	průměr D délka d šířka $š$	40 20 13	[mm] [mm] [mm]

Od každého PM bylo na zkušebním vzorku uskutečněno 6 měření pro eliminaci chyby při měření tvrdosti HV10 a 5 sérií po 15 vpiších pro měření mikrotvrdosti HV0.2. Z těchto měření byla vypočtena průměrná aritmetická hodnota se statistickým intervalem spolehlivosti měření.

4.1.7 Zvolené stroje a řezné podmínky při experimentech

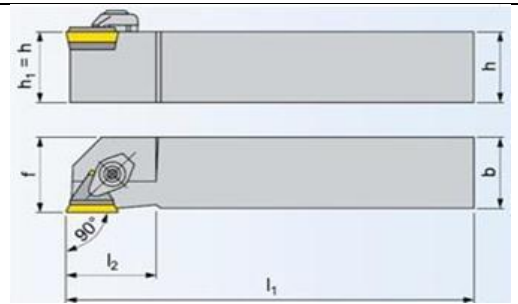
Soustružení - Technologické podmínky

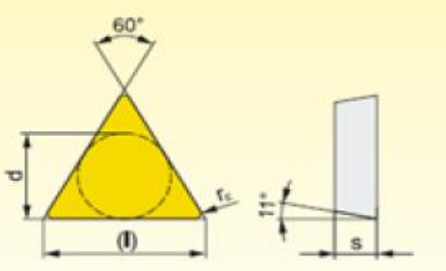
Při soustružení byl použit univerzální hrotový soustruh SU50 s technickými parametry uvedenými v tabulce 4.1 – 8. Nástrojem byl soustružnický nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou (VBD) definovaný geometrií a typem VBD dle specifikací v tabulce 4.1 – 9. Konkrétní řezné podmínky použité při experimentech byly nadefinovány dle potřeb experimentů a jsou uvedeny v tabulce 4.1 – 10.

Tab. 4.1 – 8 Univerzálního hrotového soustruhu SU50 [23]

Parametry stroje	Hodnota	Jednotky
oběžný průměr nad ložem	500	[mm]
oběžný průměr nad suportem	250	[mm]
průměr sklíčidla	250	[mm]
největší průřez nože	32 x 32	[mm]
počet stupňů otáček vřetena	22	[-]
rozsah otáček vřetena	11,2 – 1400	[min ⁻¹]
rozsah podélného posuvu	0,027 – 3,8	[mm/ot]
rozsah příčného posuvu	0,013 – 1,9	[mm/ot]
počet motorů pro hlavní pohon stroje	2	[-]
výkon motoru pro hlavní pohon stroje	2 x 5,5	[kW]
otáčky motoru pro hlavní pohon stroje	1400	[ot/min]

Tab. 4.1 – 9 Použitý soustružnický nůž

Soustružnický nůž stranový ubírací s VBD			
TěloŘN	Hodnota	Jednotky	
	b	20	[mm]
	$h = h_1$	20	[mm]
	f	20,5	[mm]
	l_1	125	[mm]
	$l_{2max.}$	32	[mm]
	úhel κ_r	90	[°]

Použitá VBD - TPUN 160308, 8230	Hodnota	Jednotky	
	l	16,5	[mm]
	d	9,53	[mm]
	s	3,18	[mm]
	r_ϵ	0,8	[mm]

Tab. 4.1 – 10 Stanovené řezné podmínky při soustružení

Řezné podmínky	Hodnota	Jednotky
řezná rychlost - v_c	141	[m/min]
otáčky - n	900	[min ⁻¹]
posuv - f	0,05	[mm/ot]
hloubka záběru - a_p	1,5	[mm]
rozměry zkušební vzorku	Ø50x500	[mm]

Broušení - Technologické podmínky

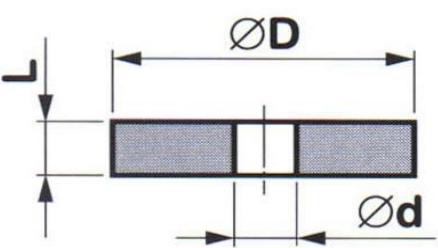

Při broušení byla použita rovinná bruska BPH 320A s technickými parametry uvedenými v tabulce 4.1 – 11. Nástrojem byl BK plochý dle specifikací v tabulce 4.1 – 12. Konkrétní řezné podmínky použité při experimentech byly nadefinovány dle potřeb experimentů a jsou uvedeny v tabulce 4.1 – 13.

Tab. 4.1 – 11 Rovinná bruska BPH 320A [22]



Parametry stroje	Hodnota	Jednotky
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 – 475	[mm]
celková výška stroje	2125	[mm]
otáčky brousícího kotouče Ø 250 mm	2522	[min ⁻¹]
otáčky brousícího kotouče Ø 198 mm	3319	[min ⁻¹]
celkový maximální příkon stroje	15,4	[kVA]

Tab. 4.1 – 12 Použitý brusný nástroj (BK)

Brousící kotouč A98 46 K 9 V			
Rozměry BK		Hodnota	Jednotky
	ØD	250	[mm]
	Ød	76	[mm]
	L	25	[mm]
Složení BK		Popis označení	
	A98	Světle růžový korund	
	46	Zrnitost – střední	
	K	Tvrdost – měkká	
	9	Struktura – velmi otevřená	
	V	Pojivo - keramické	

Tab. 4.1 – 13 Stanovené řezné podmínky při broušení

Řezné podmínky	Hodnota	Jednotky
řezná rychlost v_c	32,7	[m/s]
otáčky n	2500	[min ⁻¹]
posuv f	15,5	[m/min]
hloubka záběru a_p	0,02	[mm]
rozměry zkušební vzorku	80x60x13	[mm]
počet přejezdů BK přes zk. vzorek	14	[-]
orovnávání BK jednokamen. orovnávačem		
hrubování 2x	0,01	[mm]
na čisto 2x	0,005	[mm]

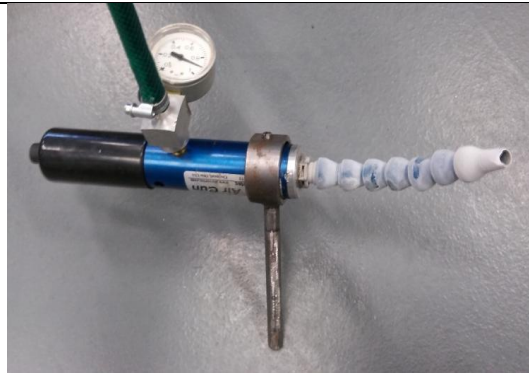
4.1.8 Zvolená zařízení pro přívod procesních médií

Zařízení pro vytvoření podchlazeného vzduchu

Při experimentech bylo využito zařízení „Cold Air Gun“, v tabulce 4.1 – 14, pracující na principu vírové trubice. Vstup vzduchu byl o tlaku 0,5 – 0,7 MPa. Pomocí

regulátoru na zařízení byl nastaven maximální chladivý proud vzduchu vycházející z trysky.


Tab. 4.1 – 14 Zařízení pro podchlazený vzduch – Cold Air Gun

Charakteristika zařízení	Hodnota	Jednotky	
	průtočnost	2 - 15	[m ³ /min]
	průměr trysky	5	[mm]
	rozsah	0,5 – 0,7	[MPa]

Zařízení pro přívod zkapalněného CO₂

Zařízení k dávkování zkapalněného CO₂, v tabulce 4.1 – 15, bylo složeno z řídicí jednotky s programovaným PLC od firmy LINDE GAS a.s., řízeným ventilem, tryskou průměru 0,8 mm a tlakovou nádobou se zkapalněným CO₂, s provozním tlakem 7 MPa.

Tab. 4.1 – 15 Zařízení k dávkování zkapalněného CO₂

Charakteristika zařízení	Hodnota	Jednotky	
	průtočnost (1x tryska)	2,2	[g/s]
	průměr trysky	0,8	[mm]
	rozsah	5,5 - 7	[MPa]
	spotřeba	0,17	[kW/h]

Zařízení pro přívod zkapalněného dusíku

Pro přívod tekutého dusíku bylo použito elektrické přečerpávací zařízení EPZ – 2, v tabulce 4.1 -16, od firmy AVIKO PRAHA s.r.o. Zařízení je složeno z řízeného napájecího modulu a topné spirály. Při sepnutí ohřevu dojde k odpaření části zkapalněného dusíku uvnitř Dewarovy nádoby a vzniklým přetlakem je dusík vytlačován do ústí trysky. Regulátorem lze průběžně měnit velikost ohřevu, tj. tlaku v nádobě a tím rychlost vytlačování do trysky.

Tab. 4.1 – 16 Elektrické přečerpávací zařízení EPZ – 2

Charakteristika zařízení	Hodnota	Jednotky
	<i>průtočnost</i>	6,47 [g/s]
	<i>průměr trysky</i>	5 [mm]
	<i>rozsah</i>	0 - 25 [kPa]
	<i>přesnost</i>	0,1 [kPa]
	<i>spotřeba</i>	0,17 [kW/h]

Zařízení pro přívod procesní kapaliny

Zařízení se skládalo z nádoby na cca 15 - 20 litrů PK s čerpadlem, hadicemi a tryskou na přívod kapaliny do místa řezu a hadicemi pro zpětné vrácení PK ze stroje do nádoby s čerpadlem, v tabulce 4.1 – 17.

Tab. 4.1 – 17 Externí zařízení pro čerpání PK

Charakteristika zařízení	Hodnota	Jednotky
	<i>průtočnost</i>	0,27 [l/s]
	<i>rozsah</i>	15 - 20 [l]
	<i>přesnost</i>	0,1 [kPa]
	<i>spotřeba</i>	0,5 [kW/h]

Pro zjištění správné koncentrace namíchané PKHOCUT 795B a PK EOPS 1030 byl použit ruční refraktometr Brix ATC, v tabulce 4.1 – 18. PK byly namíchaný na 5% koncentraci oleje a vody.

Tab. 4.1 - 18 Refraktometr Brix ATC

Charakteristika zařízení	Hodnota	Jednotky
	<i>rozsah</i>	0 - 18 [%]
	<i>přesnost</i>	0,15 [%]

Další stanovené parametry, hodnoty a podmínky

Tab. 4.1 – 19 Doplňující parametry pro realizaci experimentů

Parametry	Hodnoty	Jednotky
teplota v laboratoři LTT	20 – 25	[°C]
tlak v laboratoři LTT	900 - 1000	[kPa]
vlhkost v laboratoři LTT	30 - 40	[%]
koncentrace PK	5	[%]
refrakční koeficient PK HOCUT 795B	1	[-]
refrakční koeficient PK EOPS 1030	1	[-]
tlaková nádoba - CO ₂	20	[kg]
Dewarova nádoba - dusík	25,89	[kg]
kompresor k VT	2,2	[kW/h]
průmyslové odsávání	0,17	[kW/h]
cena vírové trubice (VT)	11000	[Kč]
cena řídicí jednotky - dusík	40000	[Kč]
cena řídicí jednotky - CO ₂	20000	[Kč]
cena Dewarovy nádoby	25000	[Kč]
cena tlakové nádoby	5200	[Kč]
cena kompresoru	6000	[Kč]
cena průmyslového odsávání	3000	[Kč]
cena externího čerpadla	5000	[Kč]
cena refraktometru	1200	[Kč]
cena koncentráту HOCUT 10l	2500	[Kč]
cena koncentráту EOPS 10l	1700	[Kč]
cena vodné, stočné	96	[Kč/m ³]
cena elektrické energie	4,8	[Kč/kWh]
cena doplnění Dewarovy nádoby	1880	[Kč/ks]
cena doplnění Tlakové nádoby - CO ₂	480	[Kč/ks]
cena likvidace PK	100	[Kč/l]

4.2 Soustružení - Dosažené výsledky

Experimenty byly realizovány dle metodiky v kapitole 4.1. Metodika obsahuje stanovené proměnné, hodnocené parametry a popis vyhodnocení.

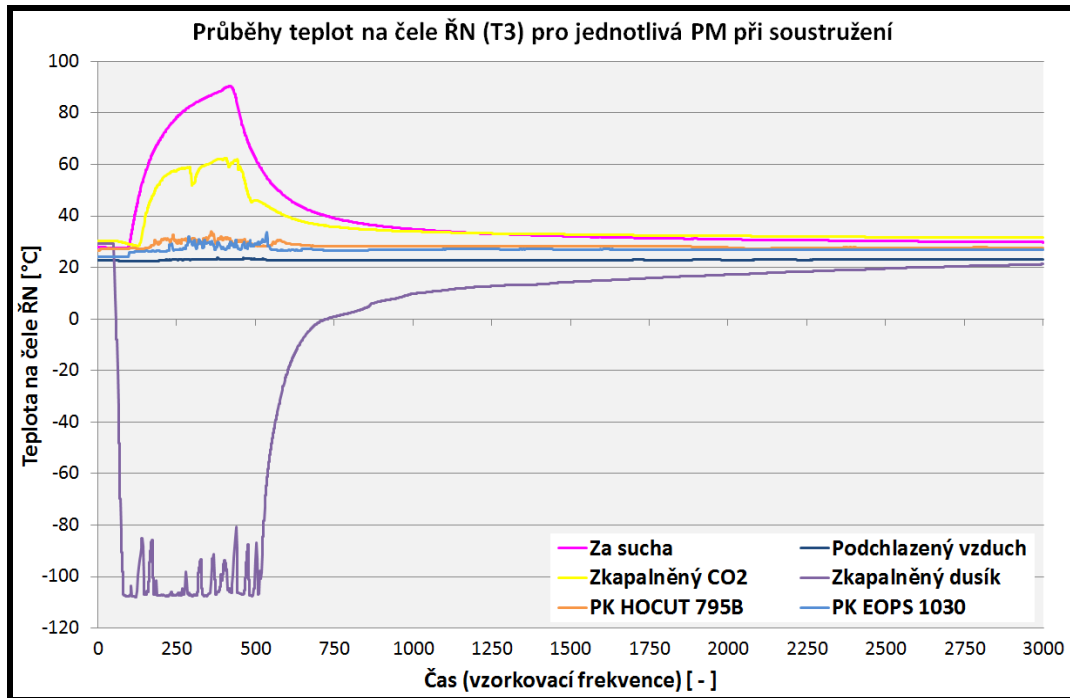
4.2.1 Teplota

Popis měření teploty je uveden v kapitole 4.1.2. Naměřené maximální teploty pro jednotlivé termočlánky a pro jednotlivá PM jsou uvedeny v tabulce 4.2 – 1 a obrázku 4.2 – 4. Vzorové průběhy naměřených teplot jednotlivých termočlánků, dokumentující vliv PM, jsou uvedeny pro teplotu na čele ŘN na obrázku 4.2 – 1, pro teplotu na špičce ŘN na obrázku 4.2 – 2 a pro teplotu ve středu ŘN na obrázku 4.2 – 3.

Tab. 4.2 – 1 Maximální teploty při soustružení s PM

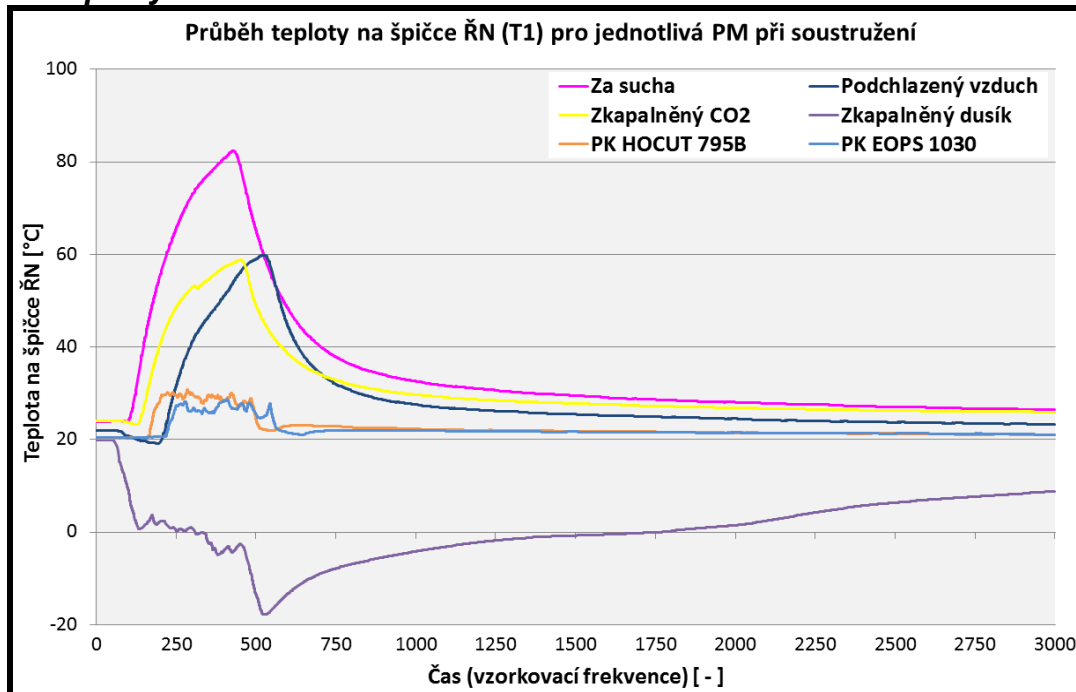
SOUSTRUŽENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA			
Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
Maximální hodnota T [°C]	81,7	75,0	90,4
Konfidenční interval [°C]	±2,2	±1,7	±3,3
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH			
Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
Maximální hodnota T [°C]	59,0	57,9	24,8
Konfidenční interval [°C]	±8,8	±8,2	±2,3
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO₂			
Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
Maximální hodnota T [°C]	61,2	59,1	66,6
Konfidenční interval [°C]	±9,3	±10,3	±13,7
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK			
Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
Maximální hodnota T [°C]	-2,4	1,0	-108,1
Konfidenční interval [°C]	±2,1	±3,2	±2,9
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795 B			
Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
Maximální hodnota T [°C]	30,3	23,2	33,5
Konfidenční interval [°C]	±2,5	±1,4	±2,0
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030			
Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
Maximální hodnota T [°C]	28,7	24,4	35,1
Konfidenční interval [°C]	±4,6	±2,3	±5,1

Teplota čela ŘN



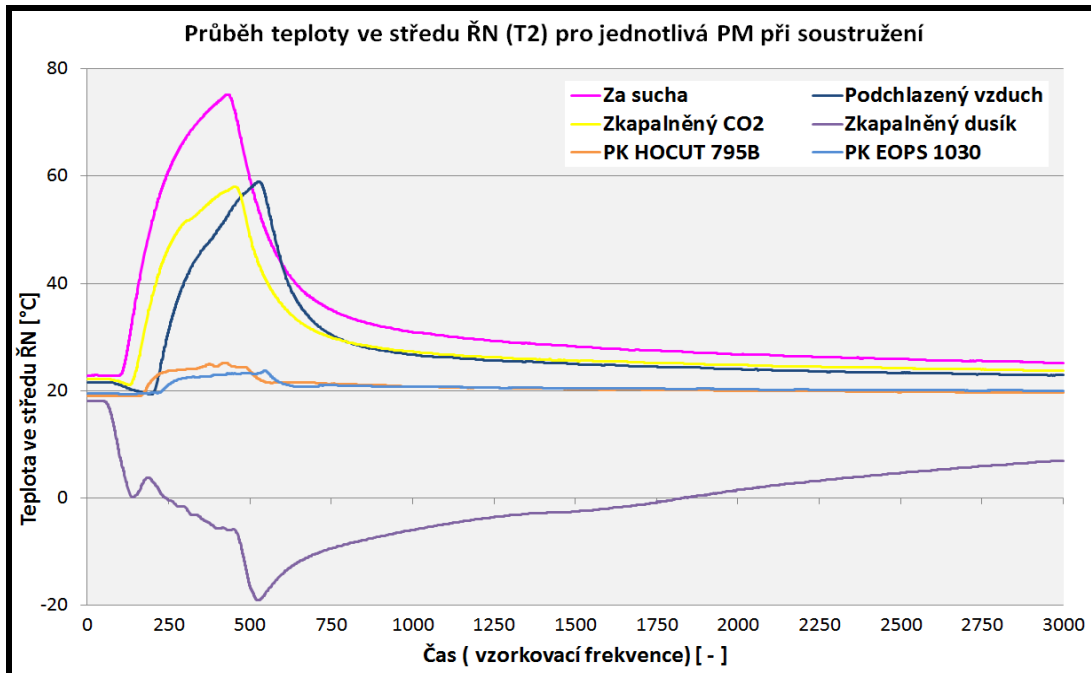
Obr. 4.2 – 1 Vzorový průběh teplot na čele ŘN při soustružení s PM

Teplota špičky ŘN

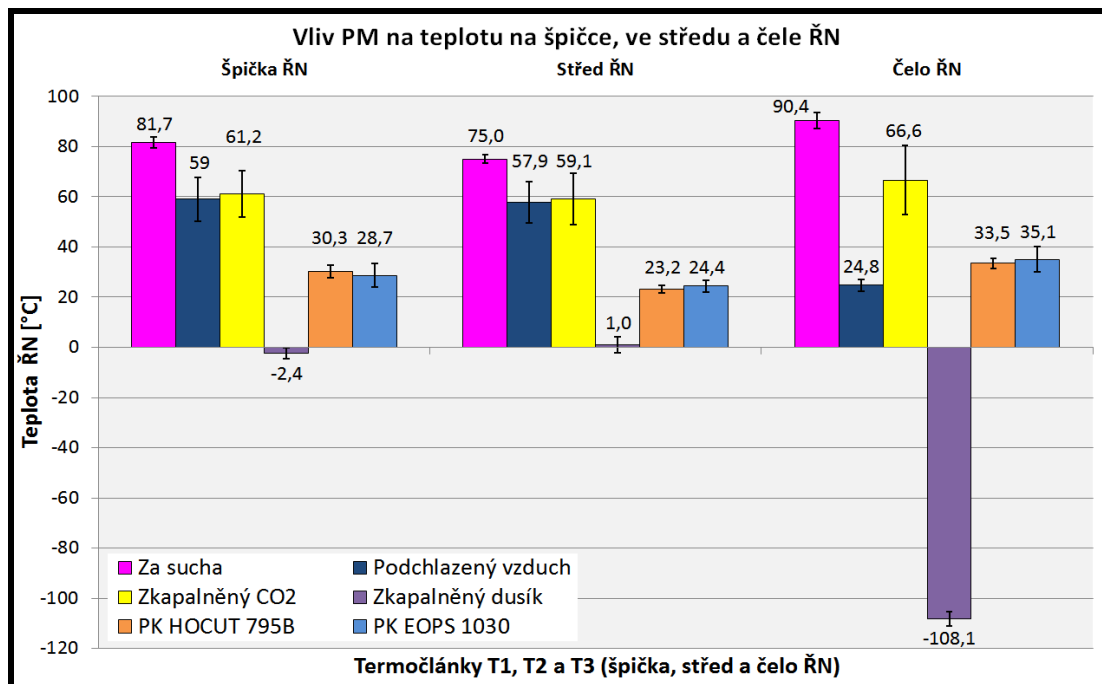


Obr. 4.2 – 2 Vzorový průběh teplot na špičce ŘN při soustružení s PM

Teplota středu ŘN



Obr. 4.2 – 3 Vzorový průběh teplot středu ŘN při soustružení s PM



Obr. 4.2 – 4 Maximální teploty při soustružení s PM

Z maximálních naměřených teplot na čele ŘN - termočlánek T3, uvedených v tabulce 4.2 – 1 a obrázku 4.2 – 4, vyplývá, že při **soustružení za sucha** byla naměřena maximální teplota čela ŘN 90,4°C. Při chlazení **podchlazeným vzduchem** bylo zjištěno snížení teploty čela ŘN o 72,6%. Při chlazení **zkapalněným CO₂** bylo zjištěno snížení teploty čela ŘN o 26,3%. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** bylo zjištěno nejvýraznějšího snížení teploty čela ŘN 219,5%. Při chlazení

PK **HOCUT 795B** bylo zjištěno snížení teploty čela ŘN o 62,9%. Při chlazení PK **EOPS 1030** bylo zjištěno snížení teploty čela ŘN o 61,2%.

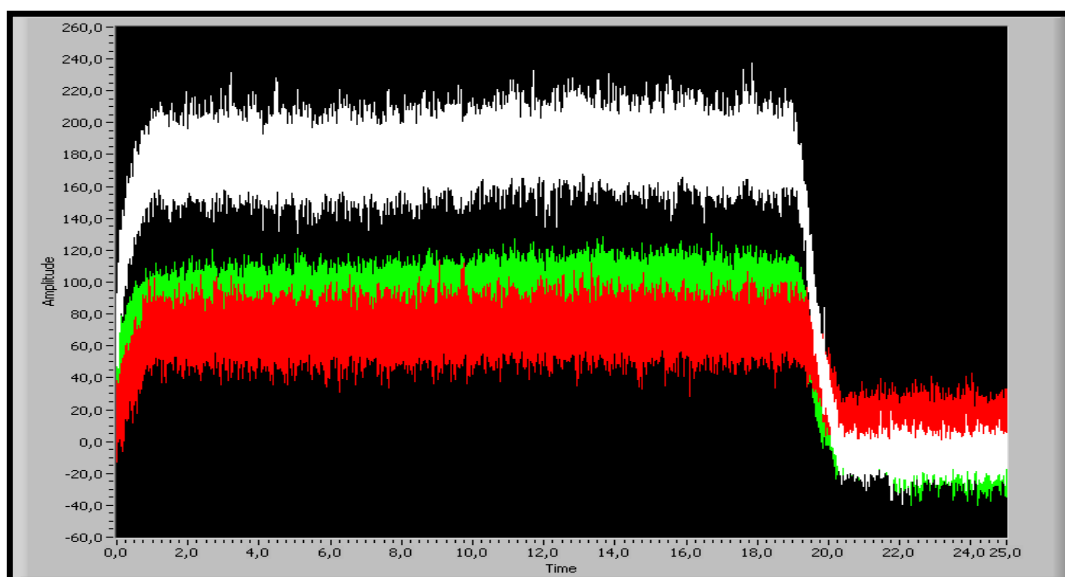
Z maximálních naměřených teplot na špičce ŘN - termočlánek T_1 , uvedených v tabulce 4.2 – 1 a obrázku 4.2 – 4, vyplývá, že při **soustružení za sucha** byla naměřena maximální teplota špičky ŘN 81,7°C. Při chlazení **podchlazeným vzduchem** bylo zjištěno snížení teploty špičky ŘN o 27,8%. Při chlazení **zkapalněným CO₂** bylo zjištěno snížení teploty špičky ŘN na o 25,1%. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** bylo zjištěno nejvyššího snížení teploty špičky ŘN o 102,9%. Při chlazení PK **HOCUT 795B** bylo zjištěno snížení teploty špičky ŘN o 62,9%. Při chlazení PK **EOPS 1030** bylo zjištěno snížení teploty špičky ŘN o 64,9%.

Z maximálních naměřených teplot ve středu ŘN - termočlánek T_2 , uvedených v tabulce 4.2 – 1 a obrázku 4.2 – 4, vyplývá, že při **soustružení za sucha** byla naměřena maximální teplota středu ŘN 75,0°C. Při chlazení **podchlazeným vzduchem** bylo zjištěno snížení teploty středu ŘN o 22,8%. Při chlazení **zkapalněným CO₂** bylo zjištěno snížení teploty středu ŘN o 21,2%. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** bylo zjištěno snížení teploty středu ŘN o 98,7%. Při chlazení PK **HOCUT 795B** bylo zjištěno snížení teploty středu ŘN o 59,6%. Při chlazení PK **EOPS 1030** bylo zjištěno snížení teploty středu ŘN o 61,7%.

Shrnutí poznatků a výsledků z měření teplot při soustružení je rozebráno v kapitole 5.1. Naměřené hodnoty jednotlivých dílčích měření pro jednotlivá PM jsou uvedeny v příloze č. 1 - str. I.

4.2.2 Působící síly

Popis měření působících sil je uveden v kapitole 4.1.3. Vzorový záznam průběhu působících sil při soustružení pro jednotlivá PM je uveden na obrázku 4.2 – 5. Naměřené hodnoty řezné síly $F_c=F_z$, posuvové síly $F_f=F_x$ a přísluvové síly $F_p=F_y$ pro jednotlivá PM jsou uvedeny v tabulce 4.2 – 2 a na obrázku 4.2 - 6.

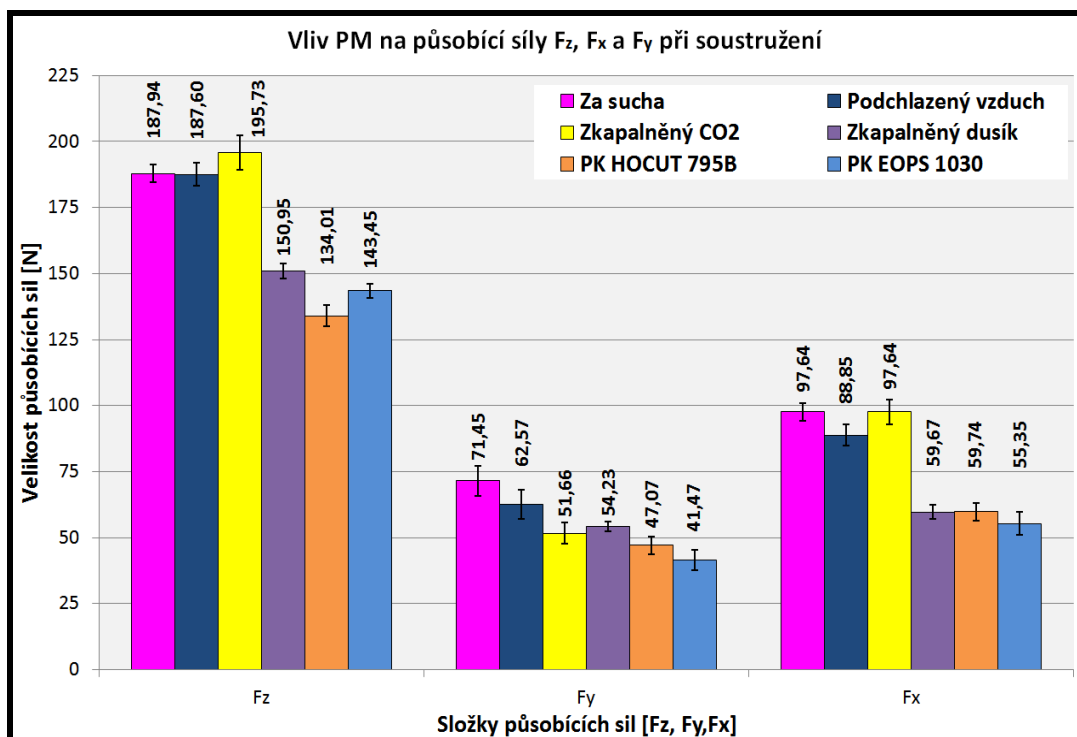


Obr. 4.2 – 5 Vzorový průběh působících sil při soustružení s PM

Tab. 4.2 – 2 Působící síly při soustružení s PM

SOUSTRUŽENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA						
Měřený parametr F	$F_f = F_x$ [N]	Konfid. interval F_x [N]	$F_p = F_y$ [N]	Konfid. Interval F_y [N]	$F_c = F_z$ [N]	Konfid. interval F_z [N]
Začátek vzorku	97,44	±6,85	71,64	±15,20	189,86	±2,41
Střed vzorku	98,80	±8,28	71,52	±15,06	189,28	±5,03
Konec vzorku	96,68	±10,91	71,20	±15,33	184,68	±12,02
Průměrná hodnota	97,64	±3,40	71,45	±5,80	187,94	±3,20
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH (VÍROVÁ TRUBICE)						
Měřený parametr F	$F_f = F_x$ [N]	Konfid. interval F_x [N]	$F_p = F_y$ [N]	Konfid. Interval F_y [N]	$F_c = F_z$ [N]	Konfid. interval F_z [N]
Začátek vzorku	86,14	±10,33	61,82	±13,96	184,78	±10,10
Střed vzorku	89,82	±8,43	63,32	±13,18	189,04	±10,69
Konec vzorku	90,58	±10,151	62,58	±15,45	188,98	±12,21
Průměrná hodnota	88,85	±3,87	62,57	±5,45	187,60	±4,38
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO₂						
Měřený parametr F	$F_f = F_x$ [N]	Konfid. interval F_x [N]	$F_p = F_y$ [N]	Konfid. Interval F_y [N]	$F_c = F_z$ [N]	Konfid. interval F_z [N]
Začátek vzorku	95,80	±11,78	51,36	±9,45	194,56	±16,17
Střed vzorku	99,84	±7,42	52,50	±8,75	197,46	±16,24
Konec vzorku	97,28	±15,62	51,12	±11,90	195,16	±18,66
Průměrná hodnota	97,64	±4,70	51,66	±3,90	195,73	±6,60

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK						
Měřený parametr F	$F_f = F_x$ [N]	Konfid. interval F_x [N]	$F_p = F_y$ [N]	Konfid. Interval F_y [N]	$F_c = F_z$ [N]	Konfid. interval F_z [N]
Začátek vzorku	61,92	±5,68	52,64	±2,78	153,90	±8,97
Střed vzorku	58,12	±8,09	52,94	±5,55	151,08	±3,84
Konec vzorku	58,96	±6,07	57,10	±2,58	147,92	±6,77
Průměrná hodnota	59,67	±3,00	54,23	±1,90	150,95	±2,70
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795B						
Měřený parametr F	$F_f = F_x$ [N]	Konfid. interval F_x [N]	$F_p = F_y$ [N]	Konfid. Interval F_y [N]	$F_c = F_z$ [N]	Konfid. interval F_z [N]
Začátek vzorku	60,82	±8,74	47,50	±8,28	136,42	±9,08
Střed vzorku	58,82	±7,28	47,06	±8,66	133,36	±8,94
Konec vzorku	59,58	±9,34	46,64	±9,23	132,26	±12,05
Průměrná hodnota	59,74	±3,30	47,07	±3,30	134,01	±4,00
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030						
Měřený parametr F	$F_f = F_x$ [N]	Konfid. interval F_x [N]	$F_p = F_y$ [N]	Konfid. Interval F_y [N]	$F_c = F_z$ [N]	Konfid. interval F_z [N]
Začátek vzorku	57,10	±9,18	41,74	±9,40	146,18	±8,49
Střed vzorku	54,02	±11,53	40,96	±11,08	141,40	±4,11
Konec vzorku	54,94	±12,73	41,72	±10,38	142,76	±4,99
Průměrná hodnota	55,35	±4,30	41,47	±3,90	143,45	±2,60



Obr. 4.2 – 6 Složek působících sil při soustružení

Z naměřených působících sil pro jednotlivá PM, uvedených na obrázku 4.2 – 6 a v tabulce 4.2 – 2, vyplývá, že při **soustružení za sucha** byla naměřena posuvová síla F_x 97,64N, přísluvová síla F_y 71,45N a řezná síla F_z 187,94N. Při chlazení **podchlazeným vzduchem** bylo zjištěno snížení posuvové síly F_x o 9,9%, přísluvové síly F_y o 12,4% a řezné síly F_z o 0,2%. Při chlazení **zkapalněným CO₂** byla zjištěna stejná velikost posuvové síly F_x . U přísluvové síly F_y bylo zjištěno snížení o 27,7%. U řezné síly F_z bylo zjištěno zvýšení o 4,1%. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** bylo zjištěno snížení posuvové síly F_x o 42,7%, přísluvové síly F_y o 24,1% a řezné síly F_z o 19,7%. Při chlazení PK **HOCUT 795B** bylo zjištěno snížení posuvové síly F_x o 42,7%, přísluvové síly F_y o 34,1% a řezné síly F_z o 27,8%. Při chlazení PK **EOPS 1030** bylo zjištěno snížení posuvové síly F_x 47,6%, přísluvové síly F_y o 42,0% a řezné síly F_z o 23,7%N.

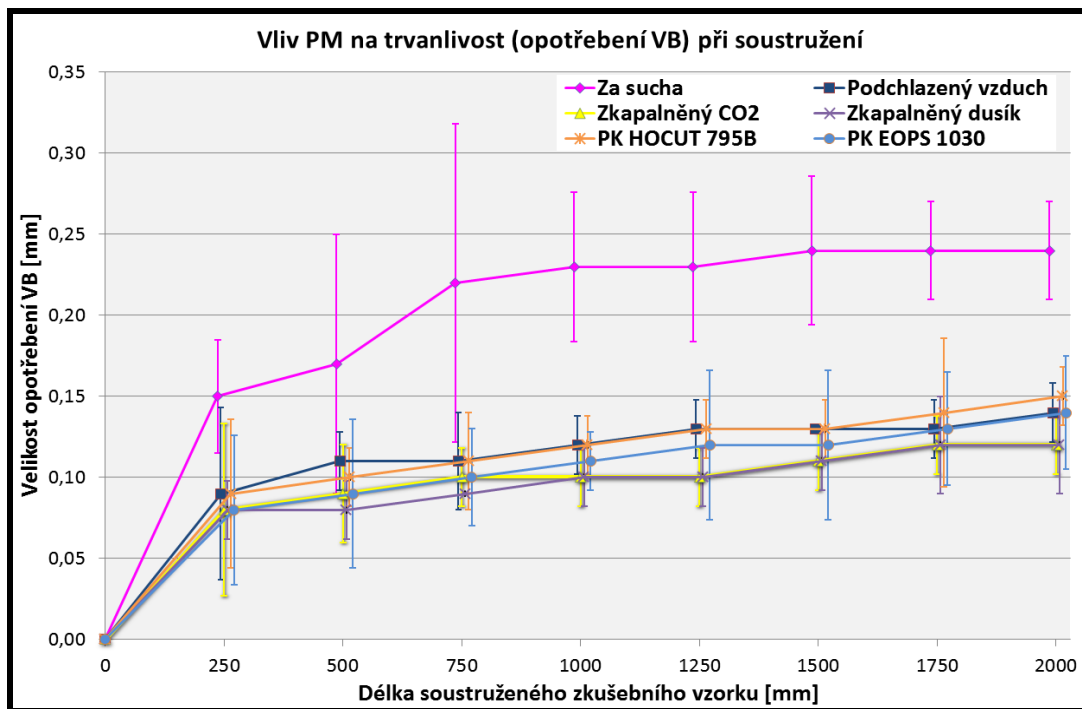
Shrnutí poznatků a výsledků z experimentů je rozebráno v kapitole 5.1. Hodnoty dílčích výsledků dosažených při experimentech jsou uvedeny v příloze č. 1 - str. II.

4.2.3 Trvanlivost řezného nástroje

Popis měření je uveden v kapitole 4.1.4. Naměřená opotřebení VB pro jednotlivá PM jsou uvedena v tabulce 4.2 – 3 a na obrázku 4.2 – 7.

Tab. 4.2 – 3 Opotřebení VB při soustružení s PM

SOUSTRUŽENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA									
L [mm]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
Hodnota VB[mm]	0	0,15	0,17	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24
Konfidenční interval[mm]	± 0	± 0,035	± 0,080	± 0,098	± 0,046	± 0,046	± 0,046	± 0,030	± 0,030
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH									
L [mm]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
Hodnota VB[mm]	0	0,09	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14
Konfidenční interval [mm]	± 0	± 0,053	± 0,018	± 0,030	± 0,018	± 0,018	± 0,000	± 0,018	± 0,018
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO₂									
L [mm]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
Hodnota VB[mm]	0	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12
Konfidenční interval [mm]	± 0	± 0,053	± 0,030	± 0,018	± 0,018	± 0,018	± 0,018	± 0,018	± 0,018
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK									
L [mm]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
Hodnota VB[mm]	0	0,08	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12
Konfidenční interval [mm]	± 0	± 0,018	± 0,018	± 0,000	± 0,018	± 0,018	± 0,018	± 0,030	± 0,030
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795 B									
L [mm]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
Hodnota VB[mm]	0	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15
Konfidenční interval [mm]	± 0	± 0,046	± 0,018	± 0,030	± 0,018	± 0,018	± 0,018	± 0,046	± 0,018
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030									
L [mm]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
Hodnota VB[mm]	0	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14
Konfidenční interval [mm]	± 0	± 0,046	± 0,046	± 0,030	± 0,018	± 0,046	± 0,046	± 0,035	± 0,035



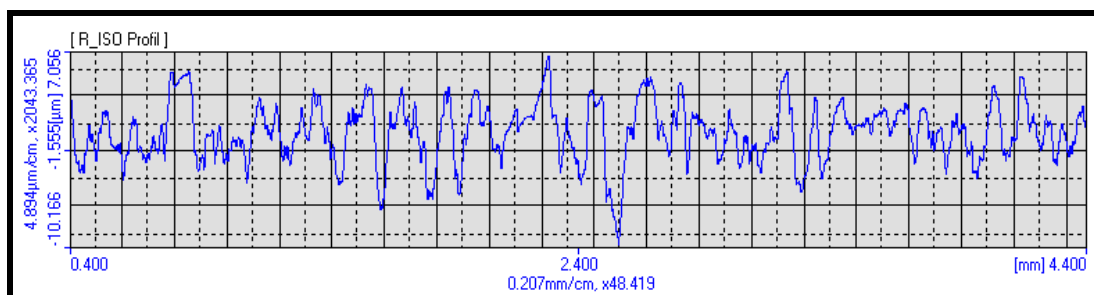
Obr. 4.2 - 7 Opotřebení VB při soustružení s PM

Z naměřených opotřebení VB pro jednotlivá PM, uvedených na obrázku 4.2 – 7 a v tabulce Tab. 4.2 – 3, vyplývá, že při **soustružení za sucha** bylo naměřeno opotřebení VB 0,24 mm. Při chlazení **podchlazeným vzduchem** bylo zjištěno nižší opotřebení ŘN o 41,6%. Při chlazení **zkapalněným CO₂** bylo zjištěno nižší opotřebení ŘN o 50%. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** bylo zjištěno nižší opotřebení ŘN o 50%. Při chlazení **PK HOCUT 795B** bylo zjištěno nižší opotřebení ŘN o 37,5%. Při chlazení **PK EOPS 1030** bylo zjištěno nižší opotřebení ŘN o 41,7%.

Shrnutí poznatků a výsledků z experimentů je rozebráno v kapitole 5.1. Hodnoty dílčích výsledků dosažených při experimentech jsou uvedeny v příloze č. 1 - str. V.

4.2.4 Drsnost povrchu

Popis měření je uveden v kapitole 4.1.5. Vzorový záznam profilu drsnosti po soustružení pro jednotlivá PM je uveden na obrázku 4.2 – 8. Naměřené parametry drsnosti povrchu R_a , R_z , R_t zkušební vzorků pro jednotlivá PM jsou uvedeny v tabulce 4.2– 4 a na obrázku 4.2 – 9.



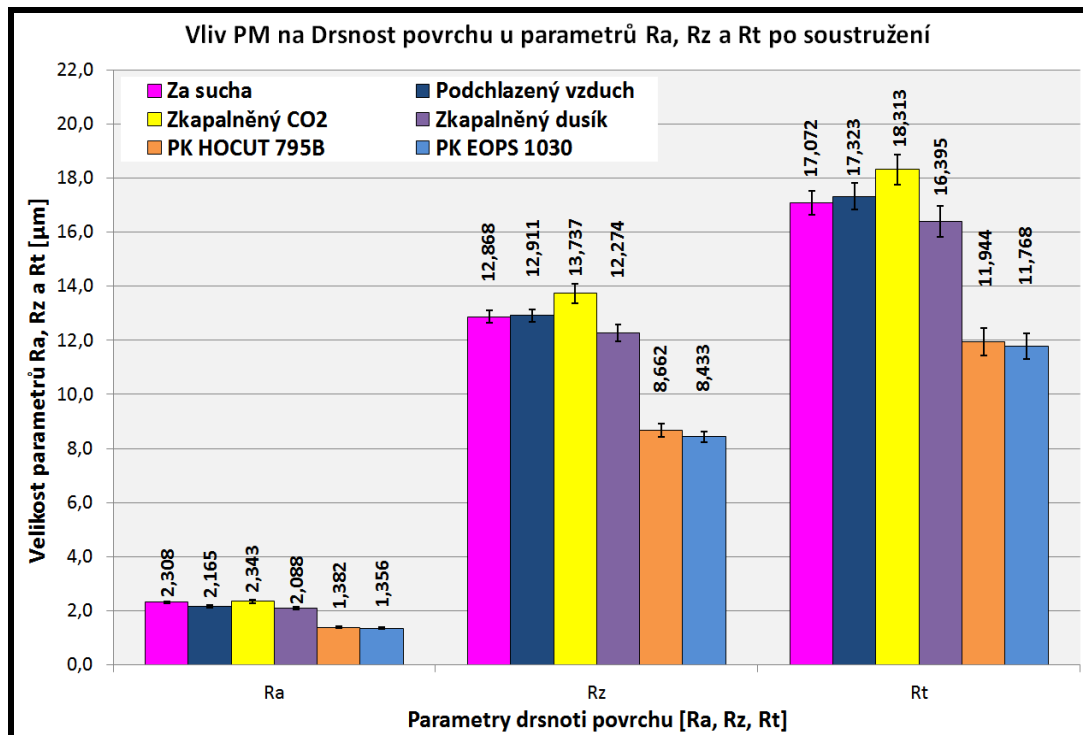
Obr. 4.2 - 8 Záznam měřeného profilu soustruženého povrchu s PM

Tab. 4.2 - 4 Drsnosti povrchu po soustružení s PM

SOUSTRUŽENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA						
Drsnost povrchu	Ra [μm]	Konfid. interval Ra [μm]	Rz [μm]	Konfid. interval Rz [μm]	Rt[μm]	Konfid. interval Rt [μm]
Začátek vzorku	2,242	±0,076	12,665	±0,339	16,883	±0,628
Střed vzorku	2,288	±0,071	12,744	±0,416	16,934	±0,808
Konec vzorku	2,394	±0,071	13,195	±0,483	17,398	±0,947
Průměrná hodnota	2,308	±0,043	12,868	±0,233	17,072	±0,440
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH						
Drsnost povrchu	Ra [μm]	Konfid. interval Ra [μm]	Rz [μm]	Konfid. interval Rz [μm]	Rt[μm]	Konfid. interval Rt [μm]
Začátek vzorku	2,081	±0,085	12,719	±0,534	17,052	±1,004
Střed vzorku	2,186	±0,088	12,928	±0,417	17,111	±0,642
Konec vzorku	2,227	±0,078	13,085	±0,340	17,806	±1,036
Průměrná hodnota	2,165	±0,048	12,911	±0,240	17,323	±0,501
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO₂						
Drsnost povrchu	Ra [μm]	Konfid. interval Ra [μm]	Rz [μm]	Konfid. interval Rz [μm]	Rt[μm]	Konfid. interval Rt [μm]
Začátek vzorku	2,428	±0,135	14,220	±0,725	19,168	±1,225
Střed vzorku	2,356	±0,147	13,634	±0,637	17,982	±0,816
Konec vzorku	2,246	±0,106	13,355	±0,538	17,790	±0,967
Průměrná hodnota	2,343	±0,073	13,737	±0,356	18,313	±0,569
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK						
Drsnost povrchu	Ra [μm]	Konfid. interval Ra [μm]	Rz [μm]	Konfid. interval Rz [μm]	Rt[μm]	Konfid. interval Rt [μm]
Začátek vzorku	2,160	±0,093	12,511	±0,624	16,897	±1,188
Střed vzorku	2,070	±0,107	12,344	±0,628	16,356	±1,009
Konec vzorku	2,035	±0,076	11,969	±0,484	15,932	±0,902
Průměrná hodnota	2,088	±0,052	12,274	±0,321	16,395	±0,572
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795B						
Drsnost povrchu	Ra [μm]	Konfid. interval Ra [μm]	Rz [μm]	Konfid. interval Rz [μm]	Rt[μm]	Konfid. interval Rt [μm]
Začátek vzorku	1,299	±0,042	7,928	±0,354	10,659	±0,924
Střed vzorku	1,381	±0,054	8,830	±0,418	12,326	±0,882
Konec vzorku	1,466	±0,053	9,224	±0,382	12,849	±0,764
Průměrná hodnota	1,382	±0,031	8,662	±0,245	11,944	±0,515

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030

Drsnost povrchu	Ra [μm]	Konfid. interval Ra [μm]	Rz [μm]	Konfid. interval Rz [μm]	Rt [μm]	Konfid. interval Rt [μm]
Začátek vzorku	1,299	$\pm 0,034$	8,157	$\pm 0,278$	11,457	$\pm 0,867$
Střed vzorku	1,340	$\pm 0,040$	8,439	$\pm 0,286$	11,958	$\pm 0,792$
Konec vzorku	1,428	$\pm 0,066$	8,702	$\pm 0,489$	11,889	$\pm 0,935$
Průměrná hodnota	1,356	$\pm 0,029$	8,433	$\pm 0,204$	11,768	$\pm 0,473$



Obr. 4.2 - 9 Drsnosti obrobeného povrchu s PM

Z naměřených parametrů drsnosti povrchu R_a , R_z a R_t pro jednotlivá PM uvedených na obrázku 4.2 – 9 a v tabulce 4.2 – 4, vyplývá, že po **soustružení za sucha** byl naměřen parametr R_a 2,308 μm , u parametru R_z 12,868 μm a u parametru R_t 17,072 μm . Po chlazení **podchlazeným vzduchem** bylo zjištěno snížení parametru R_a o 20,1%. U parametru R_z bylo zjištěno zvýšení o 0,3%. U parametru R_t bylo zjištěno zvýšení o 1,5%. Po chlazení **zkapalněným CO₂** bylo zjištěno zvýšení parametru R_a o 1,5%, u parametru R_z o 6,8% a u parametru R_t o 7,3%. Po chlazení **zkapalněným dusíkem** bylo zjištěno snížení parametru R_a o 10,5%, u parametru R_z o 4,6% a u parametru R_t o 4,0%. Po chlazení **PK HOCUT 795B** bylo zjištěno snížení parametru R_a o 40,1%, u parametru R_z o 24,6% a u parametru R_t o 30,0%. Po chlazení **PK EOPS 1030** bylo zjištěno snížení parametru R_a o 40,4%, u parametru R_z o 34,5% a u parametru R_t o 31,1%.

Shrnutí poznatků a výsledků z experimentů je rozebráno kapitole 5.1. Hodnoty jednotlivých dílčích měření pro jednotlivá PM jsou uvedeny v příloze č. 1 - str. VI.

4.2.5 Rozměrová přesnost

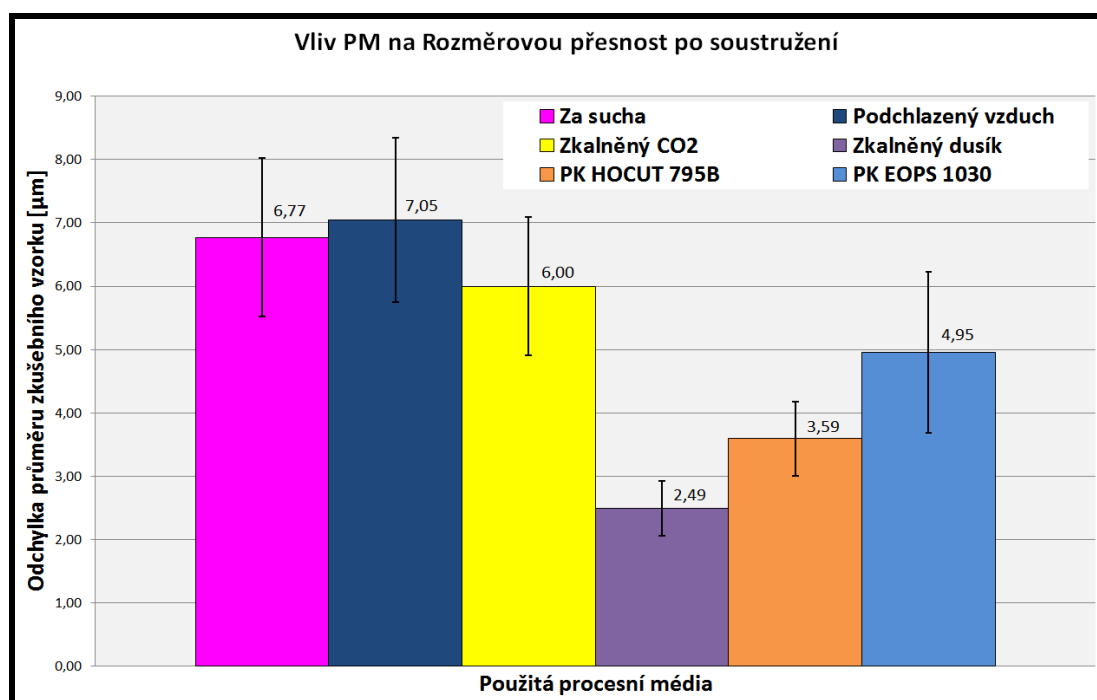
Popis měření je uveden v kapitole 4.1.6. Naměřené odchylky rozměru (průměru) pro jednotlivá PM jsou uvedeny v tabulce 4.2 – 5 a na obrázku 4.2 – 10.

Tab. 4.2 – 5 Hodnoty odchylek průměru zkušební vzorku po soustružení s PM

SOUSTRUŽENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA		
Měřený parametr	Odchylka rozměru [μm]	Konfidenční interval [μm]
Začátek vzorku	2,48	±0,80
Střed vzorku	4,16	±0,82
Konec vzorku	13,68	±1,05
Střední hodnota	6,77	±1,25
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH		
Měřený parametr	Odchylka rozměru [μm]	Konfidenční interval [μm]
Začátek vzorku	2,20	±1,36
Střed vzorku	5,60	±1,33
Konec vzorku	13,36	±1,25
Střední hodnota	7,05	±1,30
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO₂		
Měřený parametr	Odchylka rozměru [μm]	Konfidenční interval [μm]
Začátek vzorku	1,68	±0,81
Střed vzorku	5,00	±0,95
Konec vzorku	11,32	±1,33
Střední hodnota	6,00	±1,09
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK		
Měřený parametr	Odchylka rozměru [μm]	Konfidenční interval [μm]
Začátek vzorku	1,88	±0,59
Střed vzorku	2,56	±0,74
Konec vzorku	3,04	±0,94
Střední hodnota	2,49	±0,43
SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795 B		
Měřený parametr	Odchylka rozměru [μm]	Konfidenční interval [μm]
Začátek vzorku	1,52	±0,70
Střed vzorku	3,44	±0,69
Konec vzorku	5,88	±0,89
Průměrná hodnota	3,59	±0,58

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030

Měřený parametr	Odchylka rozměru [μm]	Konfidenční interval [μm]
Začátek vzorku	1,04	±0,54
Střed vzorku	4,84	±1,76
Konec vzorku	8,96	±2,69
<i>Střední hodnota</i>	4,95	±1,27



Obr. 4.2 - 10 Střední odchylka průměru obrobku po soustružení

Ze zjištěné střední odchylky rozměrové přesnosti pro jednotlivá PM, uvedené na obrázku 4.2 – 10 a v tabulce 4.2 – 5, vyplývá, že po **soustružení za sucha** byla zjištěna střední odchylka průměru zkušební vzorku soustružené plochy 6,77μm. Po chlazení **podchlazeným vzduchem** byla zjištěna vyšší odchylka průměru o 4,1%. Po chlazení **zkapalněným CO₂** byla zjištěna nižší odchylka průměru o 11,4%. Po chlazení **zkapalněným dusíkem** byla zjištěna nejnižší odchylka průměru o 63,2%. Po chlazení **PK HOCUT 795B** byla zjištěna nižší odchylka průměru o 47,0%. Po chlazení **PK EOPS 1030** byla zjištěna nižší odchylka průměru o 26,9%.

Shrnutí poznatků a výsledků z experimentů je rozebráno v kapitole 5.1. Hodnoty jednotlivých dílčích měření rozměrové přesnosti jsou uvedeny v příloze č. 1 - str. IX.

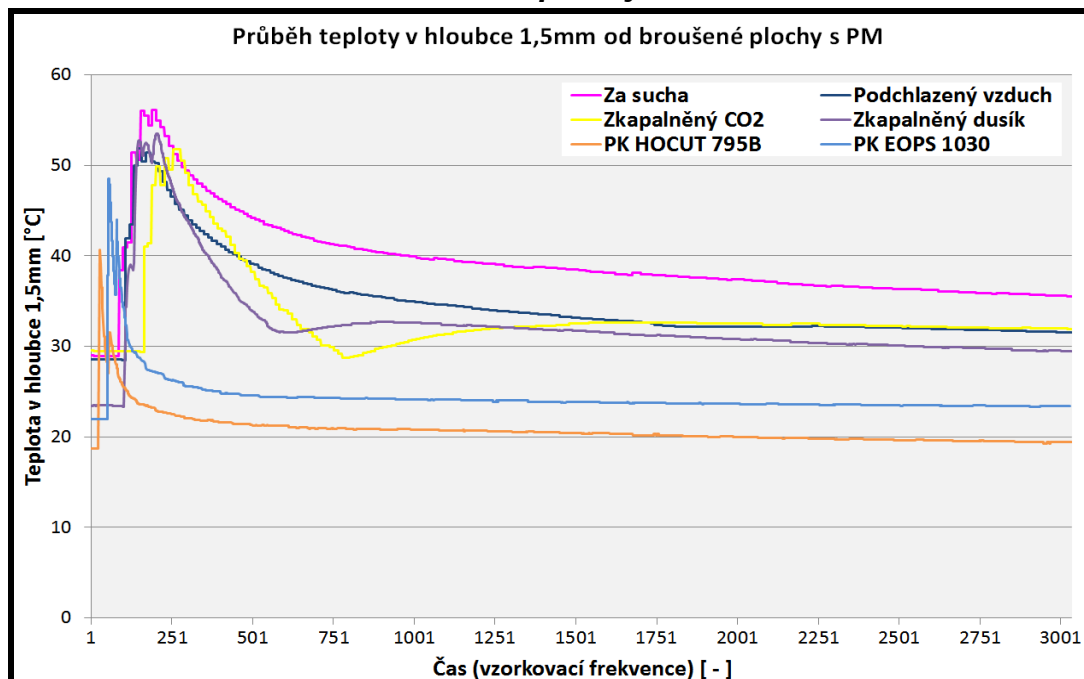
4.3 Broušení - dosažené výsledky

Experimenty byly realizovány dle metodiky v kapitole 4.1. Metodika obsahuje stanovené proměnné, hodnocené parametry a popis způsobu vyhodnocení.

4.3.1 Teplota

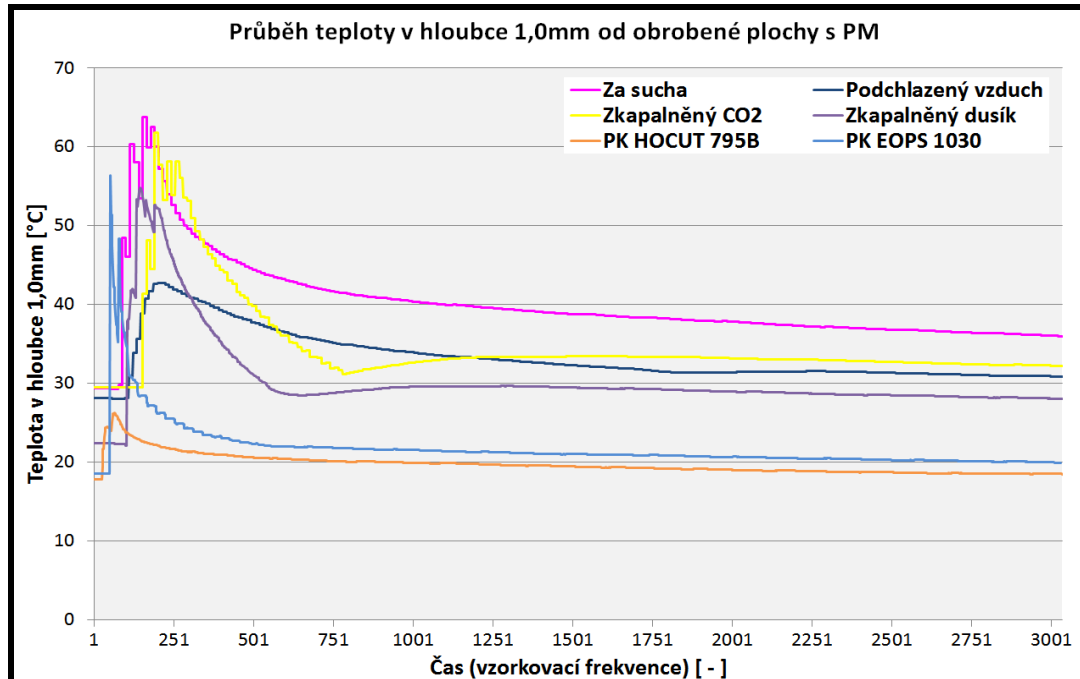
Popis měření teplot je uveden v kapitole 4.1.2. Naměřené maximální teploty pro jednotlivé termočlánky a pro jednotlivá PM, jsou uvedeny v tabulce 4.3 – 1 a obrázku 4.2 – 4. Vzorové průběhy naměřených teplot jednotlivých termočlánků, dokumentující vliv PM, jsou uvedeny pro teplotu v hloubce 1,5mm od broušeného povrchu na obrázku 4.3 – 1, pro teplotu v hloubce 1,0mm na obrázku 4.3 – 2, pro teplotu v hloubce 0,5mm na obrázku 4.2 – 3 a pro teplotu na povrchu zkušebního vzorku na obrázku 4.2 – 4.

Termočlánek T1 - 1,5 mm od broušené plochy



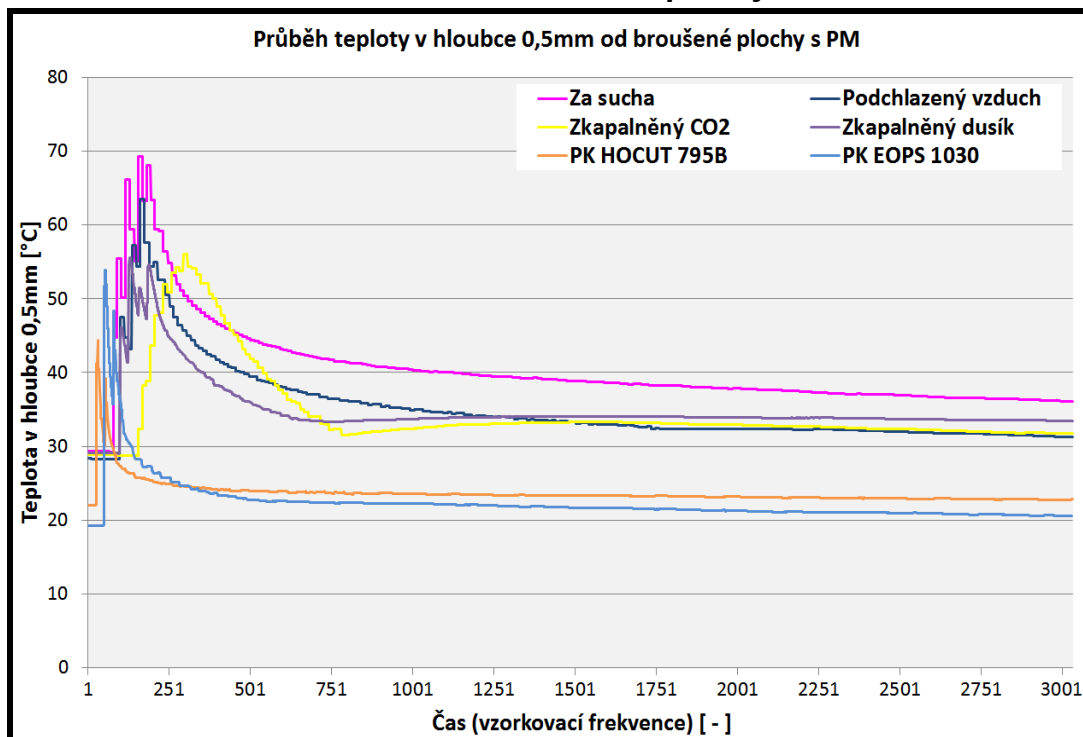
Obr. 4.3 – 1 Vzorový průběh teploty na termočlánek T1 při broušení s PM

Termočlánek T2 – 1,0 mm od broušené plochy



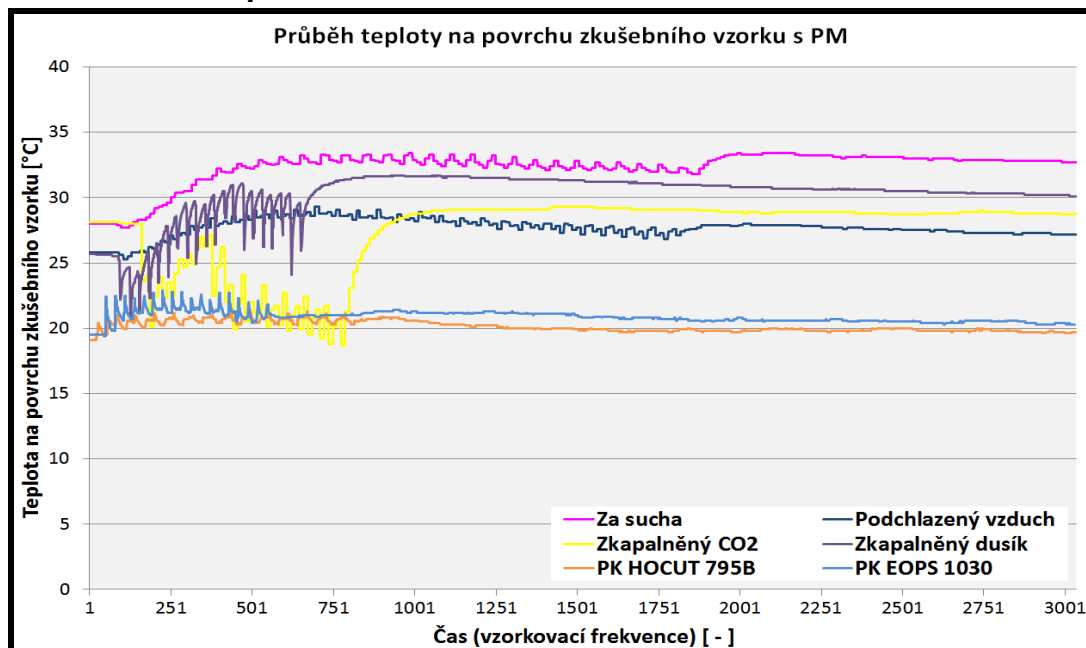
Obr. 4.3 – 2 Vzorový průběh na termočlátku T2 při broušení s PM

Termočlánek T3, T4 a T5 - 0,5 mm od broušené plochy



Obr. 4.3 – 3 Vzorový průběh teploty na termočlátku T3 při broušení s PM

Termočlánek T6 na povrchu zkušebního vzorku



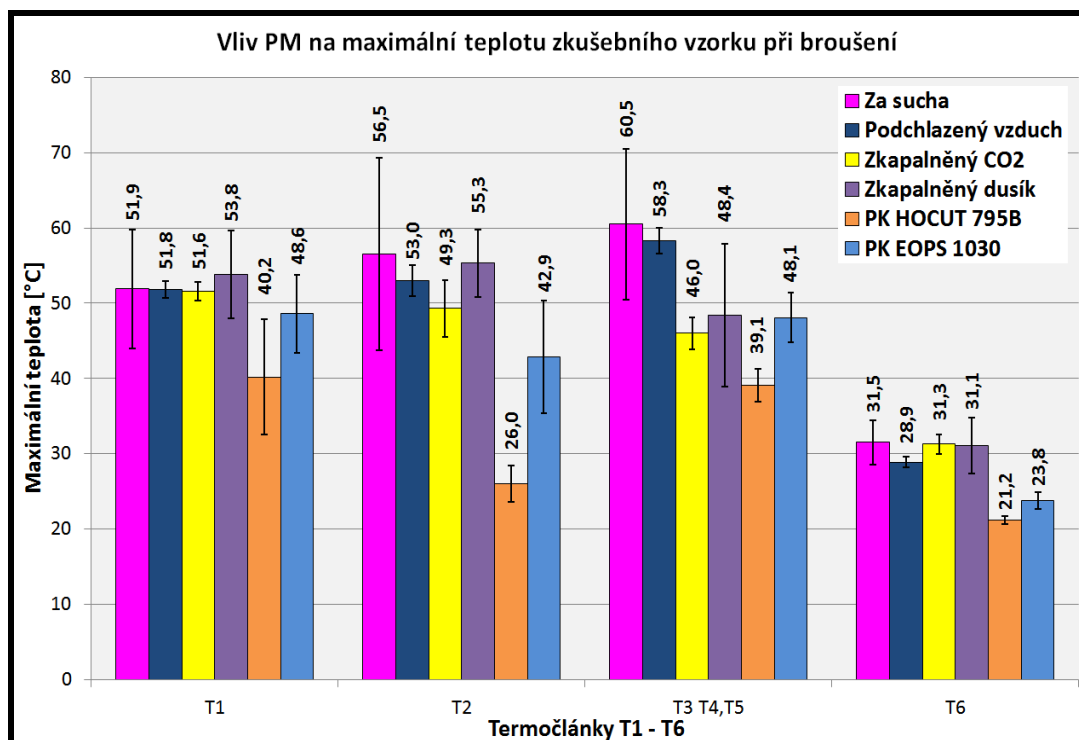
Obr. 4.3 – 4 Vzorový průběh teploty na termočlátku T6 při broušení s PM

Tab. 4.3 – 1 Maximální teploty při broušení za sucha

BROUŠENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA				
Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 T4,T5 [°C]	T6 [°C]
Maximální hodnota T [°C]	51,9	56,5	60,5	31,5
Konfidenční interval [°C]	±7,9	±12,8	±10,0	±3,0
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH				
Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 T4,T5 [°C]	T6 [°C]
Maximální hodnota T [°C]	51,8	53,0	58,3	28,9
Konfidenční interval [°C]	±1,1	±2,1	±1,7	±0,7
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO ₂				
Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 T4,T5 [°C]	T6 [°C]
Maximální hodnota T [°C]	51,6	49,3	46,0	31,3
Konfidenční interval [°C]	±1,2	±3,8	±2,1	±1,3
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK				
Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 T4,T5 [°C]	T6 [°C]
Maximální hodnota T [°C]	53,8	55,3	48,4	31,1
Konfidenční interval [°C]	±5,8	±4,5	±9,5	±3,7
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795 B				
Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 T4,T5 [°C]	T6 [°C]
Maximální hodnota T [°C]	40,2	26,0	39,1	21,2
Konfidenční interval [°C]	±7,7	±2,4	±2,2	±0,5

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030

Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 T4,T5 [°C]	T6 [°C]
Maximální hodnota T [°C]	48,6	42,9	48,1	23,8
Konfidenční interval [°C]	±5,2	±7,5	±3,3	±1,1



Obr. 4.3 – 5 Maximální teploty při broušení s PM

Z maximálních naměřených teplot v hloubce 1,5mm od broušeného povrchu - termočlánek *T1*, uvedených v tabulce 4.3 – 1 a obrázku 4.3 – 5, vyplývá, že při **broušení za sucha** byla naměřena teplota 51,9°C. Při chlazení **podchlazeným vzduchem** bylo zjištěno mírné snížení teploty o 0,2%. Při chlazení **zkapalněným CO₂** bylo zjištěno mírné snížení teploty o 0,6%. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** byla zjištěna vyšší teplota a to o 3,7%. Při chlazení **PK HOCUT 795B** bylo zjištěno největšího snížení teploty o 22,5%. Při chlazení **PK EOPS 1030** bylo zjištěno snížení teploty o 6,4%.

Z maximálních naměřených teplot v hloubce 1,0mm od broušeného povrchu - termočlánek *T2*, uvedených v tabulce 4.3 – 1 a obrázku 4.3 – 5, vyplývá, že při **broušení za sucha** byla naměřena teplota 56,5°C. Při chlazení **podchlazeným vzduchem** bylo zjištěno mírné snížení teploty o 6,2%. Při chlazení **zkapalněným CO₂** bylo zjištěno snížení teploty o 12,7%. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** bylo zjištěno snížení teploty o 2,1%. Při chlazení **PK HOCUT 795B** bylo zjištěno největší snížení teploty o 54,0%. Při chlazení **PK EOPS 1030** bylo zjištěno snížení teploty o 24,1%.

Z maximálních naměřených teplot v hloubce 0,5mm od broušeného povrchu - termočlánek *T3*, *T4* a *T5*, uvedených v tabulce 4.3 – 1 a obrázku 4.3 – 5, vyplývá,

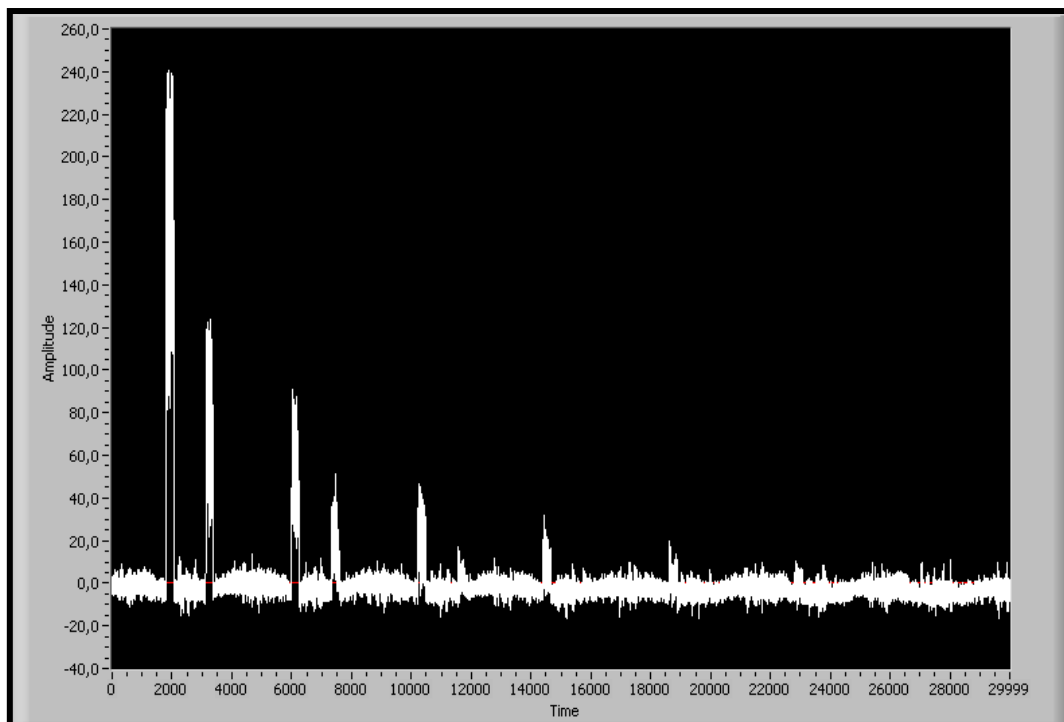
že při **broušení za sucha** byla naměřena maximální teplota 60,5°C. Při chlazení **podchlazeným vzduchem** bylo zjištěno mírného snížení teploty o 3,6%. Při chlazení **zkapalněným CO₂** bylo zjištěno snížení teploty o 24,0%. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** bylo zjištěno snížení teploty o 20,0%. Při chlazení PK **HOCUT 795B** bylo zjištěno největší snížení teploty o 35,4%. Při chlazení PK **EOPS 1030** bylo zjištěno snížení teploty o 20,5%.

Z maximálních naměřených teplot na povrchu zkušebního vzorku - termočlánků *T6*, uvedených v tabulce 4.3 – 1 a obrázku 4.3 – 5, vyplývá, že při **broušení za sucha** byla naměřena maximální teplota 31,5°C. Při chlazení **podchlazeným vzduchem** bylo zjištěno snížení teploty o 8,3%. Při chlazení **zkapalněným CO₂** bylo zjištěno mírné snížení teploty o 0,6%. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** bylo zjištěno mírné snížení teploty o 1,3%. Při chlazení PK **HOCUT 795B** bylo zjištěno největší snížení teploty o 32,7%. Při chlazení PK **EOPS 1030** bylo zjištěno snížení teploty o 24,4%.

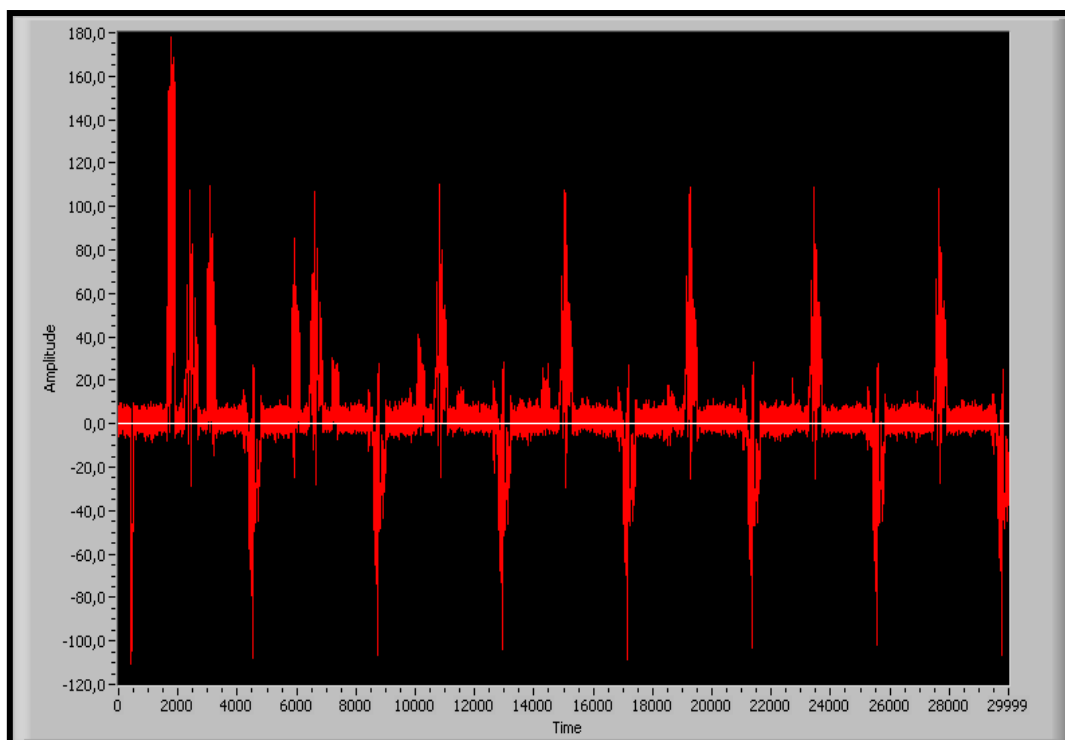
Shrnutí poznatků a výsledků z měření teplot při soustružení je rozebráno v kapitole 5.2. Naměřené hodnoty jednotlivých dílčích měření pro jednotlivá PM jsou uvedeny v příloze č. 2 - str. X.

4.3.2 Působící síly

Popis měření působících sil je uveden v kapitole 4.1.3. Vzorový záznam průběhu působících sil při broušení pro jednotlivá PM je uveden na obrázku 4.2 – 6 a 4.2 – 7. Naměřené kolmé řezné síly $F_c=F_z$, posuvové síly $F_f=F_x$ pro jednotlivá PM jsou uvedeny v tabulce 4.2 – 2 a na obrázku 4.2 - 8.



Obr. 4.3 – 6 Vzorový průběh kolmé síly F_z při broušení s PM

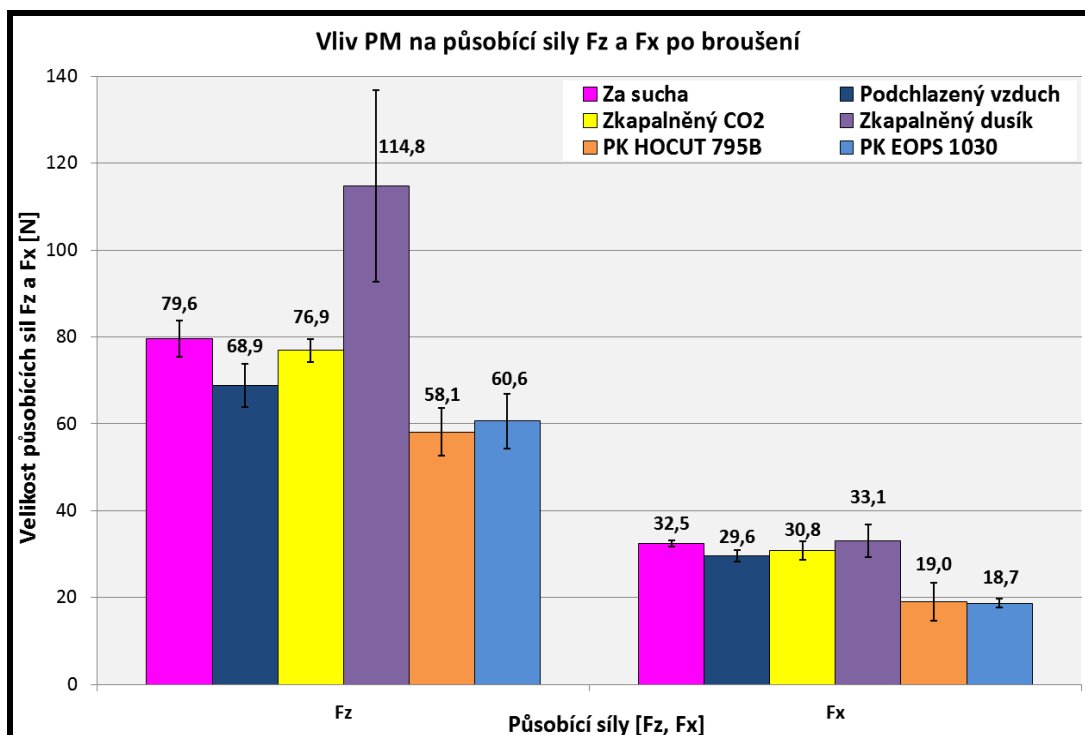


Obr. 4.3 – 7 Vzorový průběh posuvové síly F_x při broušení s PM

Tab. 4.3 – 2 Působící síly při broušení za rozličných s PM

BROUŠENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA							
číslo piku	1	2	3	4	5	6	7
F_{zmax}	256,2	123,6	93,2	44,0	49,4	17,6	28,2
Konfidenční interval F_{zmax}	±11,8	±8,1	±9,0	±10,0	±7,4	±2,1	±6,8
číslo piku	8	9	10	11	12	13	14
F_{zmax}	10,8	22,8	7,4	15,0	6,2	11,6	5,0
Konfidenční interval F_{zmax}	±2,1	±6,1	±1,2	±1,7	±0,6	±1,6	±1,0
Průměrná hodnota F (software LabVIEW)					F_x [N]	F_z [N]	
F z 6 piku					32,5	79,6	
Konfidenční interval [N]					±0,7	±4,1	
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH							
číslo piku	1	2	3	4	5	6	7
F_{zmax}	232,2	114,6	76,0	27,8	35,2	12,6	19,4
Konfidenční interval F_{zmax}	±17,7	±16,4	±4,7	±2,3	±6,2	±3,0	±4,0
číslo piku	8	9	10	11	12	13	14
F_{zmax}	6,6	12,8	5,8	9,0	3,6	5,2	2,4
Konfidenční interval F_{zmax}	±2,1	±4,7	±1,2	±2,9	±0,8	±1,2	±0,8
Průměrná hodnota F , ΔF (software LabVIEW)					F_x [N]	F_z [N]	
F z 6 piku					29,6	68,9	
Konfidenční interval [N]					±1,3	±5,0	

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO₂							
číslo piku	1	2	3	4	5	6	7
F_{zmax}	255,4	146,4	80,8	29,0	30,8	12,8	23,2
Konfidenční interval F_{zmax}	±11,1	±14,1	±10,2	±6,4	±10,0	±4,4	±5,8
číslo piku	8	9	10	11	12	13	14
F_{zmax}	7,0	15,2	4,8	7,8	4,2	4,2	1,8
Konfidenční interval F_{zmax}	±2,6	±5,8	±2,3	±2,3	±1,8	±1,8	±1,2
Průměrná hodnota F , ΔF (software LabVIEW)					F_x [N]	F_z [N]	
F z 6 piku					30,8	76,9	
Konfidenční interval [N]					±2,1	±2,6	
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK							
číslo piku	1	2	3	4	5	6	7
F_{zmax}	323,4	226,2	133,4	82,6	62,0	32,6	33,4
Konfidenční interval F_{zmax}	±34,4	±67,3	±44,6	±32,6	±12,7	±4,2	±12,0
číslo piku	8	9	10	11	12	13	14
F_{zmax}	22,4	18,6	11,6	12,0	7,6	7,0	4,6
Konfidenční interval F_{zmax}	±12,2	±6,1	±4,9	±7,3	±3,3	±3,5	±2,1
Průměrná hodnota F , ΔF (software LabVIEW)					F_x [N]	F_z [N]	
F z 6 piku					33,1	114,8	
Konfidenční interval [N]					±3,8	±22,1	
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795 B							
číslo piku	1	2	3	4	5	6	7
F_{zmax}	252,6	101,8	39,2	15,4	15,2	8,6	11,6
Konfidenční interval F_{zmax}	±16,6	±4,5	±6,1	±5,3	±2,3	±2,5	±2,9
číslo piku	8	9	10	11	12	13	14
F_{zmax}	7,2	8,2	5,0	6,4	4,8	5,6	3,8
Konfidenční interval F_{zmax}	±2,3	±2,5	±1,0	±0,8	±2,5	±0,8	±1,5
Průměrná hodnota F , ΔF (software LabVIEW)					F_x [N]	F_z [N]	
F z 6 piku					19,0	58,1	
Konfidenční interval [N]					±4,3	±5,5	
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030							
číslo piku	1	2	3	4	5	6	7
F_{zmax}	246,6	104,6	54,6	20,4	17,8	12,0	12,8
Konfidenční interval F_{zmax}	±14,3	±15,8	±10,7	±7,0	±4,2	±1,0	±4,2
číslo piku	8	9	10	11	12	13	14
F_{zmax}	7,2	8,6	5,6	7,2	5,2	5,0	2,6
Konfidenční interval F_{zmax}	±1,8	±2,3	±2,1	±1,2	±1,2	±3,1	±1,6
Průměrná hodnota F , ΔF (software LabVIEW)					F_x [N]	F_z [N]	
F z 6 piku					18,7	60,6	
Konfidenční interval [N]					±1,0	±6,3	



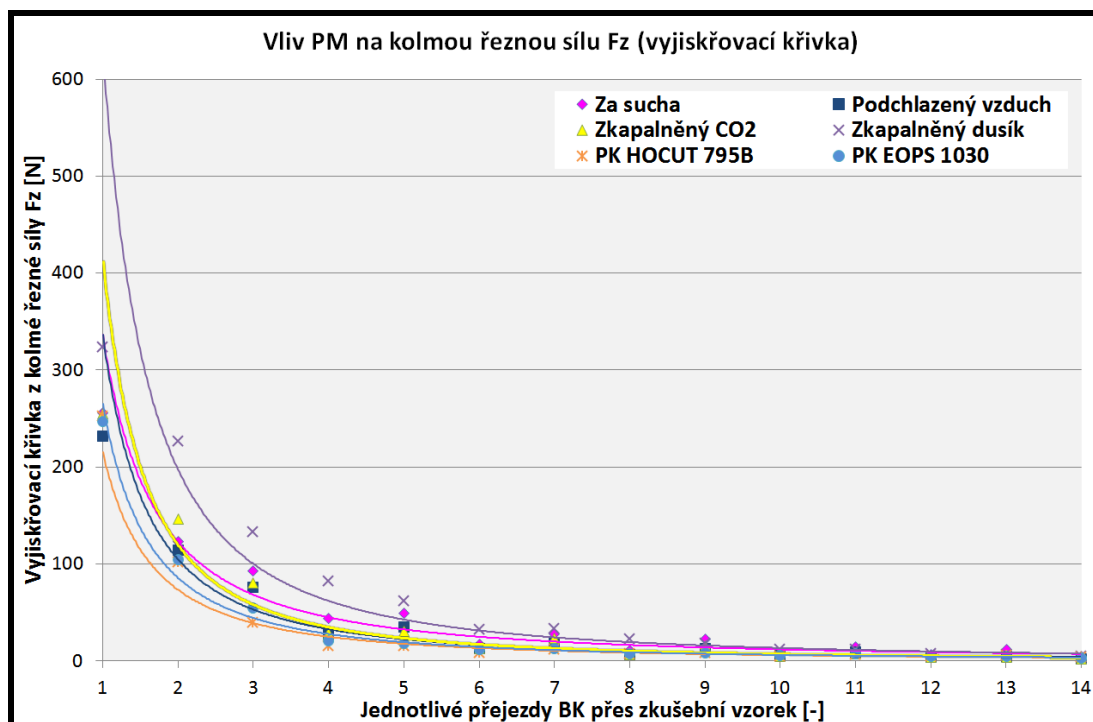
Obr. 4.3 – 8 Hodnoty složek působících sil při broušení s PM

Z naměřených působících sil pro jednotlivá PM, uvedených na obrázku 4.2 – 8 a v tabulce 4.2 – 2, vyplývá, že při **broušení za sucha** byla naměřena posuvová síla F_x 32,50N a kolmá řezná síla F_z 79,6N. Při chlazení **podchlazeným vzduchem** bylo zjištěno snížení posuvové síly F_x o 10,0% a řezné síly F_z o 13,4%. Při chlazení **zkapalněným CO₂** bylo zjištěno snížení posuvové síly F_x o 5,2% a kolmé řezné síly F_z o 3,4%. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** byla zjištěna vyšší posuvová síla F_x o 1,8% a vyšší kolmá řezná síla F_z o 44,2%. Při chlazení **PK HOCUT 795B** bylo zjištěno snížení posuvové síly F_x o 41,5% a kolmá řezná síla F_z o 27%. Při chlazení **PK EOPS 1030** byla zjištěna nižší posuvová síla F_x o 42,5% a kolmá řezná síla F_z o 23,9%.

Shrnutí poznatků a výsledků z experimentů je rozebráno v kapitole 5.2. Hodnoty dílčích výsledků dosažených při experimentech jsou uvedeny v příloze č. 2 - str. XII.

4.3.3 Trvanlivost řezného nástroje

Popis měření je uveden v kapitole 4.1.4. Působící síly jsou uvedeny v tabulce 4.3 – 2. Vyjiskřovací křivky jsou uvedeny na obrázku 4.3 – 9.



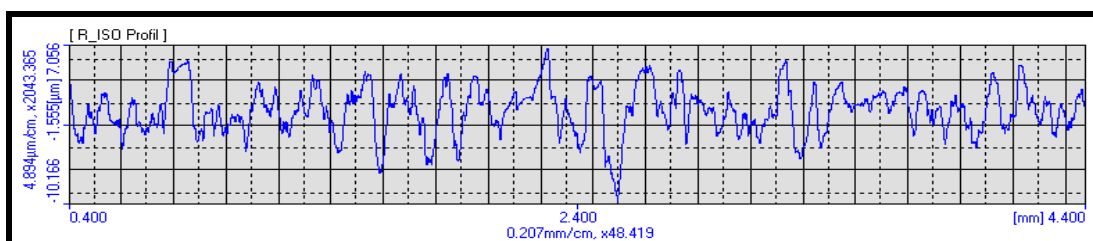
Obr. 4.3 – 9 Vyjiskřovací křivky při broušení s PM

Z vytvořených vyjiskřovacích křivek pro jednotlivá PM, uvedených na obrázku 4.2 – 9, vyplývá vzestupné hodnocení jednotlivých PM. Vyjiskřovací křivka při **broušení za sucha** byla vzata jako referenční. Při chlazení **podchlazeným vzduchem** byl zjištěn nižší průběh vyjiskřovací křivky. Při chlazení **zkapalněným CO₂** byl zjištěn vyšší průběh vyjiskřovací křivky. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** byl zjištěn vyšší průběh vyjiskřovací křivky. Při chlazení PK **HOCUT 795B** byl zjištěn nejnižší průběh vyjiskřovací křivky. Při chlazení PK **EOPS 1030** byl zjištěn nižší průběh vyjiskřovací křivky.

Shrnutí poznatků a výsledků z experimentů je rozebráno v kapitole 5.2. Hodnoty dílčích výsledků dosažených při experimentech jsou uvedeny v příloze č. 2 - str. XII.

4.3.4 Drsnost povrchu

Popis měření je uveden v kapitole 4.1.5. Vzorový záznam profilu drsnosti po broušení pro jednotlivá PM je uveden na obrázku 4.3 – 10. Naměřené parametry drsnosti povrchu R_a , R_z , R_t zkušebních vzorků pro jednotlivá PM jsou uvedeny v tabulce 4.3 – 3 a na obrázku 4.3 – 11.



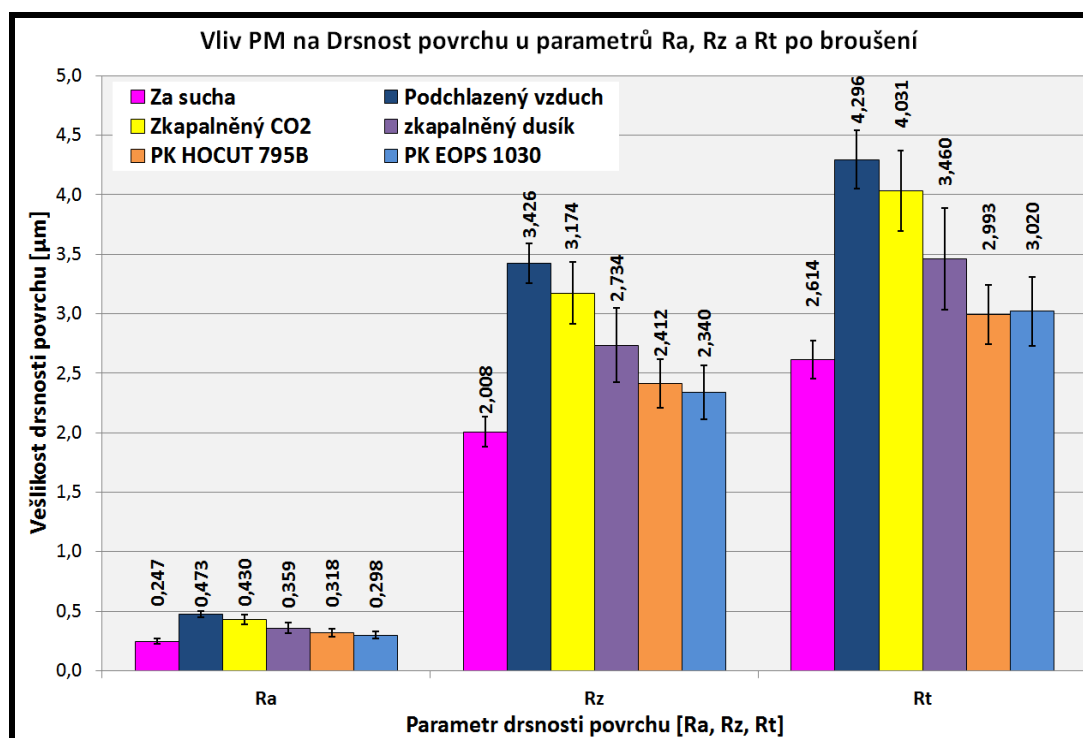
Obr. 4.2 - 10 Záznam měřeného profilu broušeného povrchu s PM

Tab. 4.3 – 3 Drsnosti povrchu po broušení s PM

BROUŠENÍ BEZ CHLAZENÍ - ZA SUCHA						
Drsnost povrchu	Ra [μm]	Konfid. interval Ra [μm]	Rz [μm]	Konfid. interval Rz [μm]	Rt [μm]	Konfid. interval Rt [μm]
Začátek vzorku	0,249	$\pm 0,089$	2,074	$\pm 0,454$	2,736	$\pm 0,540$
Střed vzorku	0,250	$\pm 0,073$	2,004	$\pm 0,377$	2,518	$\pm 0,365$
Konec vzorku	0,243	$\pm 0,058$	1,946	$\pm 0,291$	2,588	$\pm 0,426$
Průměrná hodnota	0,247	$\pm 0,024$	2,008	$\pm 0,129$	2,614	$\pm 0,160$
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH						
Drsnost povrchu	Ra [μm]	Konfid. interval Ra [μm]	Rz [μm]	Konfid. interval Rz [μm]	Rt [μm]	Konfid. interval Rt [μm]
Začátek vzorku	0,475	$\pm 0,039$	3,393	$\pm 0,294$	4,269	$\pm 0,478$
Střed vzorku	0,507	$\pm 0,056$	3,677	$\pm 0,238$	4,503	$\pm 0,537$
Konec vzorku	0,438	$\pm 0,075$	3,208	$\pm 0,395$	4,115	$\pm 0,724$
Průměrná hodnota	0,473	$\pm 0,028$	3,426	$\pm 0,166$	4,296	$\pm 0,244$
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO₂						
Drsnost povrchu	Ra [μm]	Konfid. interval Ra [μm]	Rz [μm]	Konfid. interval Rz [μm]	Rt [μm]	Konfid. interval Rt [μm]
Začátek vzorku	0,424	$\pm 0,114$	3,136	$\pm 0,852$	3,974	$\pm 1,094$
Střed vzorku	0,448	$\pm 0,114$	3,258	$\pm 0,601$	4,118	$\pm 0,703$
Konec vzorku	0,417	$\pm 0,084$	3,127	$\pm 0,515$	4,000	$\pm 0,784$
Průměrná hodnota	0,430	$\pm 0,041$	3,174	$\pm 0,259$	4,031	$\pm 0,337$
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK						
Drsnost povrchu	Ra [μm]	Konfid. interval Ra [μm]	Rz [μm]	Konfid. interval Rz [μm]	Rt [μm]	Konfid. interval Rt [μm]
Začátek vzorku	0,358	$\pm 0,111$	2,711	$\pm 0,829$	3,343	$\pm 0,843$
Střed vzorku	0,382	$\pm 0,127$	2,897	$\pm 0,865$	3,801	$\pm 1,310$
Konec vzorku	0,336	$\pm 0,089$	2,593	$\pm 0,674$	3,235	$\pm 0,955$
Průměrná hodnota	0,359	$\pm 0,044$	2,734	$\pm 0,312$	3,460	$\pm 0,429$
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795 B						
Drsnost povrchu	Ra [μm]	Konfid. interval Ra [μm]	Rz [μm]	Konfid. interval Rz [μm]	Rt [μm]	Konfid. interval Rt [μm]
Začátek vzorku	0,313	$\pm 0,030$	2,342	$\pm 0,210$	2,991	$\pm 0,438$
Střed vzorku	0,370	$\pm 0,046$	2,792	$\pm 0,322$	3,384	$\pm 0,392$
Konec vzorku	0,271	$\pm 0,067$	2,104	$\pm 0,354$	2,604	$\pm 0,436$
Průměrná hodnota	0,318	$\pm 0,031$	2,412	$\pm 0,205$	2,993	$\pm 0,249$

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030

Drsnost povrchu	Ra [μm]	Konfid. interval Ra [μm]	Rz [μm]	Konfid. interval Rz [μm]	Rt [μm]	Konfid. interval Rt [μm]
Začátek vzorku	0,277	$\pm 0,069$	2,114	$\pm 0,479$	2,725	$\pm 0,666$
Střed vzorku	0,360	$\pm 0,040$	2,781	$\pm 0,291$	3,526	$\pm 0,466$
Konec vzorku	0,259	$\pm 0,026$	2,094	$\pm 0,191$	2,808	$\pm 0,382$
Průměrná hodnota	0,298	$\pm 0,032$	2,340	$\pm 0,227$	3,020	$\pm 0,291$



Obr. 4.3 – 11 Drsnosti povrchu po broušení s PM

Z naměřených parametrů drsnosti povrchu R_a , R_z a R_t pro jednotlivá PM uvedených na obrázku 4.3 – 11 a v tabulce 4.3 – 3, vyplývá, že po **broušení za sucha** byl naměřen parametr R_a 0,247 μm , u parametru R_z 2,008 μm a u parametru R_t 2,614 μm . Po chlazení **podchlazeným vzduchem** byl zjištěn nejvyšší nárůst parametru R_a o 91,5%, u parametru R_z o 70,6% a u parametru R_t o 64,3%. Po chlazení **zkapalněným CO₂** bylo zjištěno zvýšení parametru R_a o 74,1%, u parametru R_z o 58,1% a u parametru R_t o 54,2%. Po chlazení **zkapalněným dusíkem** bylo zjištěno zvýšení parametru R_a o 45,3%, u parametru R_z o 36,2% a u parametru R_t o 32,4%. Po chlazení PK **HOCUT 795B** bylo zjištěno zvýšení parametru R_a o 28,7%, u parametru R_z o 20,1% a u parametru R_t o 14,5%. Po chlazení PK **EOPS 1030** bylo zjištěno snížení parametru R_a o 20,6%, u parametru R_z 16,5% a u parametru R_t o 15,5%.

Shrnutí poznatků a výsledků z experimentů je rozebráno kapitole 5.2. Hodnoty jednotlivých dílčích měření pro jednotlivá PM jsou uvedeny v příloze č. 2 - str. XV.

4.3.5 Rozměrová přesnost

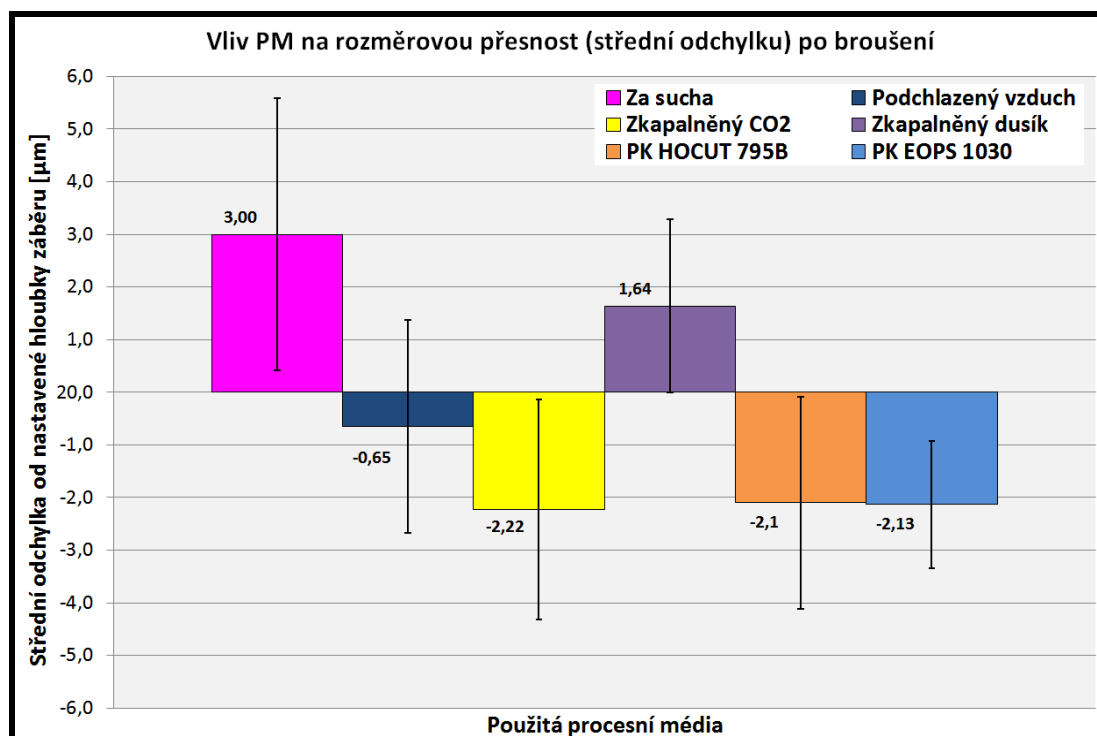
Popis měření je uveden v kapitole 4.1.6. Naměřené střední odchylky rozměru (hloubky záběru) pro jednotlivá PM jsou uvedeny v tabulce 4.3 – 4 a na obrázku 4.3 – 12.

Tab. 4.3–4 Odchylky hloubky záběru po broušení s PM

BROUŠENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA		
Měřený parametr	Odchylka rozměru [mm]	Konfidenční interval [mm]
Začátek vzorku	5,63	±9,85
Střed vzorku	1,25	±2,86
Konec vzorku	3,00	±5,86
Střední hodnota	3,00	±2,58
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH		
Měřený parametr	Odchylka rozměru [mm]	Konfidenční interval [mm]
Začátek vzorku	0,38	±5,27
Střed vzorku	-2,00	±6,67
Konec vzorku	1,38	±8,86
Střední hodnota	-0,65	2,02
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO₂		
Měřený parametr	Odchylka rozměru [mm]	Konfidenční interval [mm]
Začátek vzorku	0,00	±8,75
Střed vzorku	-2,12	±6,93
Konec vzorku	-4,13	±6,81
Střední hodnota	-2,22	±2,09
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK		
Měřený parametr	Odchylka rozměru [mm]	Konfidenční interval [mm]
Začátek vzorku	-0,33	±9,77
Střed vzorku	1,88	±4,33
Konec vzorku	1,75	±6,98
Střední hodnota	1,64	±1,64
BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795 B		
Měřený parametr	Odchylka rozměru [mm]	Konfidenční interval [mm]
Začátek vzorku	-1,13	±5,78
Střed vzorku	-3,25	±7,14
Konec vzorku	-0,25	±5,64
Střední hodnota	-2,10	±2,01

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030

Měřený parametr	Odchylka rozměru [mm]	Konfidenční interval [mm]
Začátek vzorku	1,50	±7,65
Střed vzorku	-1,25	±0,92
Konec vzorku	-2,25	±4,28
<i>Střední hodnota</i>	<i>-2,13</i>	<i>±1,21</i>



Obr. 4.3 – 12 Střední odchylky hloubky záběru po broušení s PM

Ze zjištěných středních odchylek hloubky záběru BK pro jednotlivá PM, uvedených na obrázku 4.3 – 12 a v tabulce 4.2 – 4, vyplývá, že po **broušení za sucha** byla naměřena odchylka 3,00µm od hloubky záběru 20µm (0,02mm) nastavené na stroji, bylo odebráno více materiálu. Po chlazení **podchlazeným vzduchem** byla naměřena odchylka -0,65 µm od hloubky záběru, bylo odebráno méně materiálu. Po chlazení **zkapalněným CO₂** byla naměřena odchylka -2,22µm od hloubky záběru, bylo odebráno méně materiálu. Po chlazení **zkapalněným dusíkem** byla naměřena odchylka 1,64µm od hloubky záběru, bylo odebráno více materiálu. Po chlazení PK **HOCUT 795B** byla naměřena odchylka -2,10µm od hloubky záběru, bylo odebráno méně materiálu. Po chlazení PK **EOPS 1030** byla naměřena odchylka -2,13µm od hloubky záběru, bylo odebráno méně materiálu.

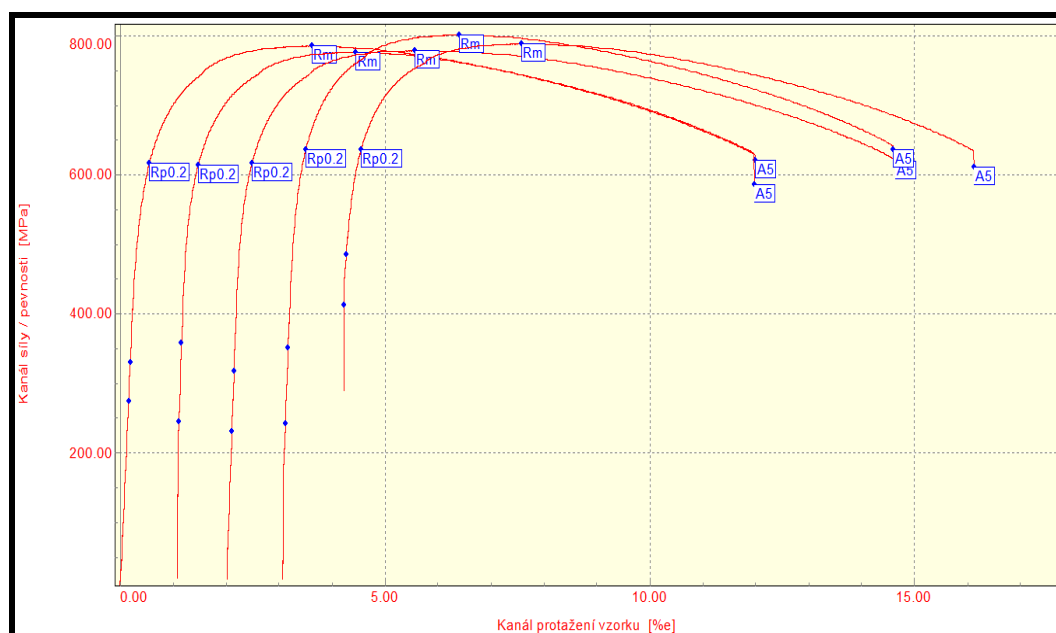
Shrnutí poznatků a výsledků z experimentů je rozebráno v kapitole 5.2. Hodnoty jednotlivých dílčích měření rozměrové přesnosti jsou uvedeny v příloze č. 2 - str. XVI.

4.4 Mechanické zkoušky – dosažené výsledky

Experimenty byly realizovány dle metodiky v kapitole 4.1. Metodika obsahuje stanovené proměnné, hodnocené parametry a popis vyhodnocení.

4.4.1 Mechanická zkouška tahem

Popis měření je uveden v metodice v kapitole 4.1.6. Vzorový záznam průběhu tahové zkoušky je znázorněn na obrázku 4.4 – 1. Naměřené jednotlivé parametry, pro jednotlivá PM, jsou uvedeny pro meze pevnosti R_m a smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ na obrázku 4.4 – 2, pro tažnost A_5 a plastické prodloužení A_g na obrázku 4.4 – 2 a uvedeny v tabulce 4.4 – 1.

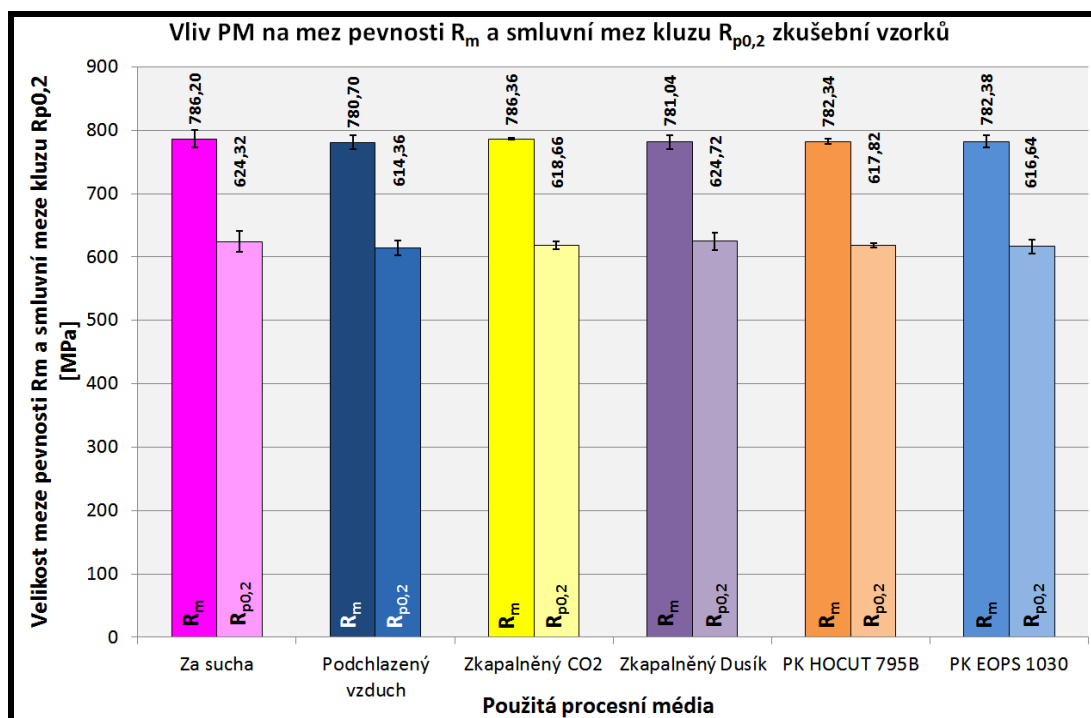


Obr. 4.4 – 1 Záznamy tahových zkoušek u vzorků obrobených za sucha

Tab. 4.4 – 1 Tahové zkoušky obrobených vzorků s PM

TAKOVÁ ZKOUŠKA – ZA SUCHA				
Měřený parametr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_5 [%]
Výsledná hodnota	624,32	786,20	3,13	11,56
Konfidenční interval	±16,32	±13,55	±0,10	±0,84
TAKOVÁ ZKOUŠKA – PODCHLAZENÝ VZDUCH				
Měřený parametr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_5 [%]
Výsledná hodnota	614,36	780,70	3,05	11,12
Konfidenční interval	±11,74	±11,1	±0,09	±0,36
TAKOVÁ ZKOUŠKA – ZKAPALNĚNÝ CO ₂				
Měřený parametr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_5 [%]
Výsledná hodnota	618,66	786,36	3,20	11,33
Konfidenční interval	±6,14	±1,83	±0,18	±0,34

TAKOVÁ ZKOUŠKA – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK				
Měřený parametr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_5 [%]
Výsledná hodnota	624,72	781,04	2,87	10,87
Konfidenční interval	±13,67	±11,41	±0,58	±1,36
TAKOVÁ ZKOUŠKA – PK HOCUT 795 B				
Měřený parametr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_5 [%]
Výsledná hodnota	617,82	782,34	3,23	11,86
Konfidenční interval	±3,40	±4,62	±0,03	±0,60
TAKOVÁ ZKOUŠKA – PK EOPS 1030				
Měřený parametr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_5 [%]
Výsledná hodnota	616,64	782,38	3,02	11,16
Konfidenční interval	±11,10	±9,31	±0,04	±0,14

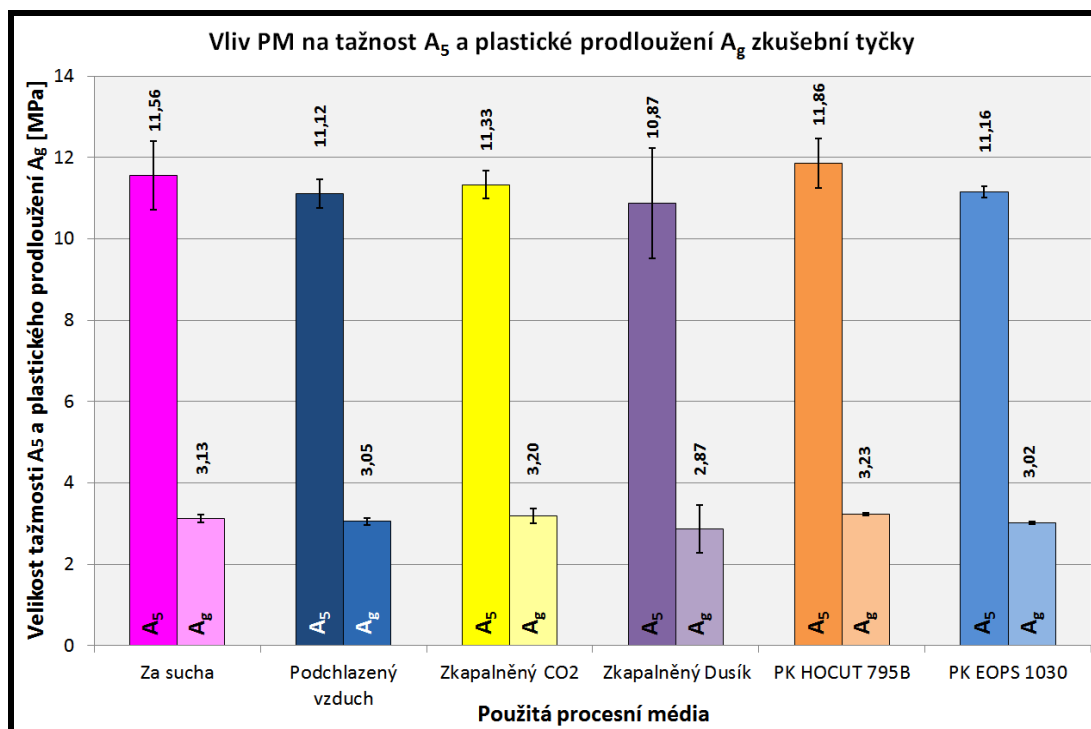


Obr. 4.4 – 2 Porovnání meze pevnosti R_m a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$

Z naměřených mezí pevnosti R_m a smluvních mezí kluzu $R_{p0,2}$ pro jednotlivá PM, uvedených na obrázku 4.4 – 2 a v tabulce 4.4 – 1, vyplývá, že při **soustružení za sucha** byla zjištěna mez pevnosti R_m 786,20MPa a smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ 624,32MPa. Při chlazení **podchlazeným vzduchem** byla zjištěna nižší mez pevnosti R_m o 0,7% a nižší smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ o 1,6%. Při chlazení **zkapalněným CO₂** byla zjištěna stejná velikost meze pevnosti R_m , ale nižší smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ o 0,9%. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** byla zjištěna nižší mez pevnosti R_m o 0,7%, ale stejná smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. Při chlazení PK **HOCUT 795B** byla zjištěna nižší mez pevnosti R_m o 0,5% a nižší smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$

o 1,0%. Při chlazení PK **EOPS 1030** byla zjištěna nižší mez pevnosti R_m o 0,5% a smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ o 1,2%.

Shrnutí poznatků a výsledků z experimentů je rozebráno v kapitole 5.3. Hodnoty dílčích výsledků dosažených při experimentech jsou uvedeny v příloze č. 3 - str. XVIII.



Obr. 4.4 – 3 Hodnoty A_5 a A_g z mechanické zkoušky tahem

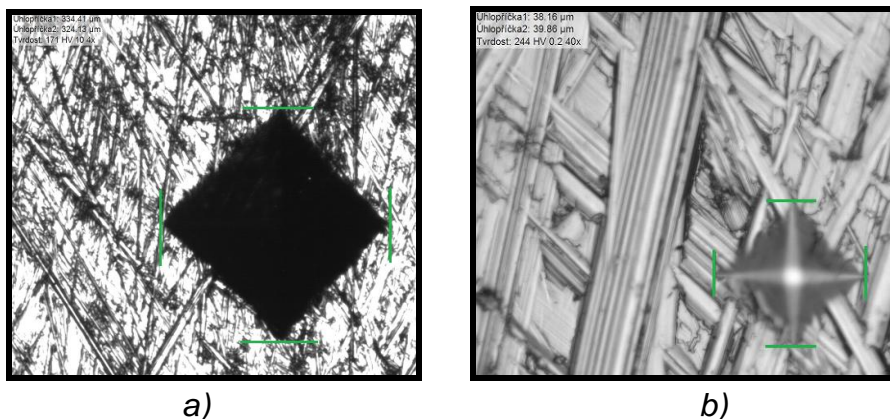
Z naměřených tažností A_5 a plastických prodloužení A_g pro jednotlivá PM, uvedených na obrázku 4.4 – 3 a v tabulce 4.4 – 1, vyplývá, že při **soustružení za sucha** byla zjištěna tažnost A_5 11,56% a plastické prodloužení A_g 3,13%. Při chlazení **podchlazeným vzduchem** byla zjištěna nižší tažnost A_5 o 3,8% a plastické prodloužení A_g o 2,6%. Při chlazení **zkapalněným CO₂** byla zjištěna nižší tažnost A_5 o 2,0%, ale vyšší plastické prodloužení A_g o 2,2%. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** byla zjištěna nižší tažnost A_5 o 6,0% a nižší plastické prodloužení A_g o 8,3%. Při chlazení PK **HOCUT 795B** byla zjištěna vyšší tažnost A_5 o 2,6% a plastické prodloužení A_g o 3,2%. Při chlazení PK **EOPS 1030** byla zjištěna nižší tažnost A_5 o 3,5% a plastické prodloužení A_g o 3,5%.

Shrnutí poznatků a výsledků z experimentů je rozebráno v kapitole 5.3. Hodnoty dílčích výsledků dosažených při experimentech jsou uvedeny v příloze č. 3 - str. XVIII.

4.4.2 Zkouška tvrdosti a mikrotvrdosti

Popis měření je uveden v kapitole 4.1.6. Vzorový záznam vtisku ze zkoušky tvrdosti je znázorněn na obrázku 4.4 – 4a a ze zkoušky mikrotvrdosti na obrázku

4.4 – 4b. Naměřené tvrdosti pro jednotlivá PM jsou uvedeny v tabulce 4.4 – 2 a na obrázku 4.4 – 5, u zkoušky mikrotvrdomosti v tabulce 4.4 - 3 a na obrázku 4.4 – 6.

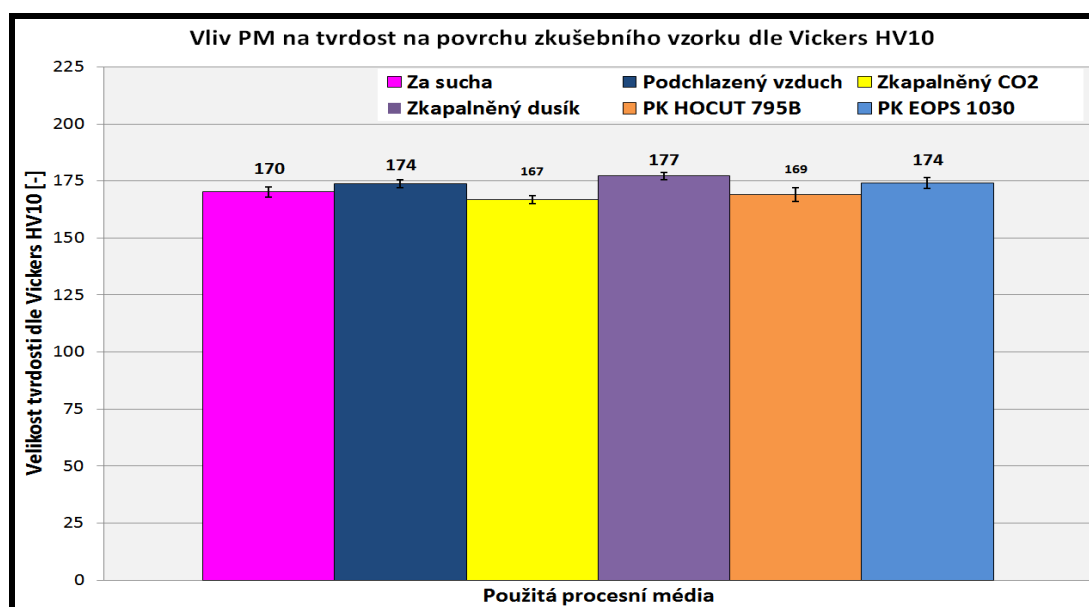


Obr. 4.4 – 4 Záznam měření tvrdosti a mikrotvrdomosti; a) tvrdost HV10; b) mikrotvrdomost HV0.2

Zkouška tvrdosti

Tab. 4.4 – 2 Tvrdosti HV10 broušených vzorků s PM

PM	ZA SUCHA	PODCHLA -ZENÝ VZDUCH	ZKAPAL -NĚNÝ CO ₂	ZKAPAL -NĚNÝ DUSÍK	PK HOCUT 795B	PK EOPS 1030
Průměrná tvrdost HV10[-]	170	174	167	177	174	169
Konfidenční interval [-]	±2,3	±1,7	±1,7	±1,7	±3,1	±2,4



Obr. 4.4 – 5 Tvrdosti HV10 broušeného vzorku

Z naměřených tvrdostí HV10 na broušeném povrchu zkušební vzorků pro jednotlivá PM uvedených na obrázku 4.4 – 5 a v tabulce 4.4 – 2, vyplývá,

že po **broušení za sucha** byla zjištěna na broušeném povrchu tvrdost 170,0 HV10. Po chlazení **podchlazeným vzduchem** byla zjištěna vyšší tvrdost o 2,4%. Po chlazení **zkapalněným CO₂** byla zjištěna nižší tvrdost o 1,8%. Po chlazení **zkapalněným dusíkem** byla zjištěna vyšší tvrdost o 4,0%. Po chlazení PK **HOCUT 795B** byla zjištěna nižší tvrdost o 0,6%. Po chlazení PK **EOPS 1030** byla zjištěna vyšší tvrdost o 2,4%.

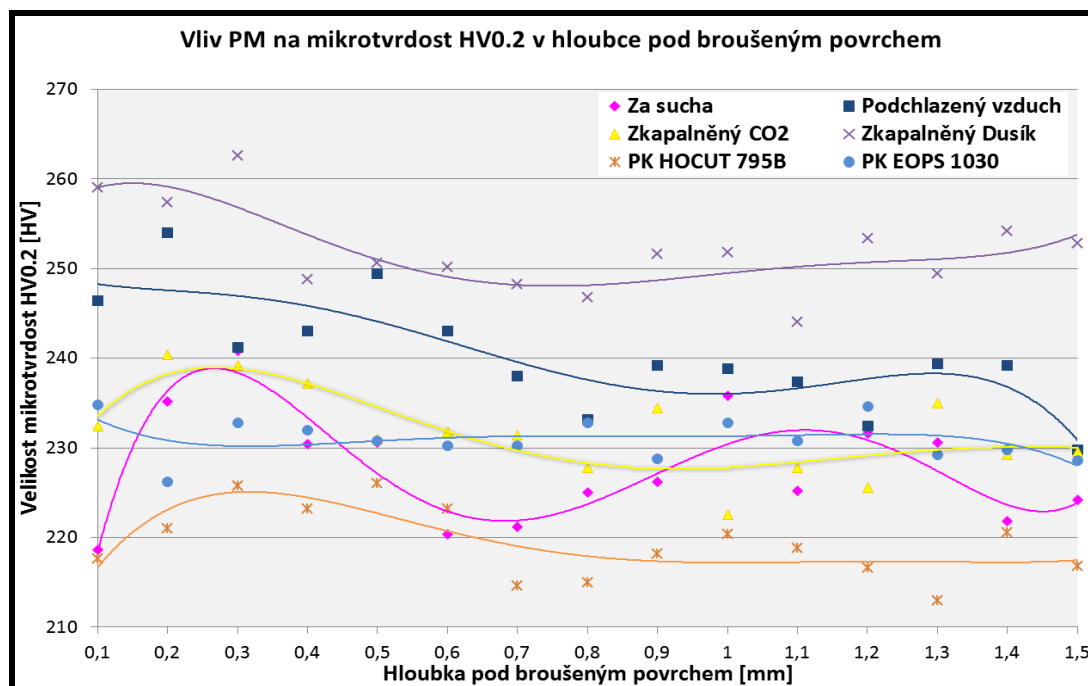
Shrnutí poznatků a výsledků z experimentů je rozebráno v kapitole 5.3. Hodnoty jednotlivých dílčích měření rozměrové přesnosti jsou uvedeny v příloze č. 3 - str. XXV.

Zkouška mikrotvrdosti

Tab. 4.4 – 3 Mikrotvrdosti broušených vzorků s PM

Mikrotvrdost HV0.2								
ZA SUCHA	Hloubka [mm]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
	Mikrotvrdost [-]	219	235	241	230	231	220	221
	Konfidenční interval	±28	±61	±30	±24	±29	±21	±14
Hloubka [mm]	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Mikrotvrdost [-]	225	226	236	225	232	231	222	224
Konfidenční interval	±21	±33	±18	±15	±13	±14	±10	±11
Průměrná hodnota [-]	241		Konfidenční interval				±30	
PODCHLAZENÝ VZDUCH	Hloubka [mm]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
	Mikrotvrdost [-]	246	254	241	243	249	243	238
	Konfidenční interval	±13	±29	±21	±18	±16	±34	±35
Hloubka [mm]	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Mikrotvrdost [-]	233	239	239	237	232	239	239	230
Konfidenční interval	±19	±37	±24	±33	±43	±21	±33	±27
Průměrná hodnota [-]	254		Konfidenční interval				±29	
ZKAPALNĚNÝ CO₂	Hloubka [mm]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
	Mikrotvrdost [-]	232	240	239	237	231	232	231
	Konfidenční interval	±9	±14	±22	±18	±11	±14	±19
Hloubka [mm]	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Mikrotvrdost [-]	228	234	223	228	226	235	229	230
Konfidenční interval	±20	±8	±19	±14	±19	±5	±25	±13
Průměrná hodnota [-]	240		Konfidenční interval				±14	
ZKAPALNĚNÝ DUSÍK	Hloubka [mm]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
	Mikrotvrdost [-]	259	257	263	249	251	250	248
	Konfidenční interval	±9	±24	±17	±12	±6	±14	±9
Hloubka [mm]	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Mikrotvrdost [-]	247	252	252	244	253	249	254	253
Konfidenční interval	±4	±4	±6	±15	±6	±5	±11	±8
Průměrná hodnota [-]	263		Konfidenční interval				±17	

PK HOCUT 795B	Hloubka [mm]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
	Mikrotvrdość [-]	218	221	226	223	226	223	215
	Konfidenční interval	±22	±20	±2	±17	±13	±12	±6
Hloubka [mm]	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Mikrotvrdość [-]	215	218	220	219	217	213	221	217
Konfidenční interval	±5	±13	±10	±4	±6	±8	±16	±9
Průměrná hodnota [-]	226			Konfidenční interval			±10	
PK EOPS 1030	Hloubka [mm]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
	Mikrotvrdość [-]	235	226	233	232	231	230	230
	Konfidenční interval	±23	±11	±10	±12	±24	±18	±14
Hloubka [mm]	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Mikrotvrdość [-]	233	229	233	231	235	229	230	229
Konfidenční interval	±7	±10	±14	±17	±9	±9	±16	±7
Průměrná hodnota [-]	235			Konfidenční interval			±22	



Obr. 4.4 – 6 Průběh mikrotvrdości HV0.2 pod broušeným povrchem

Ze změřených mikrotvrdości HV0.2 v podpovrchové vrstvě pod broušenou plochou pro jednotlivá PM uvedených v tabulce 4.4 - 3 a z průběhu na obrázku 4.4 – 6, vyplývá, že po **broušení za sucha** byla zjištěna průměrná mikrotvrdość 241,0 HV0.2 v podpovrchové vrstvě do 1,5mm od broušené plochy. Po chlazení **podchlazeným vzduchem** byla zjištěna vyšší mikrotvrdość o 5,4%. Po chlazení **zkapalněným CO₂** byla zjištěna nižší mikrotvrdość o 0,4%. Po chlazení **zkapalněným dusíkem** byla zjištěna vyšší mikrotvrdość o 9,1%. Po chlazení **PK HOCUT 795B** byla zjištěna nižší mikrotvrdość o 6,2%. Po chlazení **PK EOPS 1030** byla zjištěna nižší mikrotvrdość o 2,5%.

Shrnutí poznatků a výsledků z experimentů je rozebráno v kapitole 5.3. Hodnoty jednotlivých dílčích měření rozměrové přesnosti jsou uvedeny v příloze č. 3 - str. XXV.

4.5 Ekonomické a ekologické hledisko - dosažené výsledky

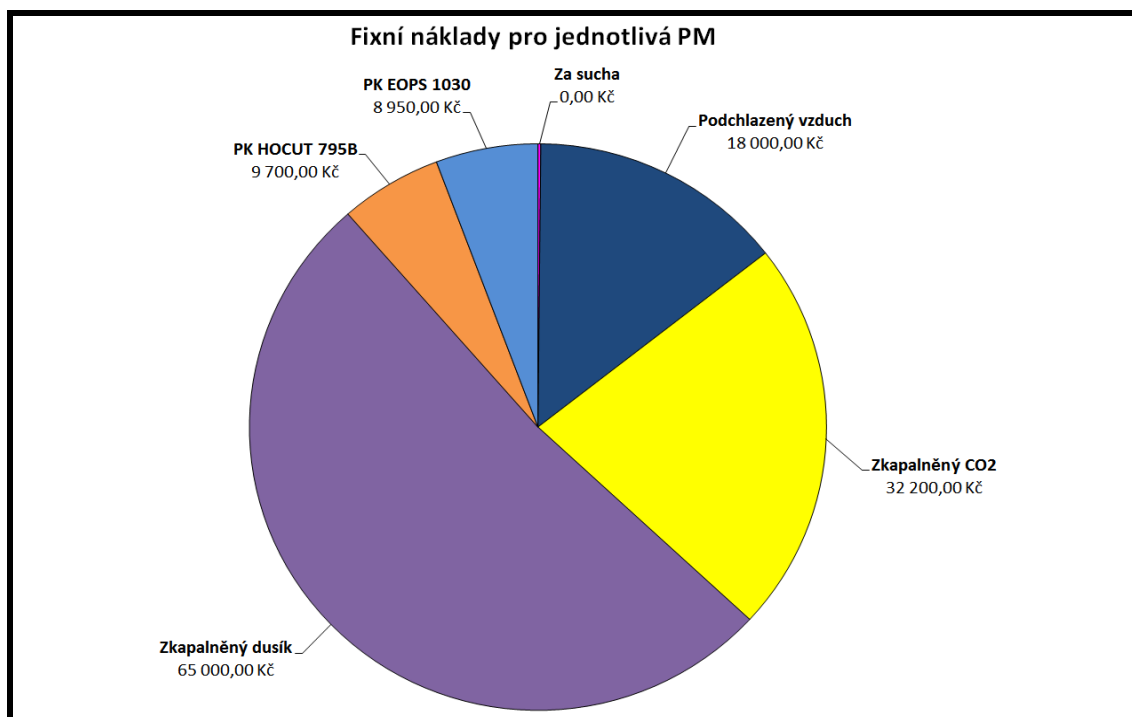
Vyhodnocení vycházelo z potřeb na přivedení PM do a z místa řezu, z realizace experimentů, manipulace s PM a náplněmi, dle kapitoly 4.1 a z dosažených výsledků dle kapitol 4.2 a 4.3.

Fixní náklady

Mezi fixní náklady byly zařazeny pořizovací ceny zařízení a příslušenství potřebné na přivedení PM do a z místa řezu. Fixní náklady jsou uvedeny v tabulce 4.5 – 1 a na obrázku 4.5 – 1.

Tab. 4.5 – 1 Přehled fixních nákladů pro jednotlivá PM

ZA SUCHA	
<i>Při obrábění za sucha nevznikají žádné pořizovací náklady na zařízení či vybavení</i>	
PODCHLAZENÝ VZDUCH	
<i>vírová trubice – Cold Air Gun</i>	11 000 Kč
<i>kompresor – tlakový vzduch</i>	6 000 Kč
<i>příslušenství – hadice, držáky</i>	1 000 Kč
celkové fixní náklady	18 000 Kč
ZKAPALNĚNÝ CO ₂	
<i>plná tlaková láhev 20 kg CO₂</i>	5 200 Kč
<i>řídící jednotka, škrťací ventil, hadice, držáky</i>	20 000 Kč
<i>odsávací zařízení</i>	7 000 Kč
celkové fixní náklady	32 200 Kč
ZKAPALNĚNÝ DUSÍK	
<i>Dewarova nádoba 32 l</i>	25 000 Kč
<i>přečerpávací zařízení, řídící jednotka, hadice, držáky</i>	40 000 Kč
celkové fixní náklady	65 000 Kč
PK HOCUT 795B	
<i>externí zařízení - čerpadlo</i>	5 000 Kč
<i>refraktometr</i>	1200 Kč
<i>příslušenství (hadice, držáky)</i>	1 000 Kč
<i>Koncentrát HOCUT 795B</i>	2500 Kč
celkové fixní náklady	9700 Kč
PK EOPS 1030	
<i>externí zařízení – čerpadlo</i>	5 000 Kč
<i>refraktometr</i>	1200 Kč
<i>příslušenství – hadice, držáky</i>	1 000 Kč
<i>Koncentrát EOPS 1030</i>	1750 Kč
celkové fixní náklady	8950 Kč



Obr. 4.5 – 1 Fixní náklady na jednotlivá PM

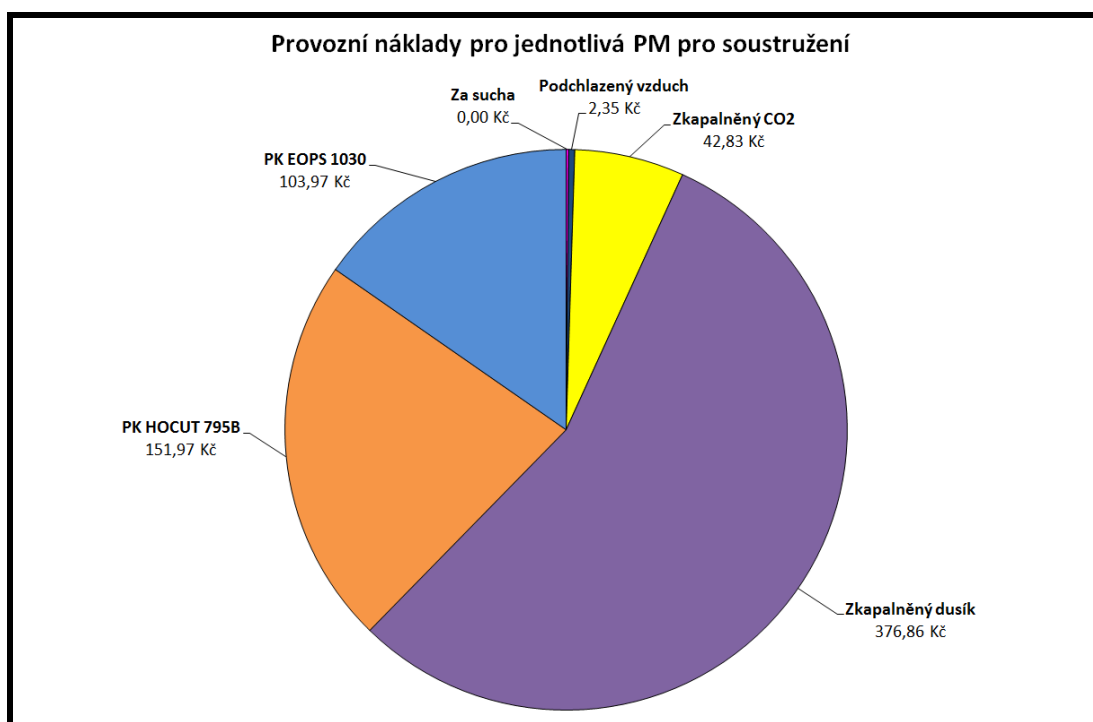
Provozní náklady

Provozní náklady byly finanční částky vycházející z potřebného množství PM na realizaci experimentů u jednotlivých technologií obrábění, ceny energií. Provozní náklady při soustružení jsou uvedeny v tabulce 4.5 – 2 a na obrázku 4.5 – 2. Použitá množství PM byla připravena před samotnými experimenty soustružení, nebo broušení, proto nevyžadovaly další náklady na skladování, přečerpávání či extra manipulaci.

Tab. 4.5 – 2 Přehled provozních nákladů pro technologii soustružení

TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ				
VZTAŽENO K ČASU:	JEDNOHO MĚŘENÍ		EXPERIMENTU	
PROCESNÍ MÉDIUM	ČÁSTKA		ČÁSTKA	
ZA SUCHA				
Náklady celkem	0	Kč	0	Kč
PODCHLAZENÝ VZDUCH				
náklady - elektrická energie	0,078	Kč	2,35	Kč
náklady celkem	0,078	Kč	2,35	Kč
ZKAPALNĚNÝ CO₂				
náklady - elektrická energie	0,018	Kč	0,53	Kč
náklady - zkapalněné CO2	1,410	Kč	42,29	Kč
náklady celkem	1,43	Kč	42,83	Kč
ZKAPALNĚNÝ DUSÍK				
náklady - elektrická energie	0,018	Kč	0,53	Kč
náklady - zkapalněný dusík	12,54	Kč	376,32	Kč
náklady celkem	12,56	Kč	376,86	Kč

PK HOCUT 795B				
náklady - elektrická energie	0,004	Kč	0,11	Kč
náklady - vodné, stočné	1,86	Kč	1,86	Kč
náklady - koncentrát	150	Kč	150	Kč
náklady celkem	151,87	Kč	151,97	Kč
PK EOPS 1030				
náklady - elektrická energie	0,004	Kč	0,11	Kč
náklady - vodné, stočné	1,86	Kč	1,86	Kč
náklady - koncentrát	102	Kč	102	Kč
náklady celkem	103,87	Kč	103,97	Kč



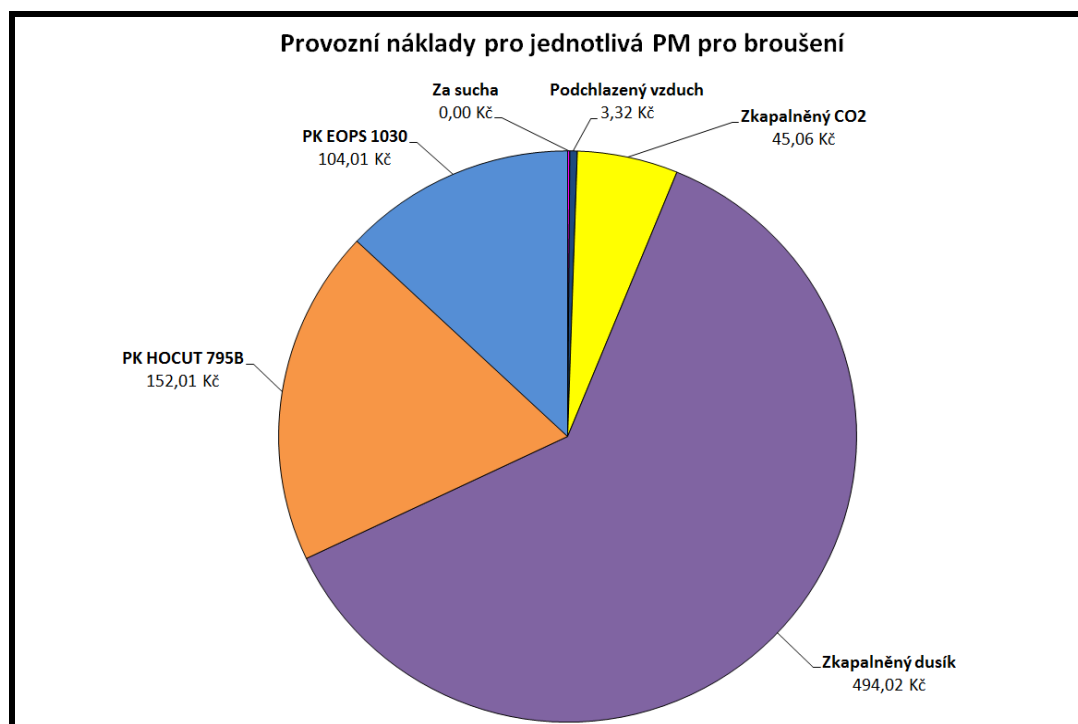
Obr. 4.5 – 3 Provozní náklady na jednotlivá PM pro soustružení

Provozní náklady při broušení jsou uvedeny v tabulce 4.5 – 3 a na obrázku 4.5 – 3.

Tab. 4.5 – 3 Přehled provozních nákladů pro technologii broušení

TECHNOLOGIE BROUŠENÍ				
VZTAŽENO K ČASU:	JEDNOHO MĚŘENÍ		VŠECH MĚŘENÍ	
PROCESNÍ MÉDIUM	ČÁSTKA		ČÁSTKA	
ZA SUCHA				
náklady celkem	0	Kč	0	Kč
PODCHLAZENÝ VZDUCH				
náklady - elektrická energie	0,111	Kč	3,32	Kč
náklady celkem	0,111	Kč	3,32	Kč

ZKAPALNĚNÝ CO₂				
náklady - elektrická energie	0,031	Kč	0,71	Kč
náklady - zkapalněné CO2	1,478	Kč	44,35	Kč
náklady celkem	1,51	Kč	45,06	Kč
ZKAPALNĚNÝ DUSÍK				
náklady - elektrická energie	0,031	Kč	0,71	Kč
náklady - zkapalněný dusík	16,44	Kč	493,31	Kč
náklady celkem	16,47	Kč	494,02	Kč
PK HOCUT 795B				
náklady - elektrická energie	0,013	Kč	0,15	Kč
náklady - vodné, stočné	1,86	Kč	1,86	Kč
náklady - koncentrát	150	Kč	150	Kč
náklady celkem	151,88	Kč	152,01	Kč
PK EOPS 1030				
náklady - elektrická energie	0,013	Kč	0,15	Kč
náklady - vodné, stočné	1,86	Kč	1,86	Kč
náklady - koncentrát	102	Kč	102	Kč
náklady celkem	103,88	Kč	104,01	Kč



Obr. 5.4 – 3 Provozní náklady na jednotlivá PM pro broušení

Při realizaci experimentů s PK při bylo zapotřebí zvýšené opatrnosti při manipulaci, experimentech a zajistit likvidaci použitých PK. V rámci experimentů při soustružení nebo broušení bylo připraveno – namícháno 20l emulze. Pokud by byla tato finanční částka zahrnuta přímo v kalkulacích pro experimenty, výrazně by došlo ke zkrácení finančních částek na experiment. Tento finanční obnos v případě množství, které bylo zapotřebí pro realizaci experimentů namíchat

a posléze ekologicky zlikvidovat, by činil 2000 Kč. Tato finanční částka byla zahrnuta v celkové finanční náročnosti všech nákladů v tabulce 4.5 – 5.

Celkové finanční náklady na jednotlivá PM

V celkovém součtu všech nákladů při soustružení a broušení, v tabulce 4.5 – 5, jednoznačně nejlépe dopadlo **obrábění za sucha**, kde nejsou potřebné žádná zařízení a PM, na provoz a také žádné dodatečné náklady na likvidaci PM. Pro chlazení **podchlazeným vzduchem** byla vyčíslena celková částka v hodnotě 18.002,35 Kč pro soustružení a 18.003,32Kč pro broušení. Pro chlazení **zkapalněným CO₂** byla vyčíslena celková částka v hodnotě 32.242,83Kč pro soustružení a 32.245,06Kč pro broušení. Při chlazení **zkapalněným dusíkem** byla vyčíslena celková částka v hodnotě 65.376,86Kč pro soustružení a 65.494,02Kč pro broušení. Při chlazení PK **HOCUT 795B** byla vyčíslena celková částka v hodnotě 11.851,97 Kč pro soustružení a 11.851,86Kč pro broušení. Při chlazení PK **EOPS 1030** byla vyčíslena celková částka v hodnotě 11.803,97 Kč pro soustružení a 11.803,86 Kč pro broušení.

Shrnutí poznatků a výsledků z experimentů je rozebráno v kapitole 5.4.

Tab. 4.5 – 4 Přehled celkových nákladů na realizované experimenty

Přehled celkových nákladů u jednotlivých PM [Kč]						
PM Technologie	ZA SUCHA	PODCHL. VZDUCH	ZKAPAL. CO ₂	ZKAPAL. DUSÍK	PK HOCUT 795B	PK EOPS 1030
Soustružení	0	18 002,35	32 242,83	65 376,86	11 851,97	11 803,97
Broušení	0	18 003,32	32 245,06	65 494,02	11 851,86	11 803,86

Ekologická náročnost PM při experimentech

V případě chlazení **zkapalněným CO₂** bylo zapotřebí zajistit kvalitní odsávání prostoru stroje a jeho okolí z pohledu na lidské zdraví a životního prostředí.

Použití **PP** při realizaci experimentů nevyžadovalo dodatečné náklady na ochranu životního prostředí.

Použití PK **HOCUT 795B** a PK **EOPS 1030** při realizaci experimentů si vyžádalo zvýšené opatrnosti při manipulaci a experimentech z důvodu kontaminace stroje a jeho okolí a dopadu na lidské zdraví.

Po vykonání experimentů bylo zapotřebí zajistit likvidaci použitých **PK**. V rámci experimentů při soustružení a broušení bylo připraveno – namícháno 20l emulze. V případě likvidace takto použitých PK bylo vybráno mezi dvěma metodami likvidace - chemické čištění a spalování. Tato částka byla vypočtena z daného množství použitých PK a ceny ekologické likvidace.

5 DISKUZE

Vzhledem k experimentální povaze práce, zvoleným měřeným veličinám a způsobu jejich měření byl rozsah získaných výsledků poměrně veliký a nebylo jednoduché výsledky sumarizovat. S naměřenými hodnotami v kapitole 4.2 až 4.5 se otvírá prostor pro diskuzi nad jejich významem a interpretací. Diskuze byla rozdělena dle dosažených výsledků, tj. jednotlivých technologií, měřených veličin a ekonomické náročnosti.

5.1 Soustružení

Měřením teplot na čele, na špičce a ve středu ŘN byla zkoumána schopnost PM ovlivnit teplotu v místě řezu. Měření teplot bylo realizováno dle metodiky uvedené v kapitole 4.1.3. Dosažené výsledky z měření teplot jsou uvedeny v kapitole 4.2.1.

Nejvyšší teploty na čele, na špičce a ve středu ŘN byly změřeny při **soustružení za sucha** (bez použití PM). V průběhu soustružení (v čase kontaktu ŘN a zkušebního vzorku) byl zaznamenán neustálý nárůst teploty. Maximální změřená teplota na čele byla 90,4°C, na špičce 81,7°C a ve středu 75,0°C.

Nejvýraznější snížení teploty na čele, na špičce a ve středu ŘN bylo změřeno při chlazení **zkapalněným dusíkem**. Projevil se jeho výrazný chladicí účinek, kdy na výstupu z trysky byla změřena teplota -196,0°C. Při chlazení kapalněným dusíkem bylo prokazatelně odvedeno nejvíce tepla vzniklého v primární, sekundární a terciální oblasti řezání. Maximální, resp. minimální, změřená teplota na čele byla -108,1°C, na špičce -2,4°C a ve středu 1,0°C.

Měřením řezné, posuvové a přísluvové síly byla zkoumána schopnost PM ovlivnit proces vnikání ŘN do materiálu (zkušebního vzorku). Popis měření působících sil je uveden v metodice v kapitole 4.1.3. Dosažené výsledky z měření působících sil jsou uvedeny v kapitole 4.2.2.

Nejvyšší řezná síla F_z 195,73N a posuvová síla F_x 97,64N byla změřena při soustružení s chlazením **zkapalněného CO₂**. Tento nárůst byl způsoben výrazným ochlazením primární oblasti řezání. To vedlo ke zvýšení modulu pružnosti obráběného materiálu. Dalším důvodem byl minimální mazací účinek mezi čelem ŘN a odcházející třísky. Z těchto důvodů bylo zapotřebí vyvinout vyšší řeznou a posuvovou sílu. U přísluvové síly byla změřena nejvyšší hodnota při **soustružení za sucha**, a to 71,45N. Tato síla vzniká kontaktem hřbetu ŘN s obrobeným povrchem. Zvýšení této síly způsobilo zvýšené tření mezi hřbetem ŘN a zkušebním vzorkem, provázené vyšší teplotou v místě řezání.

Nejnižší působící síly byly změřeny při soustružení s PK. Řezná síla F_z 134,01N při použití PK **HOCUT 795B**, síly posuvová F_x 55,35N a přísluvová F_y 41,47N při použití PK **EOPS 1030**. Snížení sil bylo způsobeno dobrým chladicím a hlavně mazacím účinkem obou PK.

Při měření trvanlivosti ŘN bylo hodnoceno konečné opotřebení VB na hřbetu ŘN. Popis měření trvanlivosti ŘN je uveden v metodice v kapitole 4.1.4. Dosažené výsledky z měření opotřebení jsou uvedeny v kapitole 4.2.3.

Nejvyšší opotřebení bylo změřeno při **soustružení za sucha**. Opotřebení VB bylo 0,24 mm. Důvodem byla vyšší teplota v místě řezu, a tím zvýšení tření mezi hřbetem ŘN a zkušebním vzorkem.

Nejnižší hodnota opotřebení byla změřena při soustružení s chlazením **zkapalněným dusíkem**. Konečné opotřebení VB bylo 0,12 mm. Důvodem bylo výrazné snížení teploty v místě řezu, způsobené chladícím účinkem PM a tím snížení tření.

Jednou z možností jak hodnotit kvalitu obrobku je drsnost povrchu. K tomuto hodnocení byly zvoleny parametry R_a , R_z , R_t , které popisují charakter povrchu soustruženého zkušebního vzorku. Popis měření drsnosti povrchu je uveden v metodice v kapitole 4.1.5.1. Dosažené výsledky z měření drsnosti povrchu jsou uvedeny v kapitole 4.2.4.

Nevyšší drsnost povrchu po soustružení pro parametry R_a , R_z a R_t byly změřeny po použití **zkapalněného CO₂**. U parametru R_a byla 2,343 μm , u R_z 13,737 μm a u R_t 18,313 μm . Nastalo tak z důvodu výrazného chladícího účinku, čímž došlo k zvýšení modulu pružnosti v primární oblasti řezání a k horšímu odřezávání materiálu.

Nejnižší drsnost povrchu po soustružení pro parametry R_a , R_z a R_t byla změřena po použití PK. U PK **HOCHUT 795B** byla u parametru R_a 1,356 μm , u PK **EOPS 1030** byla u parametru R_z 8,433 μm a u parametru R_t 11,798 μm . Důvodem byl dobrý chladící a mazací účinek obou PK.

Při hodnocení rozměrové přesnosti zkušebního vzorku po soustružení s chlazením PM byly zjištěny střední odchylky průměru povrchu vytvořeného na zkušebním vzorku. Popis měření rozměrů je uveden v metodice v kapitole 4.1.5.2. Dosažené výsledky ze středních odchylek jsou uvedeny v kapitole 4.2.5.

Nejvyšší střední odchylka průměru 7,05 μm byla zjištěna po soustružení s **podchlazeným vzduchem**. Nižší intenzita chlazení vedla v průběhu soustružení k vyšší teplotě zkušebního vzorku a tím k změně hloubky záběru.

Nejnižší odchylka průměru soustruženého povrchu byla zjištěna po chlazení se **zkapalněným dusíkem**, kde byla zjištěna střední odchylka 2,49 μm . Z důvodu vysokého chladícího účinku nedocházelo, v průběhu soustružení, k výraznému zahřátí zkušebního vzorku a tím jeho rozměru.

Celkové shrnutí výsledků u technologie soustružení

Při měření teplot ŘN (čela, špičky a středu) vykázal nejvyšší chladící schopnost **zkapalněný dusík**. U působících sil byly změřeny nejnižší hodnoty u PK **EOPS 1030** a **HOCUT 795B**. Trvanlivost byla nejnižší při soustružení s chlazením **zkapalněným dusíkem**. Drsnost povrchu byla změřena nejnižší u PK **EOPS 1030**

a **HOCUT 795B**. Nejmenší střední odchylka rozměru soustružené plochy zkušební vzorku byla zjištěna při chlazení **zkapalněným dusíkem**.

Při porovnání, všech měřených parametrů u soustružení, lze zkonstatovat, že nejvíce parametrů dokázal svými vlastnostmi ovlivnit **zkapalněný dusík**.

5.2 Broušení

Měřením teplot na zkušebním vzorku byla zkoumána schopnost PM ovlivnit teplotu v místě řezu. Popis měření teplot je uveden v metodice v kapitole 4.1.3. Dosažené výsledky z měření teplot jsou uvedeny v kapitole 4.3.1.

Z teplot v hloubce 1,5 mm od broušeného povrchu - termočlánek $T1$ byla změřena nejvyšší teplota $53,8^{\circ}\text{C}$ při chlazení **zkapalněným dusíkem**. Toto PM bylo rotujícím BK odfukováno, proto nemělo tak výrazný chladicí účinek do hloubky zkušební vzorku. Při chlazení PK **HOCUT 795B** bylo dosaženo nejnižší teploty $40,2^{\circ}\text{C}$. Výrazně se projevila schopnost PK smáčet povrch zkušební vzorku a tím zvýšit jeho chladicí a mazací schopnost.

Z teplot v hloubce 1,0 mm od broušeného povrchu - termočlánek $T2$ byla změřena nejvyšší teplota $56,5^{\circ}\text{C}$ při **broušení za sucha**. Při broušení byl zkušební vzorek ochlazován pouze ofukem rotujícího BK. Při chlazení PK **HOCUT 795B** bylo dosaženo nejnižší teploty $26,0^{\circ}\text{C}$. Opět se zde výrazně projevila schopnost PK smáčet povrch zkušební vzorku a tím zvýšit jeho chladicí a mazací schopnost.

Z teplot v hloubce 0,5mm od broušeného povrchu - termočlánek $T3$, $T4$ a $T5$ byla změřena nejvyšší teplota $60,5^{\circ}\text{C}$ při **broušení za sucha**. Při broušení byl zkušební vzorek ochlazován pouze ofukem rotujícího BK. Při chlazení PK **HOCUT 795B** bylo dosaženo nejnižší teploty $39,1^{\circ}\text{C}$. Opět se zde výrazně projevila schopnost PK smáčet povrch zkušební vzorku a tím zvýšit jeho chladicí a mazací schopnost.

Z teplot na povrchu zkušební vzorku - termočlánek $T6$ byla změřena nejvyšší teplota $31,5^{\circ}\text{C}$ při **broušení za sucha**. Při broušení byl zkušební vzorek ochlazován pouze ofukem rotujícího BK. Při chlazení PK **HOCUT 795B** bylo dosaženo nejnižší teploty $21,2^{\circ}\text{C}$. Opět se zde výrazně projevila schopnost PK smáčet povrch zkušební vzorku a tím zvýšit jeho chladicí a mazací schopnost.

Měřením kolmé řezné a posuvové síly byla zkoumána schopnost PM ovlivnit proces vnikání brusných zrn do materiálu (zkušební vzorku). Popis měření působících sil je uveden v metodice v kapitole 4.1.3. Dosažené výsledky z měření působících sil jsou uvedeny v kapitole 4.3.2.

Nejvyšší kolmá řezná síla F_z $114,8\text{N}$ a posuvová síla F_x $33,1\text{N}$ byla změřena při broušení s chlazením **zkapalněným dusíkem**. Tyto síly byly způsobeny výrazným ochlazením povrchové vrstvy broušeného povrchu. To vedlo ke zvýšení modulu pružnosti obráběného materiálu. Z těchto důvodů bylo zapotřebí vyvinout vyšší síly pro mikrořezání, mikrorytí a mikrozahlazování.

Nejnižší kolmá řezná síla F_z $58,1\text{N}$ byla změřena při chlazení PK **HOCUT 795B**. Nejnižší posuvová síla F_x $18,7\text{N}$ byla změřena při chlazení PK **EOPS 1030**.

Snížení sil bylo způsobeno dobrým mazacím účinkem PK. PK pozitivně ovlivnili mikrořezání a mikrorytí brusných zrn.

Při měření trvanlivosti BK byla hodnocena vyjiskřovací křivka. Popis měření trvanlivosti (řezivosti BK) je uveden v metodice v kapitole 4.1.4. Dosažené výsledky z měření trvanlivosti jsou uvedeny kapitole 4.3.3.

Nejvyšší průběh vyjiskřovací křivky byl zaznamenán při broušení s chlazením **zkapalněným dusíkem**. Tento nárůst byl způsoben výrazným ochlazením povrchové vrstvy broušeného zkušební vzorku. To vedlo ke zvýšení modulu pružnosti obráběného materiálu. Z těchto důvodů bylo zapotřebí vyvinout vyšší síly pro mikrořezání, mikrorytí a mikrozahlazování.

Nejnižší průběh vyjiskřovací křivky byl zaznamenán při broušení s chlazením PK **HOCUT 795B**. Důvodem bylo snížení teploty v místě řezu. Výrazně se projevila schopnost PK smáčet povrch zkušební vzorku a tím zvýšit jeho chladicí a mazací schopnost.

Jednou z možností hodnotit kvalitu obrobku je drsnost povrchu po broušení. K tomuto hodnocení byly zvoleny parametry R_a , R_z , R_t , které popisují charakter povrchu broušeného zkušební vzorku. Popis měření drsnosti povrchu je uveden v metodice v kapitole 4.1.5.1. Dosažené výsledky jsou uvedeny v kapitole 4.3.4.

Nevyšší drsnost povrchu po broušení pro parametry R_a , R_z a R_t byla změřena po chlazení **podchlazeným vzduchem**, u parametru R_a 0,473 μm , u R_z 3,426 μm a u R_t 4,296 μm . Z důvodu minimálního mazacího účinku PM.

Nejnižší drsnost povrchu po broušení pro parametry R_a , R_z a R_t byla změřena po použití PK, u parametru R_a 0,298 μm a u R_z 2,340 μm po chlazení PK **EOPS 1030**, u parametru R_t 2,993 μm po chlazení s PK **HOCHUT 795B**. Důvodem byl dobrý chladicí a mazací účinek obou PK.

Při hodnocení rozměrové přesnosti zkušební vzorku po broušení s chlazením PM byly zjištěny odchylky hloubky záběru. Popis měření rozměrů je uveden v metodice v kapitole 4.1.5.2. Dosažené výsledky jsou uvedeny v kapitole 4.3.5.

Nejvyšší střední odchylka záběru 3,00 μm byla zjištěna po **broušení za sucha**. Velmi nízká intenzita chlazení vedla v průběhu broušení k vyšší teplotě zkušební vzorku. Došlo k vyššímu úběru materiálu nad nastavený záběr BK.

Nejnižší střední odchylka záběru BK byla zjištěna po chlazení **podchlazeným vzduchem**, kde byla střední odchylka -0,65 μm . Proud chladného v průběhu broušení ochladil povrch natolik, že došlo k menšímu úběru materiálu nad nastavený záběr BK.

Celkové shrnutí výsledků u technologie broušení

Ze změřených teplot, působících sil, trvanlivosti (řezivosti BK) a drsnosti povrchu u broušení. Bylo prokázáno, že PK **HOCUT 795B** a **EOPS 1030** nejvíce ovlivnili proces řezání.

Pouze v případě rozměrové přesnosti – střední odchylky hloubky záběru BK byly PP schopny konkurovat PK. Nejnižší střední odchylka byla naměřena po chlazení **podchlazeným vzduchem**.

5.3 Mechanické zkoušky

Metodou hodnocení vlivu chlazení PM na mechanické vlastnosti soustružených zkušebních vzorků byla mechanická zkouška tahem s parametry: mez pevnosti R_m , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, tažnosti A_5 a plastického prodloužení A_g . Popis měření mechanických vlastností je uveden v metodice v kapitole 4.1.6. Dosažené výsledky mechanických zkoušek tahem jsou uvedeny v kapitole 4.4.1.

Pro **jednotlivá PM** bylo zjištěno, že neměli výraznější vliv na změnu meze pevnosti R_m a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$. Výraznější vliv se projevil při chlazení PK **HOCUT 795B** na zvýšení tažnosti A_5 11,86% a na plastické prodloužení A_g 3,23%. Důvodem bylo, že jednotlivá PM ovlivnila pouze povrch a malou podpovrchovou vrstvu zkušebního vzorku. Převážná část plochy průřezu zkušebního vzorku zůstala neovlivněna.

Metodou hodnocení vlivu chlazení PM na mechanické vlastnosti broušených zkušebních vzorků bylo měření povrchové tvrdosti $HV10$ a podpovrchové mikrotvrdosti $HV0.2$ na zkušebních vzorcích. Popis měření mechanických vlastností je uveden v metodice v kapitole 4.1.6. Dosažené výsledky mechanických zkoušek jsou uvedeny v kapitole 4.4.2.

Pro **jednotlivá PM** při měření tvrdosti na broušeném povrchu zkušebních vzorku nebyly zjištěny výrazné změny tvrdosti. Důvodem byla rozlišovací schopnost zvolené zkušební metody.

V případě mikrotvrdosti v podpovrchové vrstvě do 1,5mm bylo dosaženo nejvyšší průměrné mikrotvrdosti 263,0 $HV0.2$ po chlazení **zkapalněným dusíkem**. Tento nárůst byl způsoben výrazným ochlazením povrchové vrstvy zkušebního vzorku po broušení. To vedlo k zvýšení potřebných sil pro mikrořezání a mikrorytí a mikrozahlazení, které se projevilo zvýšením mikrotvrdosti v podpovrchové vrstvě. Naopak nejnižší průměrná mikrotvrdost byla dosažena po broušení s **PK HOCUT 795B** 226 $HV0.2$. Důvodem byl dobrý mazací účinek PM, který ovlivnil potřebné síly pro mikrořezání, mikrorytí a mikrozahlazení, které se projevilo mikrotvrdostí v podpovrchové vrstvě.

5.4 Ekonomické a ekologické hledisko

Vyhodnocení vycházelo z technologických podmínek pro realizace experimentů dle metodiky v kapitole 4.1 a z dosažených výsledků nákladů na jednotlivá PM v kapitole 4.5.

Fixní (pořizovací) náklady byly odvozeny z cen potřebného zařízení a příslušenství. Nejnižší pořizovací náklady byly jednoznačně při **soustružení i broušení za sucha**. Zde nebylo zapotřebí žádného vybavení. Nejvyšší pořizovací

náklady 65.000Kč byly při chlazení **zkapalněným dusíkem**. Důvodem bylo složité přivedení PM do místa řezu (zásobník dusíku, přečerpávací zařízení).

Nejnižší provozní náklady byly u **obrábění za sucha**. Nejvyšší provozní náklady byly při chlazení **zkapalněným dusíkem** pro obě testované technologie, při soustružení 376,86Kč a při broušení 494,02Kč. Důvodem byla vyšší cena spotřebovaného PM.

Nejlevnější PM bylo při soustružení a broušení „**za sucha**“, nevyžadovalo pořizovací, provozní ani dodatečné náklady. Nejdražší PM bylo chlazení **zkapalněným dusíkem**. Při soustružení byla celková částka 65.376,86Kč a při broušení 65.494,02Kč.

6 ZÁVĚR

Předložená disertační práce, zpracována na téma „**Výzkum vlivů progresivních způsobů chlazení u vybraných technologií obrábění**“, poskytuje informace o možnosti využití plyných médií v procesu obrábění.

Hlavním cílem bylo ověřit plyná média v procesu obrábění při zachování stejné kvality výroby jako při použití kapalných médií.

Práce je členěná do dvou hlavních částí.

V teoretické části byl proveden rozbor dané problematiky. Hlavní pozornost byla věnována vzniku tepla při procesu obrábění a možnostech jeho odvodu z místa řezu.

Experimentální část byla zaměřena na pět oblastí – volba plyných a kapalných médií, definování měřených veličin, způsob jejich vyhodnocení, provedení experimentů, vyhodnocení výsledků a vyvození závěrů.

Výsledkem disertační práce jsou změřená data a určené závislosti mezi chlazením PM a jeho důsledcích v místě řezu, respektive teplotě v celém řetězci od materiálu obrobku (zkušební vzorku), přes geometrii ŘN a jeho trvanlivost, až po vliv na povrch obrobku (zkušební vzorku). Hodnocení vlivu PM na jednotlivé veličiny, respektive členy rezného procesu.

Z měřených dat a získaných výsledků vyplývá následující:

1. U technologie soustružení bylo zjištěno, že v případě kvality výroby lze nahradit procesní kapaliny jiným procesním médiem. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při chlazení **zkapalněným dusíkem**. U procesních kapalin **HOCUT 795B** a **EOPS 1030** bylo dosaženo horších výsledků. Při porovnání těchto procesních médií z hlediska nákladů byly zjištěny mnohem vyšší pořizovací a provozní náklady u zkapalněného dusíku než u procesních kapalin. Při srovnání výsledků kvality výroby a vynaložené ceny k jejímu získání, lze konstatovat, že v případě soustružení byly jednoznačně výhodnější PK.
2. U technologie broušení bylo zjištěno, že v případě kvality výroby nelze jednoznačně nahradit procesní kapaliny jiným procesním médiem. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při chlazení procesní kapalinou **HOCUT 795B**.
3. U mechanických zkoušek tahem soustružených zkušebních vzorků, v případě parametru meze pevnosti a smluvní meze kluzu, nebyly zjištěny výrazné rozdíly mezi jednotlivými plynými a kapalnými médii. V případě tažnosti a plastického prodloužení bylo zjištěno vyšších hodnot při chlazení s procesní kapalinou **HOCUT 795B**.
4. Při měření tvrdosti vytvořené broušené plochy zkušební vzorku nebyly zjištěny výrazné rozdíly mezi jednotlivými procesními médii. Nejvyšší

mikrotvrdost v povrchové vrstvě byla zjištěna po chlazení **zkapalněným dusíkem**.

5. Z hlediska ekonomické a ekologické náročnosti lze zkonstatovat, že u provedených experimentů byly dosaženy nejnižší pořizovací a provozní náklady u **obrábění za sucha**. Naopak u **zkapalněného dusíku** bylo zapotřebí pořízení speciálního přečerpávacího zařízení, které bylo finančně nejnáročnější. U PK **HOCUT 795B** a **EOPS 1030** bylo dosaženo nižších nákladů, než při chlazení podchlazeným vzduchem, zkapalněným CO₂ a zkapalněným dusíkem.

V celkovém porovnání dosažených výsledků u technologií soustružení, broušení a z dosažených výsledků mechanických vlastností dopadly nejlépe procesní kapaliny **HOCUT 795B** a **EOPS 1030**. V případě procesních plynů bylo zjištěno, že **zkapalněný dusík** je schopen v některých hodnocených parametrech vyrovnat či dokonce překonat vliv procesních kapalin na kvalitu výroby. Z pohledu pořizovacích a provozních nákladů na dosažení lepší kvality výroby není zkapalněný dusík výhodnou náhradou procesních kapalin. Naopak z ekonomického a ekologického pohledu jednoznačně nejlépe dopadlo **obrábění za sucha**.

Směr další vývoje

Příprava metodiky měření i příprava zkušebních vzorků poskytla naměřená data bez větších chyb měření. Ověření metodiky, provedenými experimenty, lze považovat za základ pro její pozdější doplňování a při dodržení vstupních podmínek i pro případné porovnávání jednotlivých měření. Vzhledem k obsáhlosti a rozmanitosti procesů v oblasti obrábění jsou získané poznatky vítaným základem k dalšímu využití, např. hodnocení antikoročních ocelí, lehkých slitin (Al slitiny) a kompozitních materiálů, kde by chlazení pomocí zkapalněných plynů mohlo ukázat jejich možné další využití. A to v rámci školní výuky nebo poptávky z výrobní sféry.

7 LITERATURA

- [1] CIESLAR, M. ,Účinek procesních plynů na technologii broušení a kvalitu obrobených součástí. Diplomová práce Liberec 2015, TU v Liberci, Vedoucí práce Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D..
- [2] ČEP, R. Technologie II, 1. díl., Skriptum. VŠB Ostrava [online], [cit.10.6.2013]. Dostupné z <http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf >
- [3] ČEP, R. Technologie II, 2. díl. Skriptum. VŠB Ostrava [online], [cit.10.6.2013]. Dostupné z < http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf >
- [4] ČEP, R., PETRŮ, J. Experimentální metody v obrábění – učební texty. 1. vydání. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. 143 s. ISBN 978-80-248-2533-5. [cit. 2015-03-9]. Dostupné na: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrabeni.pdf
- [5] ČSN EN ISO 1101, ČSN EN ISO 1101 - Geometrické specifikace výrobků (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení. Český normalizační institut. 2007.
- [6] ČSN EN ISO 3274. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů. Český normalizační institut. 1999.
- [7] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999. Praha: ČNI.
- [8] ČSN EN ISO 6892-1. - Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Český normalizační institut 2010.
- [9] 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.
- [10] BENEŠ, Petr. Chladicí a mazací schopnost procesních kapalin při obrábění Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci, 2009. 78 s. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Jersák, CSc.
- [11] BEŇO, J., PŘÍSPĚVOK K STÚDIU JAVOV TVORENIA TRIESKY PŘI OBRÁBANÍ V KRYOGÉNNOM PROSTREDÍ, Kandidátská disertační práce, VŠT Košice 1984, Vedoucí práce prof. Ing. Imrich Kažimír CSc., [cit. 16-11-2016] Dostupné z <http://www.kom.tul.cz/download.php>.

- [12] BEŇO, J., – TEÓRIA REIZANA KOVOV, 1. vyd. Vienaľa Košice 1999, 255 s., ISBN 80-7099-429-0
- [13] Bezpečnostní list PK HOCUT 795 B. [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: www.houghtonintl.com/si-si/.../Hocut-795-B.aspx
- [14] Bezpečnostní list PK EOPS 1030. [online]. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/bl10clp_paramo_eops1030_z3.pdf
- [15] BUDA, J., KAŽIMÍR, I., – TEORETICKÉ ZÁKLADY OBRÁBANIA KOVOV, 1. vid., Alfa Bratislava, 1977, 418s.
- [16] BUDA, J., SOUČEK, J., VASILKO, K., – TEÓRIA OBRÁBANIA, 1. vyd. Alfa Bratislava, 1983, 356s.
- [17] BUMBÁLEK, B., OŠŤÁDAL, B., ŠAFR, E. Řezné kapaliny. 1.vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1963. 136 s. ISBN -.
- [18] DRÁB V. a kolektiv, Technologie 1, podklad pro výuku předmětu Technologie 3 – obrábění. 1985 Dostupné na: http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_skr.pdf.
- [19] DOBEŠ, P. Současné trendy v oblasti kapalin pro obrábění. MM spektrum [online]. 2007/5 [cit. 2013-09-11]. Dostupné z < <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-v-oblasti-kapalin-pro-obrabeni.html> >.
- [20] Dokumentace produktu ACCU-LUBE, 10 [cit. 2017-01-09]. Dostupné z <<http://www.accu-lube.com/produkte/aussenschmierung/erklaerung/>>.
- [21] Dokumentace přístroje, Technická specifikace přístroje Mitutoyo SurfTest SV-2000N2 [cit. 30-03-2017], Dostupná na Katedře obrábění a montáže.
- [22] Dokumentace stroje, Technická specifikace stroje BPH 320 A [cit. 25-02-2017], Dostupná na Katedře obrábění a montáže.
- [23] Dokumentace stroje, Technická specifikace stroje SU50 [cit. 25-02-2017], Dostupná na Katedře obrábění a montáže.
- [24] HLUCHÝ, Miroslav. A KOL. Strojírenská technologie. Praha: SNTL, 1975.
- [25] HONG S. Y., MARKUS I., JEONG W. New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, č 41, s. 2245-2260. ISSN 2245–2260.
- [26] JERSÁK, J. Základní konvenční technologie obrábění (podklad pro výuku předmětu TECHNOLOGIE III - OBRÁBĚNÍ). [online]. Liberec: Technická univerzita v

Liberci, katedra obrábění a montáže, [cit. 2015-02-20]. Dostupné na: <http://www.kom.tul.cz/download.php>

[27] JUNEK, M. ,Účinek procesních plynů na technologii soustružení a kvalitu obroběných součástí. Bakalářská práce Liberec 2015, TU v Liberci, Vedoucí práce Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D..

[28] Katalogový list konstrukční ocele EN C45+N, Feron a.s., [cit. 20-02-2017], dostupné z <http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php>.

[29] Katalogový list převodního modulu pro snímání teploty. B&R Headquarters, [cit. 11-01-2017] Dostupné z <https://www.br-automation.com/cs/produkty/control-systems/x20-system/temperature-measurement/x20at6402/>.

[30] KOČMAN, K. Aktuální příručka pro technický úsek: Svazek 7. Obrábění. Praha: Dashöfer,2001. ISBN 80-902247-2-5.

[31] KOČMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s. r. o. Brno, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

[32] LINDE - Gas. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://www.linde-gas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/suchy_led/index.html

[33] LONTECH, Vírové trubice [online]. Lontech.cz [cit. 2013-08-09]. Dostupné z <https://www.lontech.cz/files/virove_trubice/cold-air-gun-specifikace.pdf >.

[34] MÁDL, J., - TEORIE OBRÁBĚNÍ, Dotisk, Praha: Nakladatelství ČVUT, 1990, 156s.

[35] MÁDL, J., BARCAL, J. Základy technologie II. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-800-1037-331.

[36] MÁDL, J., KAJKA, J., VRABEC, M., DVOŘÁK, R. Technologie obrábění, 1. díl. 1. vydání Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. 80 s. ISBN 80-01-01091-6.

[37] MACHAČKOVA, A., KOCICH, R., Sdílení tepla a proudění, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012, s. 187, ISBN 978-80-248-2576-2.

[38] MM SPECTRUM, Novinky v obrábění. MM spektrum [online]. 2014/10 [cit. 2017-01-09]. Dostupné z <<http://www.mmspektrum.com/clanek/novinky-v-obrabeni.html>>.

[39] MM SPECTRUM, Obrábění za sucha – ano, či ne? MM spektrum [online]. 2001/11 [cit. 2013-09-11]. Dostupné z <<http://www.mmspektrum.com/clanek/ucinek-rezneho-prostredi-na-trvanlivost-britu.html> >.

- [40] MM SPECTRUM, V budoucnosti budou těžce obrobitelné materiály obráběny za velmi nízkých teplot. MM spektrum [online]. 2012/6 [cit. 2013-08-09]. Dostupné z < <http://www.mmspektrum.com/novinka/v-budoucnosti-budou-tezce-obrobitelne-materialy-obrabeny-za-velmi-nizkych-teplot.html> >.
- [41] NOVÁČEK, P., Moderní chladicí kapaliny pro obrábění, Bakalářská práce, VUT v Brně 2012, Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík Ph.D., [cit. 23-11-2015] Dostupné z https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54919
- [42] PAZDERA, J. Oxid uhličitý v roli ochrance životního prostředí. Osel.cz [online]. 2005 [cit. 2013-10-05]. Dostupné z < <http://www.osel.cz/index.php?obsah=6&akce=showall&clanek=1216> >
- [43] PŘIKRYL, Z., MUSÍLKOVÁ, R. Teorie obrábění. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1971. 200 s.
- [44] RAK, J. Účinek procesních plynů na technologii soustružení a kvalitu obroběných součástí. Diplomová práce Liberec 2015, TU v Liberci, Vedoucí práce Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D..
- [45] ŘASA, J., GABRIEL, V. Strojírenská technologie 3 - 1. díl - Metody, stroje a nástroje na obrábění. 1. vyd. Praha: Pedagogické nakladatelství Scientia, spol. s.r.o., 2000. 256s. ISBN 80-7183-207-3.
- [46] SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig-A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [47] 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. 2016-03-03].
- [48] TECHNICKÁ UNIVERZITA, Liberec. Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů: Etapa 2 – "Výzkum chlazení u technologických procesů". [online]. 2014, s. 34 [cit. 2016-03-03].
- [49] TECHNICKÁ UNIVERZITA, Liberec. Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů: Etapa 3 – "Výzkum chlazení u technologických procesů". [online]. 2015, s. 113 [cit. 2016-03-03].
- [50] Tribotechnika, Rozhodující je použití efektivního chlazení, Tribotechnika [online], 2014/2 [cit. 20. 6. 2016] Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22014/rozhodujici-je-pouziti-efektivniho-chlazen.html>

[51] VLACH, B., aj. Technologie obrábění a montáží. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990. 472 s. ISBN 80-03-00143-9.

[52] VODIČKA, J. Kryogenní chlazení při obrábění. Ininet [online]. 2011 [cit. 2013-09-30]. Dostupné z <
http://www.ininet.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=44:kryogenni-chlazení-priobrabeni&catid=7:clanky&Itemid=14 >

[53] ZEMAN, P. Účinek řezného prostředí na trvanlivost břítu. MM spektrum [online]. 2005/12 [cit. 2013-09-11]. Dostupné z <
<http://www.mmspektrum.com/clanek/ucinek-rezneho-prostredi-na-trvanlivost-britu.html> >.

8 PUBLIKACE A VÝSTUPY STUDENTA

Publikace

LEDVINA, M. a DVOŘÁČKOVÁ, Š. Assessment of the procedural gases influence at turning technology. Manufacturing technology. 1. vyd. Ústí nad Labem: J. E. Purkyně University in Ústí n. Labem, 2016, roč. 16, č. 1. S. 162 – 168. ISSN 1213-2489.

LEDVINA M., KARÁSEK J., DVOŘÁČKOVÁ Š., HODNOCENÍ VLIVU PROCESNÍCH PLYNŮ PŘI TECHNOLOGII BROUŠENÍ. Strojírenská technologie Plzeň 2015: VI. ročník mezinárodní konference v Plzni. Sborník příspěvků, Vyd. 1. Plzeň: ZČU v Plzni, 2015. s. 137-145. ISBN 978-80-261-0304-2.

LEDVINA M., KARÁSEK J., DVOŘÁČKOVÁ Š., HODNOCENÍ VLIVU PROCESNÍCH PLYNŮ PŘI TECHNOLOGII FRÉZOVÁNÍ. Strojírenská technologie ICTKI 2014: V. ročník mezinárodní konference konané v Litoměřicích, Strojírenská technologie, 2014, roč. 19, č. 1, s. 23-32. ISSN: 1211-4162

LEDVINA, M., Vliv procesních kapalin na řeznou sílu při procesu broušení. Strojírenská technologie, 2013, roč. 18., č. 3, s. 176 - 182. ISSN 1211-4162.

LEDVINA, M., DUŠÁK, K. Logistika velkých součástí strojů se specializací na vodorovné frézovací a vyvrtávací stroje a horizontální vyvrtávací centra. Strojírenská technologie. Rec. neveden, 2010, roč. 14, č. speciální. s. 142. ISSN 1211-4162.

Užité vzory

Dvořáčková Š., Ledvina M., Konstrukční uspořádání soustružnického nože s vyměnitelnou břitovou destičkou pro hodnocení teploty, řezných sil, drsnosti povrchu a rozměrové přesnosti v průběhu soustružnických operací [Užitý vzor PUV 2014 - 27837].

Dvořáčková Š., Ledvina M., Konstrukční uspořádání tepelně a vodivě izolovaného zkušební vzorku a stroje pro hodnocení teploty, řezných sil, drsnosti povrchu a rozměrové přesnosti v průběhu frézovacích operací [Užitý vzor PUV 2015 – 28117].

Dvořáčková Š., Ledvina M., Konstrukční uspořádání tepelně a vodivě izolovaného zkušební vzorku a stroje pro hodnocení teploty, řezných sil, drsnosti povrchu a rozměrové přesnosti v průběhu vrtacích operací [Užitý vzor PUV 2015 - 28257].

Jersák J., Ledvina M., Dugin A., Popov A., Zařízení pro zefektivnění metody hodnocení antiadhezní schopnosti procesních kapalin [Užitý vzor PUV 2014 - 27323].

Funkční modely

Dvořáčková Š., Ledvina M., Konstrukční uspořádání soustružnického nože s vyměnitelnou břitovou destičkou pro hodnocení teploty, řezných sil v průběhu soustružnických operací [Funkční model KOM – 2014 – G – FV – 01].

Dvořáčková Š., Ledvina M., Konstrukční uspořádání zkušební vzorku pro zefektivnění metody hodnocení experimentů při technologii frézování [Funkční model KOM – 2014 – G – FV – 02].

Dvořáčková Š., Ledvina M., Konstrukční uspořádání zkušební vzorku pro zefektivnění metody hodnocení experimentů při technologii vrtání [Funkční model KOM – 2014 – G – FV – 03].

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 – 1 Kinematika řezného procesu při podélném soustružení	15
Obr. 1.1 – 2 Ostří a plochy na řezné části soustružnického nože	16
Obr. 1.1 - 3 Roviny a úhly v nástrojové souřadné soustavě	16
Obr. 1.2 -1 Kinematika brousícího procesu	18
Obr. 2.1 - 1 Zdroje tepla, rozložení teploty a teplotních polí při řezání	20
Obr. 2.1 – 2 Okrajové podmínky pro ustálený teplotní proces	24
Obr. 2.1 – 3a/b Jaegrův pohyblivý zdroj tepla	25
Obr. 2.1 - 4 Rozložení teplot při procesu	26
Obr. 2.2 - 1 Rozdělení metod měření teplotních stavů	27
Obr. 2.3 – 1 Náročnost technologie na účinky procesního média	28
Obr. 2.3 – 2 Přívod PM – nepřímá metoda	29
Obr. 2.3 – 3 Přívod PM – přímá metod	29
Obr. 2.3 – 4 Obrábění za sucha	30
Obr. 2.3 – 5 Princip RanqueHilschovi vírové trubice	31
Obr. 2.3 – 6 Průmyslová využití principu vírové trubice – Cold Air Gun	31
Obr. 2.3 – 7 Přívod CO ₂ ve formě tryskaného sněhu	32
Obr. 2.3 - 8 Přímé chlazení pomocí zkapalněného dusíku	33
Obr- 2.3 – 9 Vodou mísitelné procesní kapaliny	34
Obr. 2.3 – 10 Vodou nemísitelné procesní kapaliny	35
Obr.2.3–11 a) Základní princip metody mazání mlhou; b) Průmyslové využití „ACCU-LUBE“	35
Obr. 4.1 – 1 a) Kondenzátorová svářečka, b) převodník s termočlánky, c) Provozní jednotka PP65	41
Obr. 4.1 – 2a Měření teploty na VBD u technologie soustružení	43
Obr. 4.1 – 2b Zkušební vzorek u technologie soustružení	44
Obr. 4.1 – 3 Zkušební vzorek pro měření teploty na obrobku u technologie broušení	45
Obr. 4.1 – 4 Dynamometr KISTLER, typ 9265B; nábojový zesilovač typ 5019 B	46
Obr. 4.1 - 5 Měřené opotřebení VB a příklad reálného opotřebení	47
Obr. 4.1 – 6 a) dílenský mikroskop ZEISS, b) nitkový kříž okuláru	48
Obr. 4.1 – 7 a) Profiloměr Mitutoyo Surftest SV–2000N2, b) měřící rameno s dotekem s diamantovou kuželovou špičkou	49
Obr. 4.1 – 8 Měření drsnosti; a) u soustruženého vzorku, b) broušeného vzorku	50
Obr. 4.1 – 9 Měření rozměrové přesnosti; a) měření průměru soustruženého vzorku, b) měření šířky drážky broušeného vzorku	52

Obr. 4.2 – 1	Vzorový průběh teplot na čele ŘN při soustružení s PM	64
Obr. 4.2 – 2	Vzorový průběh teplot na špičce ŘN při soustružení s PM	64
Obr. 4.2 – 3	Vzorový průběh teplot středu ŘN při soustružení s PM	65
Obr. 4.2 – 4	Maximální teploty při soustružení s PM	65
Obr. 4.2 – 5	Vzorový průběh působících sil při soustružení s PM	67
Obr. 4.2 – 6	Složek působících sil při soustružení	69
Obr. 4.2 - 7	Opatřebení VB při soustružení s PM	71
Obr. 4.2 - 8	Záznam měřeného profilu soustruženého povrchu s PM	71
Obr. 4.2 - 9	Drsnosti obrobeného povrchu s PM	73
Obr. 4.2 - 10	Odchylky od průměru obrobku po soustružení	75
Obr. 4.3 – 1	Vzorový průběh teploty na termočlátku T1 při broušení s PM	76
Obr. 4.3 – 2	Vzorový průběh na termočlátku T2 při broušení s PM	77
Obr. 4.3 – 3	Vzorový průběh teploty na termočlátku T3 při broušení s PM	77
Obr. 4.3 – 4	Vzorový průběh teploty na termočlátku T6 při broušení s PM	78
Obr. 4.3 – 5	Maximální teploty při broušení s PM	79
Obr. 4.3 – 6	Vzorový průběh kolmé síly F_z při broušení s PM	80
Obr. 4.3 – 7	Vzorový průběh posuvové síly F_x při broušení s PM	81
Obr. 4.3 – 8	Hodnoty složek působících sil při broušení s PM	83
Obr. 4.3 – 9	Vyjiskřovací křivky při broušení s PM	84
Obr. 4.2 - 10	Záznam měřeného profilu broušeného povrchu s PM	84
Obr. 4.3 – 11	Drsnosti povrchu po broušení s PM	86
Obr. 4.3 – 12	Odchylky hloubky záběru po broušení s PM	88
Obr. 4.4 – 1	Záznamy tahových zkoušek u vzorků obrobených za sucha	89
Obr. 4.4 – 2	Porovnání meze pevnosti R_m a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$	90
Obr. 4.4 – 3	Hodnoty A_5 a A_g z mechanické zkoušky tahem	91
Obr. 4.4 – 4	Záznam měření tvrdosti a mikrotvrdosti	92
Obr. 4.4 – 5	Tvrdosti HV10 broušeného vzorku	92
Obr. 4.4 – 6	Hodnoty z měření mikrotvrdosti HV0.2	94
Obr. 4.5 – 1	Fixní náklady na jednotlivá PM	96
Obr. 4.5 – 3	Provozní náklady na jednotlivá PM pro soustružení	97
Obr. 5.4 – 3	Provozní náklady na jednotlivá PM pro broušení	98

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 – 1 Rozsah profiloměru Mitutoyo Surfptest SV–2000N2	49
Tab. 4.1 – 2 Měřené parametry drsnosti povrchu	49
Tab. 4.1 – 3 Digitální třmenový mikrometr Mitutoyo 0-25 mm	51
Tab. 4.1–4 Digitální třmenový mikrometr Mitutoyo 25 - 50 mm	51
Tab. 4.1 – 5 Trhací stroj TIRA test 2300 a zkušební tyčky	54
Tab. 4.1 – 6 Řezné podmínky použité při soustružení zkušebních vzorků	54
Tab. 4.1 – 7 Mikrotvrdoměr Qness Q30A	55
Tab. 4.1 – 8 Univerzálního hrotového soustruhu SU50	57
Tab. 4.1 – 9 Použitý soustružnický nůž	57
Tab. 4.1 – 10 Stanovené řezné podmínky při soustružení	58
Tab. 4.1 – 11 Rovinná bruska BPH 320A	58
Tab. 4.1 – 12 Použitý brusný nástroj (BK)	59
Tab. 4.1 – 13 Stanovené řezné podmínky při broušení	59
Tab. 4.1 – 14 Zařízení pro podchlazený vzduch – Cold Air Gun	60
Tab. 4.1 – 15 Zařízení k dávkování zkapalněného CO ₂	60
Tab. 4.1 – 16 Elektrické přečerpávací zařízení EPZ – 2	61
Tab. 4.1 – 17 Externí zařízení pro čerpání PK	61
Tab. 4.1 - 18 Refraktometr Brix ATC	61
Tab. 4.1 – 19 Doplnující parametry pro realizaci experimentů	62
Tab. 4.2 – 1 Maximální teploty při soustružení s PM	63
Tab. 4.2 – 2 Působící síly při soustružení s PM	67
Tab. 4.2 – 3 Opotřebenění VB při soustružení s PM	69
Tab. 4.2 - 4 Drsnosti povrchu po soustružení s PM	72
Tab. 4.2 – 5 Hodnoty odchylek průměru zkušebního vzorku po soustružení s PM	74
Tab. 4.3 – 1 Maximální teploty při broušení za sucha	78
Tab. 4.3 – 2 Působící síly při broušení za rozličných s PM	81
Tab. 4.3 – 3 Drsnosti povrchu po broušení s PM	85
Tab. 4.3 –4 Odchyly hloubky záběru po broušení s PM	87
Tab. 4.4 – 1 Tahové zkoušky obrobených vzorků s PM	89
Tab. 4.4 – 2 Tvrdosti HV10 broušených vzorků s PM	92
Tab. 4.4 – 3 Mikrotvrdosti broušených vzorků s PM	93
Tab. 4.5 – 1 Přehled fixních nákladů pro jednotlivá PM	95
Tab. 4.5 – 2 Přehled provozních nákladů pro technologii soustružení	96
Tab. 4.5 – 3 Přehled provozních nákladů pro technologii broušení	97
Tab. 4.5 – 4 Přehled celkových nákladů na realizované experimenty	99

11 PŘÍLOHY

Příloha č. 1 – Tabulky s měřenými hodnotami z experimentů při soustružení

- *Teploty* *str. I*
- *Působící síly* *str. II*
- *Trvanlivost* *str. V*
- *Drsnost povrchu* *str. VI*
- *Rozměrová přesnost* *str. IX*

Příloha č. 2 – Tabulky s měřenými hodnotami z experimentů při broušení

- *Teploty* *str. X*
- *Působící síly* *str. XII*
- *Drsnost povrchu* *str. XV*
- *Rozměrová přesnost* *str. XVI*

Příloha č. 3 – Protokoly a tabulky s měřenými hodnotami ze zkoušek

- *Mechanická zkouška tahem* *str. XVII*
- *Zkouška tvrdosti HV10* *str. XXV*
- *Zkouška mikrotvrdosti HV0.2* *str. XXV*

Příloha č. 1 - Tabulky s měřenými hodnotami z experimentů při soustružení

Teplota

Tab. 1– 7 Maximální teploty při soustružení za sucha

SOUSTRUŽENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA			
Měření č. / Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
1	78,8	73	86,5
2	82,3	76,3	90,5
3	82,3	75,2	90,4
4	82,5	75,1	92,8
5	82,4	75,2	91,9

Tab. 1– 8 Maximální teploty při soustružení podchlazeným vzduchem

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH			
Vzorek / Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
1	54,6	53,9	22,8
2	59,8	58,9	23,7
3	56,1	55,2	24,7
4	69,8	67,7	26,4
5	54,9	53,6	26,6

Tab. 1– 9 Maximální teploty při soustružení se zkapalněným CO₂

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO ₂			
Vzorek / Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
1	53,2	52,6	59,4
2	58,8	58	62,4
3	67,7	67,5	73,4
4	68,6	66,1	80,3
5	57,6	51,4	57,4

Tab. 1 – 10 Maximální teploty při soustružení se zkapalněným dusíkem

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK			
Vzorek / Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
1	-0,2	-1,6	-107,4
2	-4,1	-0,9	-108,5
3	-2,3	0,6	-105,4
4	-3,3	3,6	-108,1
5	-1,9	3,1	-111,2

Tab. 1 – 11 Maximální teploty při soustružení s PK HOCUT 795B

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795 B			
Vzorek / Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
1	31,3	24,7	34,2
2	31,4	23,4	32,9
3	32,2	23,2	34,4
4	28,4	22,3	34,7
5	28,4	22,2	31,2

Tab. 12 – 12 Maximální teploty při soustružení s procesní kapalinou EOPS 1030

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030			
Vzorek / Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]
1	24,2	23,5	38,2
2	32,9	26,9	39,5
3	27,3	23,3	31
4	28,5	23,2	32,1
5	30,6	25,3	34,7

Působící síly

Tab. 1 – 1 Působící síly při soustružení za sucha

SOUSTRUŽENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA															
.	1 plocha F [N]			2 plocha F [N]			3 plocha F [N]			4 plocha F [N]			5 plocha F [N]		
č.m.	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3
1	187,5	194	174	192	193	199	188,5	188,5	184	190,5	190	184,5	189,5	184,5	181,5
2	189	195,5	174	194	192	198,5	188	188	185	190,5	188	183,5	189	184	182,5
3	190	192,5	173,5	193	193	197,5	188	188	184,5	191	188	184,5	190	183,5	182,5
4	190	192,5	174	193	191,5	197,5	188	188	186,5	190	188	183,5	189	184,5	183
5	189,5	192,5	174	192	191,5	197,5	189	187,5	185	187,5	188,5	185	188	185	182
č.m.	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3
1	68	67	65	67	67	70	78	76,5	75	58	57,5	57	87,5	87	86,5
2	68,5	67,5	66,5	67,5	66,5	68,5	76	78	72,5	57,5	59,5	57	88,5	88	86,5
3	67,5	67,5	68,5	68	67	69,5	77,5	75,5	75	59,5	59	58,5	87,5	87	88,5
4	67	68,5	67	68	66,5	69,5	76	75,5	75	60	59,5	58	88	87,5	90
5	66,5	69	66	67,5	68,5	68,5	75,5	76,5	74	59	58,5	59,5	87	87,5	88
č.m.	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3
1	91,9	94,9	87,9	98,4	101,4	103,4	100,4	103,4	100,4	102,2	104,2	102,2	92,9	92,9	87,9
2	90,9	92,9	86,9	101,4	103,4	105,4	101,4	105,4	101,4	103,2	106,2	104,2	91,9	91,9	88,9
3	89,9	92,9	86,9	100,4	101,4	106,4	102,4	102,4	101,4	101,2	105,2	100,2	93,9	93,9	92,9
4	89,9	91,9	85,9	99,4	100,4	106,4	99,4	100,4	99,4	100,2	105,2	101,2	96,9	92,9	90,9
5	87,9	89,9	84,9	98,4	102,4	102,4	102,4	100,4	98,4	101,2	104,2	100,2	97,9	89,9	90,9

Tab. 1 – 2 Působící síly při soustružení s pochlazeným vzduchem

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH															
.	1 plocha F [N]			2 plocha F [N]			3 plocha F [N]			4 plocha F [N]			5 plocha F [N]		
č.m.	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3
1	180,5	182,5	182,5	192	197	192,5	187,5	197	199	187,5	182	192	174,5	183	176,5
2	181,5	181	181	193	197	194	188	197	200	189	184	190	174	183,5	176,5
3	181	181	182,5	192	197,5	194,5	190,5	197,5	201	187,5	185	191	174	180,5	179
4	178,5	183	182,5	192	196	194	190	196	200	187,5	185,5	193,5	174	184,5	177
5	179,5	183,5	182,5	190,5	197,5	195	192	201,5	196,5	187,5	188	191,5	175,5	185	180
č.m.	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3
1	68	71	70,5	68,5	71	68,5	57	57	57	68,5	67	68	45,5	47,5	44,5
2	69,5	71	71	69	69	71	58	58	58	69,5	68	68,5	44,5	49	45,5
3	67,5	70	71	67,5	71	71	59	59	59	67,5	65,5	68	44	49,5	45
4	69	71,5	72	69	69,5	71	60	60,5	55,5	66	69	69,5	45,5	49	47
5	68	72,5	73	70,5	70	72	59	59	54,5	67	69,5	67	48	49	46,5
č.m.	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3
1	86,8	90,8	93,8	84,5	88,5	86,5	92,6	99,6	99,6	88,3	87,3	90,3	73,7	81,7	78,7
2	85,8	91,8	93,8	83,5	87,5	87,5	94,6	100,6	101,6	90,3	88,3	91,3	74,7	83,7	79,7
3	87,8	92,8	95,8	84,5	87,5	88,5	94,6	98,6	100,6	89,3	89,3	94,3	75,7	81,7	81,7
4	88,8	92,8	93,8	83,5	86,5	87,5	96,6	97,6	98,6	91,3	87,3	91,3	76,7	79,7	81,7
5	88,8	90,8	90,8	84,5	88,5	87,5	94,6	97,6	99,6	89,3	90,3	90,3	72,7	84,7	79,7

Tab. 1 – 3 Působící síly při soustružení se zkvalněným CO₂

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKALNĚNÝ CO ₂															
	1 plocha F [N]			2 plocha F [N]			3 plocha F [N]			4 plocha F [N]			5 plocha F [N]		
č.m.	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3
1	207,5	215	212,5	191,5	186,5	195	193	198,5	193	202	199	203,5	176,5	187	176,5
2	210	216,5	211	192	186	194	194,5	198,5	191	202	200	203	177,5	186,5	177
3	208	216,5	207,5	190	186	191	193	197	195	203,5	200,5	204,5	178,5	188,5	175,5
4	206,5	214,5	212,5	191	185	193,5	193	198	193,5	203,5	199	201,5	177	189	174
5	207,5	214	210,5	191,5	185,5	192,5	194	201,5	192,5	202	198,5	205,5	178,5	189,5	173
č.m.	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3
1	55	58,5	55,5	50,5	49,5	49	53	56	52	55,5	56,5	58,5	39	39,5	38
2	57	55,5	55,5	52	49	49,5	54,5	54,5	54	55,5	56	61	39	41,5	39,5
3	55	55	54	50,5	52	49,5	56	55,5	55	58,5	59	62,5	40,5	42,5	38,5
4	53,5	56,5	56,5	52,5	49,5	48	53	57,5	56,5	57,5	58	57,5	40	44	35
5	54,5	56	53	52,5	51,5	48,5	54	56	54	55,5	58,5	60,5	39,5	44,5	36,5
č.m.	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3
1	93,6	99,6	96,6	109,6	109,6	113,6	97,5	102,5	100,5	93,1	94,1	95,1	84	100	84
2	93,6	96,6	97,6	111,6	110,6	115,6	97,5	101,5	97,5	95,1	94,1	92,1	85	100	84
3	95,6	97,6	94,6	112,6	107,6	116,6	92,5	99,5	99,5	94,1	93,1	91,1	86	99	86
4	94,6	95,6	96,6	104,6	107,6	111,6	94,5	98,5	101,5	94,1	92,1	93,1	88	98	81
5	94,6	100,6	95,6	107,6	105,6	113,6	95,5	102,5	98,5	95,1	95,1	95,1	85	95	81

Tab. 1 – 4 Působící síly při soustružení se zkvalněným dusíkem

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKALNĚNÝ DUSÍK															
	1 plocha F [N]			2 plocha F [N]			3 plocha F [N]			4 plocha F [N]			5 plocha F [N]		
č.m.	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3
1	158,5	152	149,5	161,5	154,5	155	147	153	145	151	149,5	143	150,5	153,5	147
2	158	151,5	149,5	164,5	154	155	147	151,5	146	151,5	147	142	153,5	149	147
3	159,5	152	149,5	162	153,5	156	147	150	146	145,5	146	144	151,5	151,5	147
4	159	153	150	159	156	158	146	149	145,5	152,5	145	145	149	151	144,5
5	159	152	147,5	164,5	153,5	154,5	146,5	152	143,5	150,5	146	141,5	152	151	146,5
č.m.	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3
1	53,5	49	55	51	49	54,5	50,5	55,5	55	50	51	65,5	55,5	58,5	59
2	52,5	50,5	57,5	52	49,5	52,5	52,5	55,5	56,5	51,5	50,5	62,5	56	58,5	58
3	53,5	48,5	60,5	53,5	49,5	56,5	52	55	56,5	52	50	60	55,5	61	56,5
4	50,5	49	54,5	51	50,5	58	51,5	54,5	55,5	50	50	57	56,5	58,5	57
5	53	50,5	54,5	52	51,5	54	53,5	57	57,5	50	53,5	54,5	56,5	57	59
č.m.	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3
1	61,6	53,6	58,6	55,1	51,1	55,1	60,8	59,8	59,8	64,9	59,9	66,9	67,6	65,6	60,6
2	62,6	54,6	58,6	55,1	53,1	52,1	59,8	61,8	60,8	62,9	59,9	63,9	68,6	66,6	62,6
3	58,6	56,6	53,6	57,1	50,1	53,1	58,8	58,8	58,8	63,9	62,9	59,9	65,6	68,6	63,6
4	59,6	53,6	58,6	56,1	48,1	51,1	59,8	56,8	56,8	62,9	58,9	60,9	65,6	64,6	65,6
5	60,6	54,6	55,6	62,1	50,1	52,1	62,8	59,8	58,8	65,9	59,9	63,9	69,6	63,6	62,6

Tab. 1 – 5 Působící síly při soustružení s PK HOCUT 795B

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795B															
č.m.	1 plocha F [N]			2 plocha F [N]			3 plocha F [N]			4 plocha F [N]			5 plocha F [N]		
	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3
1	143	138	145,5	126	123,5	120,5	139	132,5	138	140	139	127,5	135,5	134,5	129,5
2	143,5	136	144	127	123	121	138	133	139,5	138	139,5	126	134	133	128,5
3	142	135	143,5	126	124	122	138	135,5	132	141	138	129,5	135,5	132	130
4	143	138	144	126	121	121,5	140,5	135	141,5	141	141	128	133,5	134,5	130
5	143,5	137,5	141,5	125,5	122,5	123	138	131,5	139	139,5	141,5	128,5	133,5	135	132,5
č.m.	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3
1	54	52	55,5	38,5	38	37	44	43,5	45	49	50	50	48,5	49	46,5
2	54	53,5	54	38	38	37	45	44	42,5	51	52	50,5	49	49	48
3	52	53	54,5	38	35	38,5	46,5	44,5	43,5	51,5	51	52,5	49,5	47	49,5
4	54	55,5	55,5	38	39	36	44,5	45	43	52	51,5	51	49	49	47,5
5	55,5	52	52,5	40	38	36	45	44,5	46	50,5	51,5	48	50,5	51	46
č.m.	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3
1	58,5	54,5	59,5	72,7	68,7	66,7	61,2	57,2	60,2	57	57	46	56,5	55,5	55,5
2	61,5	58,5	62,5	69,7	68,7	67,7	62,2	58,2	58,2	55	48	55	59,5	57,5	59,5
3	59,5	59,5	63,5	73,7	69,7	68,7	59,2	56,2	61,2	57	54	50	61,5	58,5	57,5
4	54,5	55,5	62,5	72,7	67,7	69,7	57,2	57,2	64,2	55	60	48	56,5	59,5	60,5
5	59,5	57,5	60,5	69,7	65,7	63,7	59,2	54,2	66,2	53	57	47	58,5	54,5	55,5

Tab. 1 – 6 Působící síly při soustružení s PK EOPS 1030

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030															
č.m.	1 plocha F [N]			2 plocha F [N]			3 plocha F [N]			4 plocha F [N]			5 plocha F [N]		
	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3	Fz1	Fz2	Fz3
1	152	144,5	142,5	137	140,5	144	147	140	143,5	150	140	142	140,5	141	136
2	153	146	149,5	141,5	140,5	139,5	148	140	141,5	150	138,5	145,5	137	142,5	135
3	152,5	146	149	140	140	142,5	148,5	136,5	143	151,5	141	144,5	142,5	142,5	135
4	152,5	147,5	146	138,5	142	144,5	152	138,5	141	152	138,5	145,5	140	141,5	138
5	151,5	147,5	147,5	140	141	143	147	141	144,5	150,5	137	144,5	139,5	141	141,5
č.m.	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3	Fy1	Fy2	Fy3
1	33,5	30,5	32,5	39,5	41,5	40	40,5	39,5	39	42	39	44,5	53	51,5	52,5
2	35	32	31,5	38,5	40	38,5	43	41,5	42,5	43,5	37,5	43	53,5	53	52,5
3	36	33	33	36	37,5	39,5	42	39	41,5	41,5	39	41,5	52,5	57	53,5
4	35	33	33,5	35,5	40,5	38	40	41	42,5	40,5	42	44,5	54	53,5	52,5
5	34,5	31	31,5	37,5	38,5	38	42	38,5	42,5	45	40	40,5	49,5	54,5	54
č.m.	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3	Fx1	Fx2	Fx3
1	61,8	54,8	55,8	66,4	66,4	69,4	53,1	45,1	47,1	51,9	44,9	47,9	57,5	55,5	50,5
2	60,8	53,8	57,8	65,4	66,4	72,4	52,1	46,1	49,1	50,9	45,9	49,9	57,5	54,5	55,5
3	62,8	54,8	54,8	67,4	69,4	68,4	51,1	47,1	48,1	48,9	47,9	47,9	51,5	58,5	51,5
4	63,8	54,8	54,8	62,4	67,4	66,4	53,1	45,1	51,1	51,9	46,9	45,9	55,5	54,5	49,5
5	62,8	57,8	57,8	67,4	64,4	71,4	51,1	47,1	49,1	50,9	49,9	49,9	49,5	51,5	51,5

Trvanlivost řezného nástroje

Tab. 1 – 13 Opotřebení VB při soustružení za sucha

SOUSTRUŽENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA									
L [mm]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
VB ₁ [mm]	0	0,14	0,14	0,18	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23
VB ₂ [mm]	0	0,14	0,18	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24
VB ₃ [mm]	0	0,16	0,19	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Tab. 1 – 14 Opotřebení VB při soustružení podchlazeným vzduchem

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH									
L [mm]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
VB ₁ [mm]	0	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14
VB ₂ [mm]	0	0,08	0,10	0,10	0,11	0,13	0,13	0,13	0,14
VB ₃ [mm]	0	0,08	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13

Tab. 1 – 15 Opotřebení VB při soustružení se zkapalněným CO₂

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO ₂									
L [mm]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
VB ₁ [mm]	0	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12
VB ₂ [mm]	0	0,07	0,09	0,10	0,10	0,10	0,12	0,12	0,12
VB ₃ [mm]	0	0,07	0,08	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13

Tab. 1 – 16 Opotřebení VB při soustružení se zkapalněným dusíkem

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK									
L [mm]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
VB ₁ [mm]	0	0,08	0,08	0,09	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11
VB ₂ [mm]	0	0,07	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12
VB ₃ [mm]	0	0,08	0,09	0,09	0,09	0,11	0,11	0,13	0,13

Tab. 1 – 17 Opotřebení VB při soustružení s PK HOCUT 795B

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795 B									
L [mm]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
VB ₁ [mm]	0	0,09	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15
VB ₂ [mm]	0	0,07	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12	0,14
VB ₃ [mm]	0	0,10	0,10	0,12	0,12	0,13	0,13	0,15	0,15

Tab. 1 – 18 Opotřebení VB při soustružení s PK EOPS 1030

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030									
L [mm]	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
VB ₁ [mm]	0	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,14	0,15
VB ₂ [mm]	0	0,06	0,07	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13
VB ₃ [mm]	0	0,09	0,10	0,11	0,11	0,13	0,14	0,14	0,15

Drsnost povrchu

Tab. 1 – 19 Drsnosti povrchu při soustružení za sucha

SOUSTRUŽENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA															
m.č.1.	1 plocha R [μm]			2 plocha R [μm]			3 plocha R [μm]			4 plocha R [μm]			5 plocha R [μm]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	2,354	2,213	2,263	2,453	2,338	2,522	2,642	2,622	2,343	2,238	2,157	2,207	2,142	2,119	2,379
Rz	12,096	12,113	12,3	14,224	12,968	14,851	13,82	14,253	12,65	13,257	12,328	12,705	12,594	11,957	12,555
Rt	16,766	17,357	14,952	19,566	16,363	22,85	17,301	19,716	15,615	21,122	17,026	18,098	17,647	15,195	15,692
m.č.2.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	2,679	2,267	2,49	2,147	2,477	2,352	2,503	2,552	2,418	2,288	2,404	2,315	1,929	2,198	2,323
Rz	14,643	12,09	13,136	11,717	13,023	13,91	12,81	13,693	14,054	12,269	13,228	12,173	11,615	11,752	13,857
Rt	18,146	15,077	19,839	15,222	15,977	18,043	16,925	18,298	16,695	14,743	17,588	15,329	15,855	15,074	19,759
m.č.3.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	2,144	2,274	2,367	2,179	2,256	2,247	2,237	2,466	2,919	2,037	2,267	2,457	2,082	2,209	2,195
Rz	11,405	12,842	13,022	12,317	12,297	12,189	13,371	14,851	14,971	12,093	12,572	13,634	12,318	12,432	10,925
Rt	15,647	17,112	15,895	16,669	15,871	16,86	18,245	19,594	18,813	15,254	15,854	17,059	16,559	17,199	14,597
m.č.4.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	2,348	2,381	2,345	2,269	2,297	2,306	2,163	2,284	2,784	2,193	2,218	2,342	2,167	1,994	2,13
Rz	13,804	12,503	13,026	12,083	12,98	12,197	12,321	13,934	15,293	13,043	13,571	13,43	12,309	11,669	11,21
Rt	18,096	16,676	16,351	16,351	17,213	15,346	16,348	17,51	19,646	17,748	18,997	17,704	15,416	15,841	14,764
m.č.5.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	2,112	2,028	2,411	2,314	2,591	2,629	2,267	2,306	2,489	2,09	1,982	2,125	2,075	2,304	2,504
Rz	12,235	10,908	13,227	12,516	14,333	15,221	12,748	13,21	13,928	12,335	11,292	12,345	12,67	11,81	13,076
Rt	15,16	14,126	15,847	15,849	21,976	22,274	17,344	18,992	19,601	16,04	14,882	17,04	18,044	13,83	16,29

Tab. 1 – 20 Drsnosti povrchu při soustružení s podchlazeným vzduchem

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH															
m.č.1.	1 plocha R [μm]			2 plocha R [μm]			3 plocha R [μm]			4 plocha R [μm]			5 plocha R [μm]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,874	1,947	1,954	1,996	1,953	2,056	2,135	2,295	2,28	2,259	2,089	2,226	2,419	2,218	2,402
Rz	11,3	11,21	11,77	11,7	13,45	12,6	13,56	14,33	13,1	12,78	13,29	12,63	14,73	13,13	13,98
Rt	14,56	15,15	15,67	15,47	17,94	17,6	16,99	18,59	17,09	16,36	18,29	15,21	19,57	16,72	16,74
m.č.2.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,692	1,682	1,853	2,002	2,282	2,215	2,1	2,257	2,174	2,269	2,343	2,338	2,383	2,437	2,524
Rz	10,25	10,51	11,94	11,43	12,84	13,11	12,12	13,25	12,48	13,56	14,03	13,3	15,04	13,36	14,66
Rt	12,96	13,41	15,63	14,65	16,26	16,74	16,15	17,88	16,79	17,13	18,65	18,93	21,5	17,41	22,21
m.č.3.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,803	1,787	1,947	1,897	2,261	2,147	2,194	2,153	2,299	2,215	2,38	2,463	2,315	2,321	2,146
Rz	11,91	11,53	12	11,42	13,43	13,69	12,65	12,8	13,64	12,97	13,34	13,91	14,89	13,01	13,01
Rt	15,62	16,26	17,31	15,07	19,24	22,97	16,24	17,09	17,68	15,84	17,97	19,01	21,36	16,09	16,88
m.č.4.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,888	2,137	2,011	1,891	2,24	2,421	2,103	2,223	2,276	2,22	2,406	2,284	2,214	2,288	2,286
Rz	12,7	12,44	11,61	12,94	14	14,31	12,6	13,13	13,18	12,51	13,22	13,36	13,66	12,42	13,25
Rt	18,47	19,3	14,72	20,45	19,05	25,02	17,63	16,53	20,07	15,21	16,88	17,52	21,38	15,93	17,27
m.č.5.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,684	1,789	2,088	1,988	2,047	2,115	2,109	2,356	2,188	2,121	2,347	2,425	2,247	2,401	2,567
Rz	10,14	10,92	12,81	13,17	12,36	12,15	13,62	13,9	13,12	12,7	14,03	13,44	13,62	13,29	14,11
Rt	13,72	14,1	16,71	17,14	15,85	15,29	18,17	18,25	17,27	16,2	17,85	17,28	18,44	17,1	17,56

Tab. 1 – 21 Drsnosti povrchu při soustružení se zkapačným CO₂

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO ₂															
	1 plocha R [μm]			2 plocha R [μm]			3 plocha R [μm]			4 plocha R [μm]			5 plocha R [μm]		
m.č.1.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	2,608	2,695	2,487	2,789	2,563	2,624	2,056	2,115	2,018	2,019	2,103	2,116	2,087	2,162	1,974
Rz	14,91	15,54	14,22	16,23	14,05	13,76	12,17	13,16	12,62	12,13	13,27	12,95	12,53	12,62	11,61
Rt	21,75	20,26	20,82	20,38	18,48	17,31	15,4	17,1	16,32	15,66	17,16	16,97	15,4	17,72	15,18
m.č.2.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	3,018	2,971	2,513	2,505	2,459	2,322	2,246	2,155	2,023	2,244	2	2,132	2,432	2,071	2,009
Rz	16,84	15,61	14,57	14,44	13,58	14,13	14,43	11,88	12,06	12,93	11,84	13,61	14,69	13,6	12,9
Rt	21,23	18,56	18,03	17,89	17,46	20,62	21,9	15,38	15,15	16,63	15,12	19,74	22,04	19,08	20,91
m.č.3.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	2,785	2,84	2,524	2,638	2,806	2,671	2,147	2,039	2,349	2,145	2,135	2,103	2,61	2,117	2,106
Rz	15,25	14,66	13,56	15,67	16,07	15,13	12,01	12,75	14,12	12,6	12,55	12,62	15,54	13,47	13,1
Rt	20,68	18,76	17,66	21,67	21,31	19,69	15,77	18,5	18,56	16,67	16,49	15,61	22,79	18,8	18,12
m.č.4.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	2,891	3,09	2,325	2,489	2,442	2,371	2,182	2,132	2,058	2,395	2,177	1,978	2,159	2,092	2,004
Rz	16,78	17,64	13,85	14,64	13,45	14,03	12,22	12,86	12,29	14,31	12,69	11,66	13,79	12,5	12,62
Rt	22,81	22,56	18,12	18,85	18,37	19,32	16,23	16,15	16,14	18,71	15,86	14,57	20,08	17,5	16,69
m.č.5.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	3,043	2,857	2,805	2,77	2,673	2,44	2,069	1,958	1,952	2,246	2,076	2,068	2,123	2,184	2,182
Rz	18,03	15,64	17,48	15,05	14,61	13,66	12,1	11,62	11,98	13,75	12,1	11,99	12,5	13,12	13,38
Rt	25,56	20,34	24,04	20,21	19,32	17,61	15,45	15,02	15,22	19,09	15,76	15,18	16,35	18,53	17,19

Tab. 1 – 22 Drsnosti povrchu při soustružení se zkapačným dusíkem

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK															
	1 plocha R [μm]			2 plocha R [μm]			3 plocha R [μm]			4 plocha R [μm]			5 plocha R [μm]		
m.č.1.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	2,249	2,276	2,299	2,415	2,159	2,172	2,077	2,037	1,908	2,197	1,88	1,961	2,208	2,203	2,091
Rz	12,65	13,7	14,39	13,5	12,04	12,25	13,21	11,11	11,71	11,57	10,9	12,55	12,85	12,59	11,19
Rt	14,87	21,2	19,58	20,47	15,62	15,21	16,76	14,83	15,3	15,64	14,28	15,31	18,37	15,24	13,93
m.č.2.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	2,276	2,113	1,955	2,245	2,245	2,206	1,859	1,96	1,873	1,902	1,727	1,82	2,129	2,289	2,138
Rz	13,7	13,09	11,96	12,94	14,89	12,37	9,857	12,75	10,97	11,42	11,34	10,95	11,29	12,54	10,79
Rt	21,2	17,72	15,6	17,25	22,15	15,64	14,14	15,73	13,25	15,6	15,47	17,04	14,41	16,69	13,08
m.č.3.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,975	2,2	2,147	2,377	2,422	2,255	2,03	1,803	2,003	2,195	1,98	1,91	2,082	2,367	2,076
Rz	12,17	13,37	12,67	13,47	14,83	14,56	11,21	12,13	11,57	12,51	10,99	10,62	12,46	13,33	11,5
Rt	16,24	16,48	16,32	17,21	18,17	22,88	14,81	17,06	16,05	16,07	14,26	13,79	16,66	17,2	15,08
m.č.4.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	2,374	2,436	2,036	2,531	2,352	2,352	1,78	1,568	1,705	1,853	1,735	1,784	2,131	2,029	1,95
Rz	13,77	15,02	11,48	16,06	13,3	14,03	10,88	9,63	11,91	10,43	10,23	10,58	14,32	11,38	11,13
Rt	17,42	20,45	18,16	24,76	16,53	17,97	15,53	15,05	15,11	14,33	12,84	14,22	19,11	15,05	13,63
m.č.5.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	2,626	2,113	2,202	2,27	1,997	1,932	2,265	2,334	2,236	1,803	1,552	1,734	2,161	1,967	2,138
Rz	15,18	13,06	12,78	12,72	11,93	11,15	12,49	12,96	11,96	10,66	9,652	10,8	11,44	11,85	13,35
Rt	22,83	17,72	16,12	15,11	14,96	16,09	14,65	17,41	16,13	14,85	11,8	15,32	14,15	14,99	17,52

Tab. 1 – 23 Drsnosti povrchu při soustružení s PK HOCUT 795 B

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – HOCUT 795 B															
m.č.1.	1 plocha R [μm]			2 plocha R [μm]			3 plocha R [μm]			4 plocha R [μm]			5 plocha R [μm]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,293	1,16	1,281	1,351	1,323	1,406	1,281	1,564	1,523	1,183	1,438	1,684	1,327	1,53	1,591
Rz	8,611	6,758	8,715	8,908	8,483	8,054	7,402	9,406	9,083	6,403	9,415	9,634	7,989	10,28	10,1
Rt	11,89	8,981	12,33	12,78	13,72	9,341	9,945	14,02	11,04	7,78	11,41	13,46	10,95	13,82	13,27
m.č.2.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,412	1,227	1,501	1,439	1,458	1,551	1,303	1,358	1,305	1,113	1,277	1,538	1,38	1,464	1,533
Rz	8,309	8,226	10,17	8,637	8,948	9,833	7,634	9,055	7,215	6,403	9,268	9,33	8,167	8,981	9,456
Rt	11,23	10,93	14,09	11,57	13,58	12,1	10,96	11,53	8,621	7,199	15,12	16,6	11,22	15,29	13,89
m.č.3.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,138	1,292	1,631	1,323	1,539	1,687	1,231	1,23	1,413	1,329	1,463	1,413	1,336	1,528	1,343
Rz	6,504	7,617	9,797	8,308	10,5	10,37	7,857	8,641	9,009	8,715	9,127	8,97	7,634	9,914	7,969
Rt	7,876	10,45	12,6	10,29	13,54	14,65	11,08	12,31	12,8	9,91	12,07	13,36	11,09	16,07	10,77
m.č.4.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,127	1,221	1,407	1,411	1,56	1,686	1,378	1,395	1,336	1,416	1,418	1,404	1,276	1,405	1,521
Rz	6,611	7,532	9,127	8,103	10,04	10,5	9,65	10,5	9,845	8,635	8,934	9,154	7,57	8,219	10,91
Rt	7,195	9,716	13,6	11,29	15,07	14,12	17,94	14,59	12,48	11,67	10,44	14,74	10,39	11,09	15,41
m.č.5.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,253	1,208	1,402	1,283	1,365	1,498	1,316	1,242	1,26	1,442	1,562	1,39	1,144	1,299	1,357
Rz	7,612	6,991	8,15	7,527	8,549	9,932	8,799	8,301	8,305	8,615	8,702	8,418	7,602	8,446	8,557
Rt	8,973	8,273	11,02	8,51	12,54	14,14	12,54	12,28	12,75	11,52	10,79	11,46	10,68	10,55	12,59

Tab. 1 – 24 Drsnosti povrchu při soustružení s PK EOPS 1030

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030															
m.č.1.	1 plocha R [μm]			2 plocha R [μm]			3 plocha R [μm]			4 plocha R [μm]			5 plocha R [μm]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,341	1,45	1,541	1,382	1,391	1,389	1,266	1,355	1,39	1,372	1,349	1,569	1,362	1,329	1,525
Rz	8,382	10,08	8,446	9,221	7,651	8,737	8,4	8,343	8,194	8,075	8,605	10,06	9,308	8,676	9,803
Rt	10,23	16,36	11,27	13,79	12,91	11,33	10,75	10,58	11,84	10,66	13,55	14,31	13,57	13,62	13,16
m.č.2.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,268	1,21	1,452	1,285	1,287	1,335	1,337	1,377	1,291	1,459	1,265	1,456	1,219	1,517	1,77
Rz	7,636	7,846	8,147	7,761	8,52	7,856	8,629	7,51	7,34	8,576	8,911	9,019	8,026	9,565	10,71
Rt	9,994	10,73	10,45	10,45	12,23	10,58	11,63	9,743	9,01	10,85	15,35	11,76	10,29	11,91	13,45
m.č.3.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,341	1,438	1,555	1,304	1,204	1,318	1,306	1,22	1,217	1,157	1,259	1,223	1,336	1,442	1,71
Rz	8,2	9,014	8,828	7,453	7,401	8,585	7,579	7,548	7,458	7,862	7,962	7,759	8,228	8,077	11,9
Rt	12,25	10,95	10,45	9,143	10,26	11,85	9,463	9,676	11,19	10,36	10,7	11,28	12,21	10,59	18,38
m.č.4.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,153	1,498	1,446	1,255	1,272	1,134	1,274	1,406	1,364	1,286	1,261	1,33	1,303	1,24	1,629
Rz	6,561	9,091	7,832	7,561	7,848	7,098	7,554	8,014	8,086	8,305	8,375	8,479	7,701	8,614	9,896
Rt	8,099	14,49	9,402	9,721	9,818	9,66	10,51	9,831	9,82	15,06	12,57	12,44	8,8	12,65	14,42
m.č.5.	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	1,12	1,468	1,482	1,253	1,232	1,357	1,385	1,301	1,531	1,394	1,366	1,214	1,326	1,355	1,472
Rz	8,047	9,499	8,366	8,339	8,274	8,282	8,524	8,298	9,971	9,699	8,891	7,355	8,309	8,374	9,336
Rt	12,4	11,71	10,45	12,89	12,76	14,16	12,38	11,27	15,47	16,28	14,47	9,039	14,64	10,25	12,08

Rozměrová přesnost – odchylka průměru

Tab. 1 – 25 Odchylky po soustružení za sucha

SOUSTRUŽENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA															
č.m.	1 plocha			2 plocha			3 plocha			4 plocha			5 plocha		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0,013	0	0,001	0,016	0,008	0,001	0,013	0,004	0,003	0,021	0,005	0,003	0,012	0,005	0,004
2	0,016	0,003	0,003	0,014	0,007	0	0,014	0,003	0,002	0,014	0,004	0,002	0,013	0,007	0,001
3	0,016	0,003	0,008	0,013	0,002	0,004	0,013	0,005	0	0,016	0,005	0,001	0,009	0,006	0,004
4	0,017	0,002	0,004	0,014	0,007	0,005	0,014	0,004	0,001	0,013	0,005	0,002	0,011	0,004	0
5	0,015	0,004	0,004	0,012	0,002	0,003	0,01	0,004	0,003	0,012	0,001	0	0,011	0,004	0,003

Tab. 1 – 26 Odchylky po soustružení podchlazeným vzduchem

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH															
č.m.	1 plocha			2 plocha			3 plocha			4 plocha			5 plocha		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0,01	0,004	0,002	0,015	0,016	0,016	0,014	0,008	0,005	0,011	0,003	0,001	0,018	0,009	0
2	0,011	0,003	0,002	0,009	0,004	0,001	0,016	0,006	0,001	0,013	0,003	0,001	0,017	0,01	0,004
3	0,013	0,005	0,002	0,01	0,004	0,001	0,014	0,007	0	0,014	0,005	0,002	0,017	0,007	0,003
4	0,011	0,002	0	0,012	0,003	0,001	0,011	0,005	0,001	0,012	0,002	0	0,019	0,008	0,004
5	0,01	0,004	0	0,009	0,002	0	0,015	0,007	0,003	0,016	0,005	0,001	0,017	0,008	0,004

Tab. 1 – 27 Odchylky po soustružení se zkapalněným CO₂

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO ₂															
č.m.	1 plocha			2 plocha			3 plocha			4 plocha			5 plocha		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0,011	0,004	0	0,01	0,005	0,001	0,008	0,003	0,001	0,016	0,006	0,007	0,018	0,006	0,003
2	0,012	0,007	0,005	0,009	0,004	0	0,011	0,006	0	0,013	0,003	0	0,021	0,011	0,002
3	0,009	0,005	0,001	0,009	0,004	0	0,009	0,003	0,001	0,012	0,006	0,001	0,012	0,007	0,002
4	0,012	0,008	0,002	0,009	0,003	0,001	0,009	0,001	0	0,012	0,008	0,004	0,011	0,004	0
5	0,011	0,006	0,006	0,008	0,002	0,001	0,008	0,002	0,001	0,013	0,006	0,002	0,01	0,005	0,001

Tab. 1 – 28 Odchylky po soustružení se zkapalněným dusíkem

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK															
č.m.	1 plocha			2 plocha			3 plocha			4 plocha			5 plocha		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0	0,002	0,001	0,003	0,002	0,001	0	0,001	0,002	0,002	0	0,002	0,007	0,007	0,001
2	0,001	0,002	0,002	0,003	0,002	0,003	0,001	0,002	0,003	0,004	0,002	0	0,007	0,004	0,001
3	0,003	0,002	0,003	0,001	0,001	0	0	0,002	0	0,003	0,003	0,003	0,005	0,005	0,001
4	0,001	0,002	0,005	0,001	0,002	0,002	0,003	0,004	0,004	0,002	0	0,002	0,006	0,005	0
5	0,003	0,001	0,002	0,005	0,003	0,002	0,003	0,001	0,003	0,005	0,003	0,004	0,007	0,006	0

Tab. 1 – 29 Odchyly po soustružení s PK HOCUT 795B

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795B															
č.m.	1 plocha			2 plocha			3 plocha			4 plocha			5 plocha		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0,009	0,004	0,001	0,005	0,004	0	0,01	0,007	0,005	0,004	0,001	0	0,005	0,004	0
2	0,007	0,003	0,002	0,006	0,003	0,002	0,008	0,007	0,006	0,002	0,002	0	0,006	0,004	0,001
3	0,007	0,003	0,002	0,004	0,002	0,001	0,007	0,002	0	0,003	0,002	0,001	0,006	0,004	0,001
4	0,006	0,002	0	0,004	0,003	0,001	0,008	0,005	0,003	0,002	0,001	0	0,005	0,004	0,003
5	0,006	0,003	0	0,005	0,003	0,001	0,009	0,005	0,003	0,004	0,002	0,001	0,007	0,006	0,004

Tab. 1 – 30 Odchyly po soustružení s PK EOPS 1030

SOUSTRUŽENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030															
č.m.	1 plocha			2 plocha			3 plocha			4 plocha			5 plocha		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	0,022	0,014	0,004	0,006	0,001	0	0,007	0,004	0	0,005	0,002	0,001	0,006	0,004	0,001
2	0,024	0,013	0,005	0,004	0,003	0	0,008	0,003	0,002	0,006	0,001	0,001	0,006	0,003	0,001
3	0,02	0,012	0	0,005	0,002	0,001	0,008	0,005	0,001	0,006	0,003	0,002	0,006	0,004	0,002
4	0,021	0,012	0,001	0,006	0,002	0	0,007	0,004	0	0,005	0,003	0	0,005	0,003	0,001
5	0,019	0,013	0,001	0,007	0,003	0	0,006	0,002	0	0,005	0,003	0,002	0,004	0,002	0

Příloha č. 2 – Tabulky s měřeními hodnotami z experimentů při broušení

Teplota

Tab. 2 – 7 Maximální teploty při broušení za sucha

BROUŠENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA				
Měření č. / Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 T4, T5 [°C]	T6 [°C]
1	48,0	53,6	58,3	30,0
2	59,8	68,5	72,0	34,2
3	56,1	63,8	62,5	33,4
4	47,3	47,7	55,9	29,7
5	48,4	48,9	53,9	30,2

Tab. 2 – 8 Maximální teploty při broušení s podchlazeným vzduchem

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH				
Měření č. / Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 T4, T5 [°C]	T6 [°C]
1	53,1	51,4	59,1	29,1
2	51,9	51,6	58,8	29,3
3	50,9	53,8	57,7	28,6
4	51,8	53,6	56,5	28,1
5	51,4	54,8	59,4	29,3

Tab. 2 – 9 Maximální teploty při broušení se zkapalněným CO₂

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO₂				
Měření č. / Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 T4,T5 [°C]	T6 [°C]
1	50,9	45,2	43,6	30,1
2	53,0	50,8	47,1	32,1
3	51,8	50,3	47,3	32,2
4	51,2	48,0	45,8	31,6
5	51,0	52,3	46,3	30,6

Tab. 2 – 10 Maximální teploty při broušení se zkapalněným dusíkem

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK				
Měření č. / Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 T4,T5 [°C]	T6 [°C]
1	55,5	52,4	41,7	31,7
2	46,7	54,8	52,8	27,7
3	53,8	56,2	57,9	29,0
4	55,4	52,7	43,2	33,3
5	57,6	60,4	46,2	33,9

Tab. 2 – 11 Maximální teploty při broušení PK HOCUT 795B

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795 B				
Měření č. / Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 T4,T5 [°C]	T6 [°C]
1	43,4	24,0	38,4	20,9
2	42,2	25,1	40,1	21,0
3	46,6	25,9	40,1	21,3
4	34,6	28,6	40,1	21,0
5	34,1	26,3	36,6	21,7

Tab. 2 – 12 Maximální teploty při broušení PK EOPS 1030

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030				
Měření č. / Termočlánek	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 T4,T5 [°C]	T6 [°C]
1	42,2	34,5	46,8	24,3
2	50,9	41,5	50,7	24,8
3	48,5	46,4	45,5	22,9
4	50,1	43,6	46,9	23,2
5	51,3	48,4	50,5	23,7

Působící síla

Tab. 2 – 1 Působící síly při broušení za sucha

BROUŠENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA					
přejezd	Fz1 [N]	Fz2 [N]	Fz3 [N]	Fz4 [N]	Fz5 [N]
1	266	244	261	258	252
2	119	126	130	127	116
3	92	94	103	92	85
4	45	55	37	38	45
5	57	49	49	50	42
6	17	20	17	16	18
7	29	35	30	24	23
8	13	10	11	9	11
9	27	23	27	17	20
10	7	9	7	7	7
11	17	14	15	15	14
12	6	6	6	7	6
13	12	13	10	11	12
14	5	4	5	5	6
Měření č.	1	2	3	4	5
Průměrná Fx [N]	32,1	32,5	33,3	32,4	32,1
Průměrná Fz [N]	82,7	80,3	75,3	78,1	81,6

Tab. 2 – 2 Působící síly při broušení s pochlazeným vzduchem

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH					
přejezd	Fz1 [N]	Fz2 [N]	Fz3 [N]	Fz4 [N]	Fz5 [N]
1	235	249	219	220	238
2	126	110	126	98	113
3	71	79	78	74	78
4	29	26	29	26	29
5	37	38	34	28	39
6	15	13	13	9	13
7	15	23	19	20	20
8	6	5	9	7	6
9	11	16	17	10	10
10	6	5	5	6	7
11	6	11	11	9	8
12	4	3	3	4	4
13	5	6	4	6	5
14	3	2	2	3	2
Měření č.	1	2	3	4	5
Průměrná Fx [N]	30,9	29,3	29,8	28,3	29,9
Průměrná Fz [N]	73,2	70,0	68,2	63,3	69,6

Tab. 2 – 3 Působící sily při broušení se zkapalněným CO₂

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ CO₂					
<i>přejezd</i>	<i>Fz1 [N]</i>	<i>Fz2 [N]</i>	<i>Fz3 [N]</i>	<i>Fz4 [N]</i>	<i>Fz5 [N]</i>
1	246	259	257	266	249
2	131	156	147	143	155
3	88	87	78	81	70
4	23	26	33	29	34
5	29	25	43	26	31
6	9	12	17	11	15
7	21	21	26	19	29
8	7	5	7	6	10
9	13	9	17	18	19
10	7	3	4	4	6
11	7	6	7	9	10
12	5	4	3	3	6
13	4	5	3	3	6
14	3	2	1	1	2
<i>Měření č.</i>	1	2	3	4	5
<i>Průměrná Fx [N]</i>	29,4	31,4	28,9	31,9	32,3
<i>Průměrná Fz [N]</i>	74,3	77,9	77,3	75,9	79,2

Tab. 2 – 4 Působící sily při broušení se zkapalněným dusíkem

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK					
<i>přejezd</i>	<i>Fz1 [N]</i>	<i>Fz2 [N]</i>	<i>Fz3 [N]</i>	<i>Fz4 [N]</i>	<i>Fz5 [N]</i>
1	290	317	320	359	331
2	180	174	233	260	284
3	116	112	126	123	190
4	66	61	118	74	94
5	54	51	71	64	70
6	29	34	37	32	31
7	27	37	47	28	28
8	14	25	35	14	24
9	19	16	26	15	17
10	11	10	14	7	16
11	8	21	10	9	12
12	6	11	7	5	9
13	4	10	9	7	5
14	3	7	5	4	4
<i>Měření č.</i>	1	2	3	4	5
<i>Průměrná Fx [N]</i>	31,6	36,6	35,3	32,2	30,0
<i>Průměrná Fz [N]</i>	95,2	131,0	131,1	110,8	105,8

Tab. 2 – 5 Působící sily při broušení s PK HOCUT 795B

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795B					
<i>přejezd</i>	<i>Fz1 [N]</i>	<i>Fz2 [N]</i>	<i>Fz3 [N]</i>	<i>Fz4 [N]</i>	<i>Fz5 [N]</i>
1	241	261	244	248	269
2	106	101	102	103	97
3	34	43	35	41	43
4	12	11	20	18	16
5	17	17	14	14	14
6	11	6	9	9	8
7	15	10	10	11	12
8	6	6	7	10	7
9	8	8	6	11	8
10	4	6	5	5	5
11	7	6	7	6	6
12	3	5	7	6	3
13	6	5	6	5	6
14	2	4	5	4	4
<i>Měření č.</i>	1	2	3	4	5
<i>Průměrná Fx [N]</i>	18,3	16,5	16,2	20,5	23,7
<i>Průměrná Fz [N]</i>	63,1	54,8	55,2	55,9	61,8

Tab. 2 – 6 Působící sily při broušení s PK EOPS 1030

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030					
<i>přejezd</i>	<i>Fz1 [N]</i>	<i>Fz2 [N]</i>	<i>Fz3 [N]</i>	<i>Fz4 [N]</i>	<i>Fz5 [N]</i>
1	233	258	250	253	239
2	107	91	109	96	120
3	60	53	43	63	54
4	19	28	21	14	20
5	20	16	16	15	22
6	12	12	13	11	12
7	16	12	8	14	14
8	8	9	6	7	6
9	10	6	8	10	9
10	7	4	6	7	4
11	7	8	6	7	8
12	4	6	5	5	6
13	2	5	4	6	8
14	1	3	2	3	4
<i>Měření č.</i>	1	2	3	4	5
<i>Průměrná Fx [N]</i>	19,3	18,5	19,4	17,6	18,9
<i>Průměrná Fz [N]</i>	56,1	56,2	60,4	65,8	64,5

Drsnost povrchu

Tab. 2 – 13 Drsnosti povrchu při broušení za sucha

BROUŠENÍ BEZ CHLAZENÍ - ZA SUCHA															
	1 plocha R [μm]			2 plocha R [μm]			3 plocha R [μm]			4 plocha R [μm]			5 plocha R [μm]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	0,237	0,263	0,250	0,227	0,225	0,227	0,320	0,300	0,283	0,213	0,213	0,210	0,249	0,250	0,243
Rz	1,937	2,010	2,037	1,980	1,845	1,967	2,443	2,293	2,063	1,937	1,870	1,717	2,074	2,004	1,946
Rt	2,403	2,498	2,573	2,707	2,315	2,867	3,120	2,790	2,613	2,713	2,468	2,300	2,736	2,518	2,588

Tab. 2 – 14 Drsnosti povrchu při broušení podchlazeným vzduchem

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH															
	1 plocha R [μm]			2 plocha R [μm]			3 plocha R [μm]			4 plocha R [μm]			5 plocha R [μm]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	0,473	0,540	0,450	0,473	0,490	0,410	0,493	0,500	0,413	0,503	0,553	0,527	0,430	0,453	0,390
Rz	3,327	3,873	3,407	3,363	3,620	3,020	3,470	3,508	3,060	3,693	3,845	3,607	3,113	3,538	2,947
Rt	3,837	4,953	4,577	4,530	4,095	3,903	4,243	4,150	4,187	4,683	4,488	4,577	4,053	4,828	3,333

Tab. 2 – 15 Drsnosti povrchu při broušení se zkvalněným CO₂

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKVALNĚNÝ CO ₂															
	1 plocha R [μm]			2 plocha R [μm]			3 plocha R [μm]			4 plocha R [μm]			5 plocha R [μm]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	0,517	0,548	0,487	0,407	0,435	0,447	0,500	0,518	0,443	0,367	0,375	0,360	0,330	0,365	0,347
Rz	3,650	3,720	3,457	2,950	3,260	3,190	3,877	3,658	3,503	2,813	2,788	2,773	2,390	2,865	2,713
Rt	4,327	4,643	3,983	3,637	4,188	4,157	5,170	4,538	4,817	3,573	3,445	3,270	3,163	3,778	3,773

Tab. 2 – 16 Drsnosti povrchu při broušení se zkvalněným dusíkem

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKVALNĚNÝ DUSÍK															
	1 plocha R [μm]			2 plocha R [μm]			3 plocha R [μm]			4 plocha R [μm]			5 plocha R [μm]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	0,436	0,473	0,407	0,441	0,471	0,395	0,259	0,271	0,262	0,306	0,312	0,286	0,351	0,382	0,328
Rz	3,285	3,522	3,190	3,306	3,506	2,946	1,943	2,149	2,117	2,320	2,416	2,109	2,702	2,891	2,605
Rt	3,970	4,916	4,247	3,937	4,467	3,478	2,543	2,688	2,740	3,130	3,011	2,482	3,136	3,922	3,229

Tab. 2 – 17 Drsnosti povrchu při broušení s PK HOCUT 795B

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795 B															
	1 plocha R [μm]			2 plocha R [μm]			3 plocha R [μm]			4 plocha R [μm]			5 plocha R [μm]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	0,293	0,319	0,220	0,304	0,364	0,229	0,297	0,371	0,338	0,331	0,389	0,278	0,341	0,407	0,292
Rz	2,117	2,448	1,847	2,404	2,770	1,836	2,259	2,787	2,420	2,475	2,859	2,222	2,454	3,095	2,192
Rt	2,451	2,921	2,412	3,181	3,451	2,329	2,968	3,417	3,104	3,171	3,441	2,714	3,184	3,693	2,461

Tab. 2 – 18 Drsnosti povrchu při broušení s PK EOPS 1030

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030															
	1 plocha R [μm]			2 plocha R [μm]			3 plocha R [μm]			4 plocha R [μm]			5 plocha R [μm]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ra	0,241	0,320	0,227	0,228	0,357	0,258	0,351	0,369	0,263	0,263	0,354	0,276	0,302	0,401	0,269
Rz	1,815	2,522	1,929	1,884	2,871	2,306	2,675	2,691	2,039	2,083	2,740	2,087	2,265	3,083	2,110
Rt	2,175	3,166	2,810	2,540	3,851	3,251	3,474	3,219	2,509	2,609	3,521	2,794	2,827	3,874	2,676

Rozměrová přesnost

Tab. 2 – 19 Hodnoty výšky zkušební vzorku při broušení za sucha

BROUŠENÍ BEZ CHLAZENÍ – ZA SUCHA									
VZ01	1a před	2a po	1b před	2b po	VZ02	1a před	2a po	1b před	2b po
1	10,599	10,578	10,598	10,576	1	11,088	11,052	11,089	11,058
2	10,6	10,58	10,601	10,58	2	11,091	11,06	11,094	11,066
3	10,602	10,583	10,602	10,583	3	11,094	11,072	11,095	11,073
4	10,602	10,583	10,602	10,583	4	11,093	11,07	11,094	11,069
5	10,599	10,58	10,6	10,579	5	11,088	11,067	11,086	11,066
VZ03	1a před	2a po	1b před	2b po	VZ02	1a před	2a po	1b před	2b po
1	11,033	11,01	11,033	11,009	1	11,321	11,296	11,321	11,298
2	11,035	11,011	11,034	11,01	2	11,322	11,3	11,322	11,301
3	11,034	11,011	11,033	11,011	3	11,324	11,301	11,322	11,302
4	11,032	11,009	11,031	11,01	4	11,322	11,301	11,321	11,302
5	11,032	11,005	11,03	11,006	5	11,319	11,292	11,319	11,294

Tab. 2 – 20 Hodnoty výšky zkušební vzorku při broušení podchlazeným vzduchem

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PODCHLAZENÝ VZDUCH									
VZ01	1a před	2a po	1b před	2b po	VZ02	1a před	2a po	1b před	2b po
1	11,086	11,068	11,088	11,1	1	10,931	10,911	10,932	10,908
2	11,089	11,074	11,092	11,1	2	10,932	10,914	10,933	10,91
3	11,092	11,079	11,094	11,1	3	10,935	10,913	10,934	10,912
4	11,094	11,078	11,092	11,1	4	10,933	10,909	10,933	10,911
5	11,092	11,075	11,091	11,1	5	10,932	10,904	10,93	10,905
VZ03	1a před	2a po	1b před	2b po	VZ02	1a před	2a po	1b před	2b po
1	11,033	11,013	11,034	11	1	10,938	10,915	10,939	10,916
2	11,033	11,015	11,034	11	2	10,94	10,92	10,941	10,921
3	11,032	11,016	11,033	11	3	10,942	10,923	10,942	10,922
4	11,031	11,015	11,032	11	4	10,942	10,923	10,943	10,923
5	11,03	11,011	11,031	11	5	10,941	10,92	10,941	10,92

Tab. 2 – 21 Hodnoty výšky zkušební vzorku při broušení se zkvalněným CO₂

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKVALNĚNÝ CO ₂									
VZ01	1a před	2a po	1b před	2b po	VZ02	1a před	2a po	1b před	2b po
1	11,026	10,997	11,022	10,997	1	11,187	11,169	11,188	11,168
2	11,028	11,003	11,025	11,004	2	11,189	11,169	11,188	11,168
3	11,029	11,008	11,028	11,008	3	11,191	11,169	11,189	11,168
4	11,027	11,007	11,027	11,007	4	11,19	11,168	11,187	11,168
5	11,026	11,006	11,026	11,006	5	11,188	11,169	11,186	11,169
VZ03	1a před	2a po	1b před	2a po	VZ04	1a před	2a po	1b před	2a po
1	11,416	11,402	11,42	11,4	1	11,15	11,135	11,15	11,131
2	11,42	11,404	11,422	11,406	2	11,152	11,143	11,153	11,143
3	11,423	11,406	11,424	11,409	3	11,154	11,139	11,156	11,144
4	11,426	11,408	11,425	11,408	4	11,156	11,142	11,157	11,143
5	11,424	11,413	11,423	11,409	5	11,156	11,141	11,156	11,145

Tab. 2 – 22 Hodnoty výšky zkušební vzorku při broušení se zkvalněným dusíkem

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – ZKVALNĚNÝ DUSÍK									
VZ01	1a před	2a po	1b před	2b po	VZ02	1a před	2a po	1b před	2b po
1	10,432	10,407	10,372	10,4	1	10,666	10,657	10,671	10,656
2	10,422	10,395	10,364	10,3	2	10,65	10,638	10,654	10,636
3	10,407	10,387	10,35	10,3	3	10,626	10,609	10,634	10,614
4	10,395	10,373	10,333	10,3	4	10,609	10,588	10,615	10,584
5	10,386	10,364	10,323	10,3	5	10,588	10,57	10,598	10,573
VZ03	1a před	2a po	1b před	2b po	VZ02	1a před	2a po	1b před	2b po
1	11,901	11,887	11,914	11,9	1	10,917	10,896	10,922	10,896
2	11,921	11,897	11,921	11,9	2	10,922	10,898	10,925	10,902
3	11,922	11,899	11,922	11,9	3	10,929	10,901	10,927	10,907
4	11,922	11,899	11,924	11,9	4	10,927	10,905	10,93	10,908
5	11,92	11,892	11,921	11,9	5	10,926	10,908	10,926	10,908

Tab. 2 – 23 Hodnoty výšky zkušební vzorku při broušení s PK HOCUT 795B

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK HOCUT 795 B									
VZ01	1a před	2a po	1b před	2b po	VZ02	1a před	2a po	1b před	2b po
1	10,45	10,435	10,463	10,449	1	10,37	10,351	10,389	10,369
2	10,429	10,42	10,448	10,435	2	10,352	10,336	10,374	10,358
3	10,412	10,408	10,438	10,42	3	10,339	10,322	10,36	10,341
4	10,402	10,389	10,421	10,405	4	10,326	10,312	10,349	10,327
5	10,389	10,374	10,41	10,393	5	10,319	10,297	10,334	10,311
VZ03	1a před	2a po	1b před	2b po	VZ02	1a před	2a po	1b před	2b po
1	11,125	11,105	11,124	11,105	1	10,94	10,919	10,935	10,912
2	11,111	11,093	11,106	11,091	2	10,935	10,915	10,928	10,905
3	11,099	11,078	11,09	11,074	3	10,928	10,908	10,917	10,898
4	11,089	11,066	11,077	11,06	4	10,922	10,901	10,908	10,891
5	11,08	11,063	11,066	11,046	5	10,914	10,89	10,9	10,88

Tab. 2 – 24 Hodnoty rozměrové přesnosti při broušení s PK EOPS 1030

BROUŠENÍ S CHLAZENÍM – PK EOPS 1030									
VZ01	1a před	2a po	1b před	2b po	VZ02	1a před	2a po	1b před	2b po
1	10,489	10,47	10,487	10,5	1	10,497	10,474	10,502	10,478
2	10,502	10,476	10,504	10,5	2	10,506	10,493	10,51	10,494
3	10,509	10,493	10,51	10,5	3	10,519	10,501	10,52	10,502
4	10,508	10,494	10,508	10,5	4	10,516	10,496	10,518	10,503
5	10,502	10,487	10,502	10,5	5	10,508	10,492	10,514	10,494
VZ03	1a před	2a po	1b před	2b po	VZ02	1a před	2a po	1b před	2b po
1	10,366	10,354	10,402	10,4	1	10,435	10,417	10,451	10,434
2	10,351	10,342	10,387	10,4	2	10,423	10,403	10,435	10,422
3	10,335	10,315	10,367	10,3	3	10,404	10,38	10,417	10,403
4	10,316	10,303	10,354	10,3	4	10,388	10,37	10,405	10,384
5	10,312	10,297	10,347	10,3	5	10,383	10,362	10,393	10,374

Příloha č. 3 – Protokoly a tabulky s měřenými hodnotami

Tahové zkoušky

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

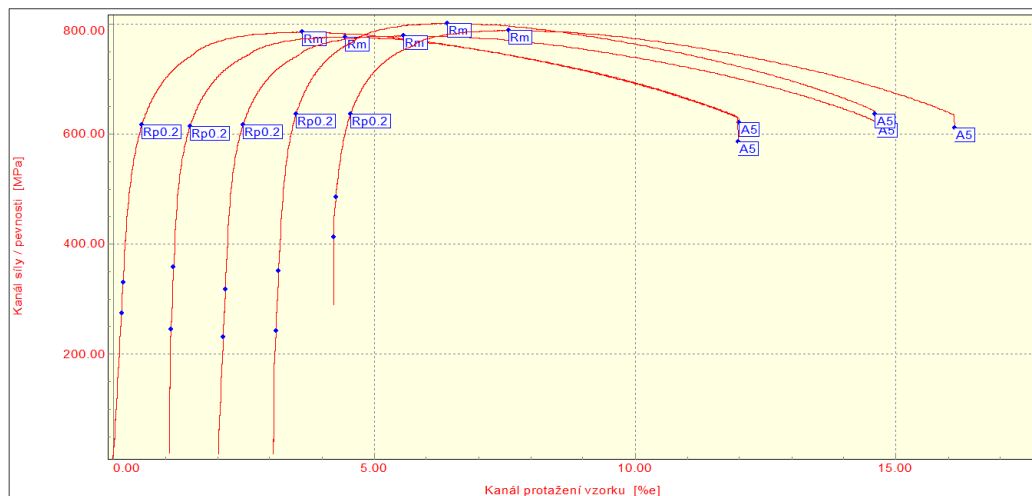
EN ISO 6892-1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: ČSN 412050 - Obráběno za sucha
Norma: :
Rychlost zatěžování: : proměnná 1 (15) mm/min.
Vypracoval: : Ing. Milošlav Ledvína
Podmínky měření: teplota RT, L₀=40mm, KAF 100 kN

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	D ₀ mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A5 %
tl 1	8.12	616.6	785.2	3.18	11.65
tl 2	7.82	614.1	776.7	3.11	10.71
tl 3	8.14	616.6	779.1	3.20	12.34
tl 4	8.12	637.2	801.6	3.01	11.30
tl 5	8.12	637.1	788.5	3.14	11.79

Statistika	D ₀ mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A5 %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	8.06	624.3	786.2	3.13	11.56
Směrodatná odchylka	0.14	11.8	9.8	0.07	0.60



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: ČSN 412050 - Obráběno s chlazením podchlazeným vzduchem (vírová trubice)

Norma: :

Rychlost zatěžování: : proměnná 1 (15) mm/min.

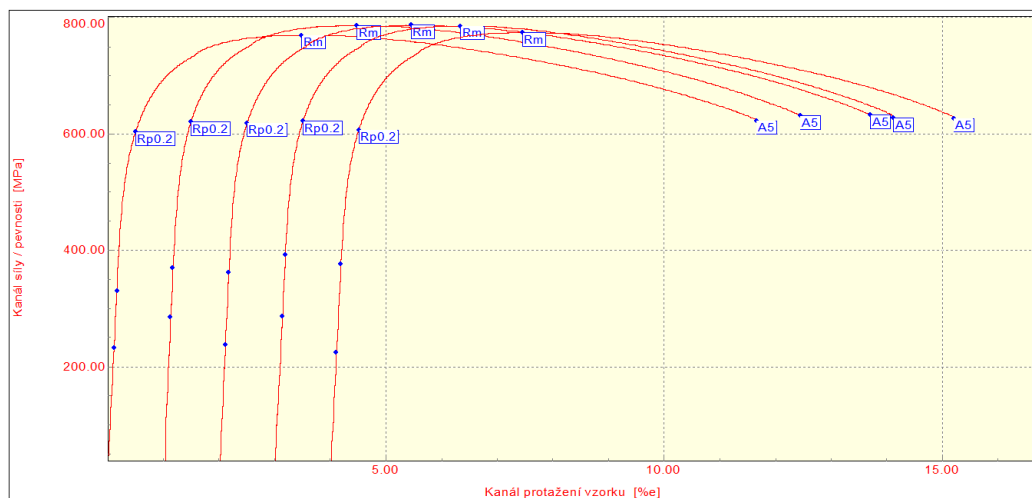
Vypracoval: : Ing. Milošav Ledvína

Podmínky měření : teplota RT, L₀=40mm, KAF 100 kN

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	D ₀ mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A5 %
11.1	8.18	603.6	769.8	3.10	11.35
11.2	8.13	620.8	786.6	3.11	11.14
11.3	8.15	618.9	786.9	3.06	11.39
11.4	8.14	621.6	785.7	2.95	10.81
11.5	8.09	606.9	774.5	3.05	10.89

Statistika	D ₀ mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A5 %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	8.14	614.4	780.7	3.06	11.12
Směrodatná odchylka	0.03	8.4	8.0	0.06	0.26



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: ČSN 412050 - Obráběno s chlazením CO₂

Norma: :

Rychlost zatěžování: : proměnná 1 (15) mm/min.

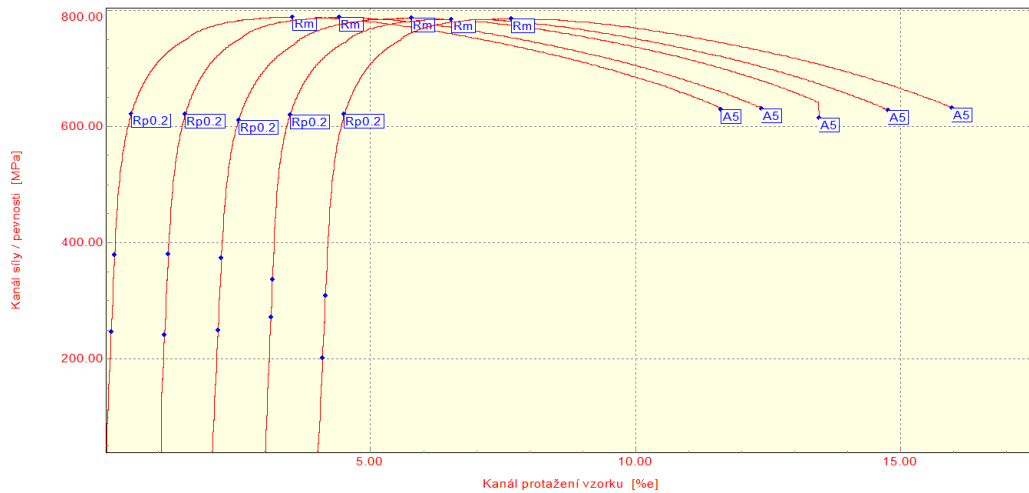
Vypracoval: : Ing. Milošlav Ledvína

Podmínky měření: teplota RT, L₀=40mm, KAF 100 kN

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	D ₀ mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A5 %
11.1	8.19	621.3	788.0	3.17	11.32
11.2	8.06	620.9	787.3	3.02	11.06
11.3	7.98	610.8	786.3	3.37	11.14
11.4	8.09	620.0	784.8	3.17	11.47
11.5	8.16	620.3	785.4	3.26	11.66

Statistika	D ₀ mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A5 %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	8.10	618.6	786.4	3.20	11.33
Směrodatná odchylka	0.08	4.4	1.3	0.13	0.24



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: ČSN 412050 - Obráběno s chlazením L-N2

Norma: :

Rychlost zatěžování: : proměnná 1 (15) mm/min.

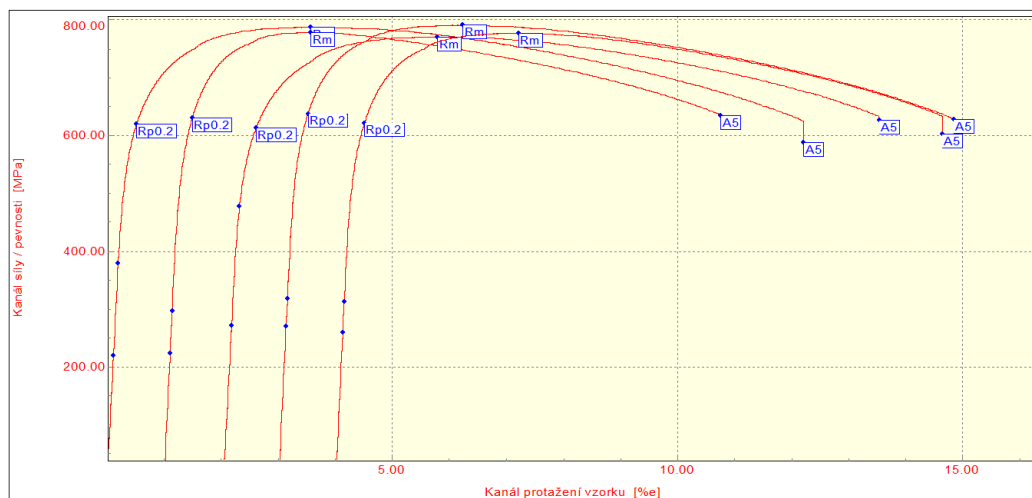
Vypracoval: : Ing. Milošav Ledvína

Podmínky měření: teplota RT, L₀=40mm, KAF 100 kN

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	D ₀ mm	Rp0.2 MPa	R _m MPa	Ag %	A5 %
1.1	8.14	619.8	787.5	3.17	11.91
1.2	8.28	631.0	778.6	2.21	9.46
1.3	8.08	612.9	770.9	3.28	11.12
1.4	8.09	638.0	791.2	2.84	11.53
1.5	7.93	621.9	777.0	2.83	10.35

Statistika	D ₀ mm	Rp0.2 MPa	R _m MPa	Ag %	A5 %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	8.10	624.7	781.0	2.87	10.87
Směrodatná odchylka	0.13	9.9	8.2	0.42	0.98



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: ČSN 412050 - Obráběno s chlazením HOCUT 795B

Norma: :

Rychlost zatěžování: : proměnná 1 (15) mm/min.

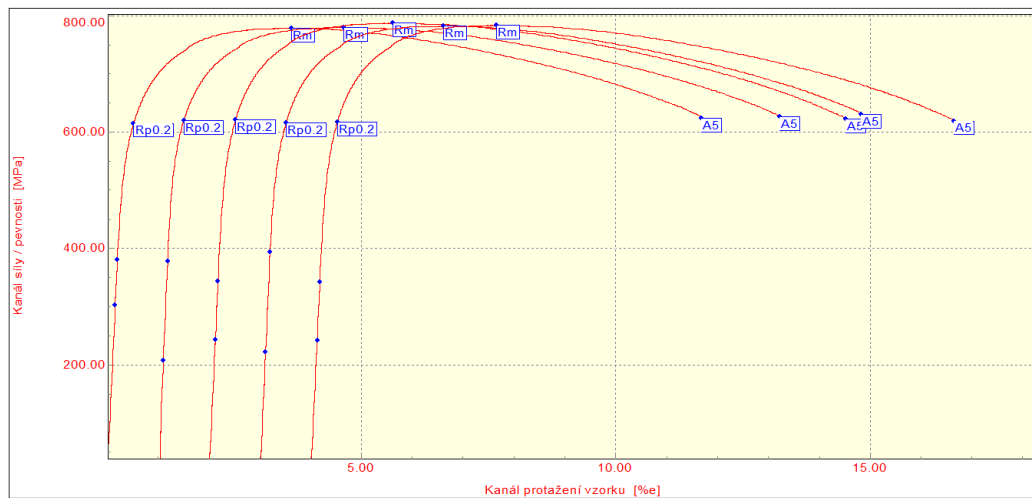
Vypracoval: : Ing. Miloslav Ledvína

Podmínky měření : teplota RT, L₀=40mm, KAF 100 kN

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	D ₀ mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A5 %
1	8.08	615.3	778.8	3.22	11.36
2	8.17	620.0	779.9	3.26	11.92
3	8.12	620.8	787.3	3.21	12.21
4	8.06	616.0	782.3	3.21	11.49
5	8.14	617.0	783.4	3.24	12.33

Statistika	D ₀ mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A5 %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	8.11	617.8	782.3	3.23	11.86
Směrodatná odchylka	0.04	2.5	3.3	0.02	0.43



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: ČSN 412050 - Obráběno s chlazením EOPS 1030

Norma: :

Rychlost zatěžování: : proměnná 1 (15) mm/min.

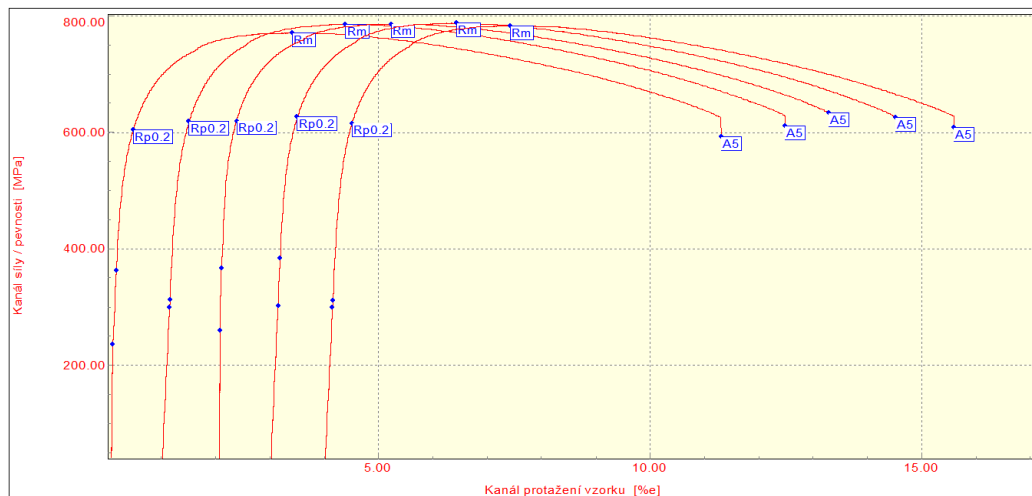
Vypracoval: : Ing. Miloslav Ledvína

Podmínky měření: : teplota RT, L₀=40mm, KAF 100 kN

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	D ₀ mm	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %
11.1	8.03	604.1	770.7	3.04	11.03
11.2	8.02	618.1	785.0	2.99	11.18
11.3	8.11	619.1	785.8	3.00	11.10
11.4	8.02	626.1	787.3	3.05	11.21
11.5	8.03	615.8	783.1	3.02	11.29

Statistika	D ₀ mm	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	8.04	616.6	782.4	3.02	11.16
Směrodatná odchylka	0.04	8.0	6.7	0.02	0.10



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

Tab. 3 – 1 Tahové zkoušky u vyrobených vzorků za sucha

TAKOVÁ ZKOUŠKA – ZA SUCHA				
Měření č. / Parametr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Ag [%]	A5 [%]
1	616,6	785,2	3,18	11,65
2	614,1	776,7	3,11	10,71
3	616,6	779,1	3,20	12,34
4	637,2	801,5	3,01	11,30
5	637,1	788,5	3,14	11,79

Tab. 3 – 2 Tahové zkoušky u vyrobených vzorků s podchlazeným vzduchem

TAKOVÁ ZKOUŠKA – PODCHLAZENÝ VZDUCH (VÍROVÁ TRUBICE)				
Měření č. / Parametr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Ag [%]	A5 [%]
1	603,6	769,8	3,10	11,35
2	620,8	786,6	3,11	11,14
3	618,9	786,9	3,06	11,39
4	621,6	785,7	2,95	10,81
5	606,9	774,5	3,05	10,89

Tab. 3 – 3 Tahové zkoušky u vyrobených vzorků se zkapalněným CO_2

TAKOVÁ ZKOUŠKA – ZKAPALNĚNÝ CO_2				
Měření č. / Parametr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Ag [%]	A5 [%]
1	621,3	788,0	3,17	11,32
2	620,9	787,3	3,02	11,06
3	610,8	786,3	3,37	11,14
4	620,0	784,8	3,17	11,47
5	620,3	785,4	3,26	11,66

Tab. 3 – 4 Tahové zkoušky u vyrobených vzorků se zkapalněným dusíkem

TAKOVÁ ZKOUŠKA – ZKAPALNĚNÝ DUSÍK				
Měření č. / Parametr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Ag [%]	A5 [%]
1	619,8	787,5	3,17	11,91
2	631,0	778,6	2,21	9,46
3	612,9	770,9	3,28	11,12
4	638,0	791,2	2,84	11,53
5	621,9	777,0	2,83	10,35

Tab. 3 – 5 Tahové zkoušky u vyrobených vzorků PK HOCUT 795B

TAKOVÁ ZKOUŠKA – PK HOCUT 795 B				
Měření č. / Parametr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Ag [%]	A5 [%]
1	615,3	778,8	3,22	11,36
2	620,0	779,9	3,26	11,92
3	620,8	787,3	3,21	12,21
4	616,0	782,3	3,21	11,49
5	617,0	783,4	3,24	12,33

Tab. 3 – 6 Tahové zkoušky u vyrobených vzorků PK EOPS 1030

TAKOVÁ ZKOUŠKA – PK EOPS 1030				
Měření č. / Parametr	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Ag [%]	A5 [%]
1	604,1	770,7	3,04	11,03
2	618,1	785,0	2,99	11,18
3	619,1	785,8	3,00	11,10
4	626,1	787,3	3,05	11,21
5	615,8	783,1	3,02	11,29

Zkouška tvrdosti HV10

Tab. 3.7 – 4 Tvrdosti HV10 u vyrobených vzorků pro jednotlivá PM

TVRDOST HV10						
Procesní médium Měření č.	ZA SUCHA	PODCHLAZENÝ VZDUCH	ZKAPALNĚNÝ CO ₂	ZKAPALNĚNÝ DUSÍK	PK HOCUT 795B	PK EOPS 1030
1	167	173	167	178	177	173
2	169	175	165	178	174	168
3	171	174	166	179	175	168
4	170	172	168	176	169	169
5	173	176	169	175	174	167
6	171	173	166	177	175	169

Zkouška mikrotvrdosti HV0.2

Tab. 3.7 – 5 Mikrotvrdosti u broušených vzorků – Za sucha

MIKROTVRDOST HV0.2 – ZA SUCHA					
Pozice / Měření č.	1	2	3	4	5
1	211	252	198	221	211
2	206	310	231	201	228
3	244	277	228	234	221
4	240	238	209	216	249
5	228	237	226	202	260
6	209	226	208	215	244
7	206	231	219	220	230
8	220	243	208	216	238
9	253	236	212	193	237
10	221	256	231	232	239
11	214	238	214	228	232
12	233	243	230	217	235
13	221	243	221	230	238
14	210	228	227	224	220
15	218	215	226	228	234

Tab. 3.7 – 5 Mikrotvrdosti u broušených vzorků – s podchlazeným vzduchem

MIKROTVRDOST HV0.2 – PODCHLAZENÝ VZDUCH					
Pozice / Měření č.	1	2	3	4	5
1	244	246	256	232	254
2	230	252	243	258	287
3	222	247	228	253	256
4	224	241	259	249	242
5	235	248	255	266	243
6	201	261	256	244	253
7	204	269	226	254	237
8	210	247	238	236	235
9	211	213	270	258	244
10	214	260	248	230	242
11	204	253	257	221	252
12	192	238	238	217	277
13	216	245	242	236	258
14	209	273	231	235	248
15	207	249	236	212	245

Tab. 3.7– 6 Mikrotvrdosti u broušených vzorků se zkvalněným CO₂

MIKROTVRDOT HV0.2 – ZKALNĚNÝ CO ₂					
Pozice / Měření č.	1	2	3	4	5
1	237	238	235	230	222
2	236	249	228	236	253
3	215	256	238	238	249
4	215	244	247	244	236
5	233	239	237	221	225
6	233	234	237	215	240
7	238	239	207	237	236
8	209	243	220	226	241
9	244	233	231	232	232
10	204	233	214	237	225
11	219	238	235	215	232
12	209	237	240	229	213
13	230	234	239	234	238
14	197	236	241	233	239
15	230	237	232	213	236

Tab. 3.7– 7 Mikrotvrdosti u broušených vzorků se zkvalněným dusíkem

MIKROTVRDOT HV0.2 – ZKALNĚNÝ DUSÍK					
Pozice / Měření č.	1	2	3	4	5
1	254	270	257	256	258
2	237	283	260	259	248
3	268	274	242	265	264
4	243	262	241	247	251
5	250	244	257	252	250
6	258	242	263	249	239
7	246	245	253	256	241
8	247	250	247	248	242
9	253	252	247	252	254
10	259	250	251	248	251
11	258	234	246	233	249
12	256	254	254	257	246
13	250	252	245	246	254
14	259	261	252	241	258
15	250	258	258	244	254

Tab. 3.7– 8 Mikrotvrdosti u broušených vzorků PK HOCUT 795B

MIKROTVRDOT HV0.2 – PK HOCUT					
Pozice / Měření č.	1	2	3	4	5
1	197	203	233	228	227
2	226	214	221	232	212
3	232	220	229	232	216
4	216	229	216	235	220
5	196	233	238	237	226
6	220	221	227	206	242
7	221	209	228	202	213
8	221	211	209	219	215
9	226	219	207	222	217
10	231	210	227	225	209
11	223	218	200	235	218
12	220	216	219	222	206
13	202	214	219	215	215
14	222	201	232	224	224
15	210	217	224	214	219

Tab. 3.7 – 9 Mikrotvrdosti u broušených vzorků PK EOPS 1030

MIKROTVRDOST HV0.2 – PK EOPS 1030					
Pozice / Měření č.	1	2	3	4	5
1	224	230	220	241	259
2	244	214	213	238	222
3	232	235	232	232	233
4	230	215	231	235	249
5	226	227	221	235	245
6	231	224	238	239	219
7	231	227	232	225	236
8	233	232	232	238	229
9	233	215	233	238	225
10	226	230	244	228	236
11	230	230	236	228	230
12	229	236	237	232	239
13	229	234	236	221	226
14	218	239	240	216	236
15	230	221	238	224	230