

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2015

Ouhrabka Pavel

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Bakalářský studijní program:

Strojní inženýrství

Účinek procesních plynů na technologii vrtání a kvalitu obrobených součástí

The effect of process gases for drilling technology and the quality of
machined parts

KOM – 1266

Pavel Ouhrabka

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

Konzultant: Ing. Miloslav Ledvina

Počet stran: 62

Počet příloh: 5

Počet tabulek: 16

Počet obrázků: 52

Počet diagramů: 10

27.4.2015

Zadání

ÚČINEK PROCESNÍCH PLYNŮ NA TECHNOLOGII VRTÁNÍ A KVALITU OBROBENÝCH SOUČÁSTÍ

ANOTACE:

Bakalářská práce porovnává účinky procesních plynů při vrtání. Hodnotícími kritérii jsou řezné síly, teploty obráběných vzorků, trvanlivosti nástroje, dosažené drsnosti povrchů a rozměrové přesnosti obrobených ploch.

V teoretické části je rozebrána technologie vrtání a druhy procesních plynů. V experimentální části jsou shrnuty výsledky naměřených kritérií při využití procesních plynů. Výsledky jsou zhodnoceny z hlediska vhodnosti využití zkoumaných procesních plynů.

Klíčová slova: OBRÁBĚNÍ, VRTÁNÍ, PROCESNÍ PLYNY

THE EFFECT OF PROCESS GASES FOR DRILLING TECHNOLOGY AND THE QUALITY OF MACHINED PARTS

ANNOTATION:

The thesis compares the effects of process gases during drilling. The evaluation criteria are cutting forces, temperatures of the machined samples, service life of the tools, surface roughness achieved and dimensional accuracy of the machined surfaces.

The theoretical part discusses the drilling technology and the types of process gases. The experimental section summarizes the results of the measured criteria for the use of process gases. The results are evaluated in terms of the appropriateness of the use of process gases investigated.

Key words: MACHINING, DRILLING, PROCESS GASES

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2015

Archivní označ. zprávy:

Počet stran: 62

Počet tabulek: 16

Počet příloh: 5

Počet diagramů: 10

Počet obrázků: 52

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

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

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

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

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

27.4.2015

.....

Ouhrabka Pavel

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí práce paní Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. za cenné rady a připomínky k vedení mé bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Miloslavu Ledvinovi za poskytnuté rady v průběhu řešení a pomoc při měření experimentů v laboratoři katedry KOM.

Velké poděkování bych chtěl také věnovat rodičům za morální a finanční podporu během studia a zpracování bakalářské práce.

OBSAH:

Seznam použitých zkratk.....	6
01 Úvod.....	7
02 Vrtání	8
2.1 Základní způsoby vrtání	8
2.2 Kinematika řezného procesu	10
2.3 Výpočet průřezu třísky, řezné síly a krouticího momentu	11
2.4 Výpočet strojního času	13
2.5 Druhy nástrojů a geometrie nástroje	14
2.5.1 Geometrie nástroje	14
2.5.2 Rozdělení vrtáků	15
2.6 Druhy strojů.....	18
2.7 Teplo a teplota při vrtání.....	19
03 Řezné prostředí	21
3.1. Důvody využití řezného prostředí.....	21
3.2. Kapalně prostředí.....	22
3.2.1 Druhy řezných kapalin	22
3.2.2 Práce s řeznou kapalinou.....	24
3.3 Plynné prostředí	24
3.3.1. Obrábění s využitím podchlazeného vzduchu.....	25
3.3.2. Obrábění za využití zkapalněného CO ₂	26
3.3.2. Obrábění za využití zkapalněného dusíku	27
3.3 Obrábění za sucha	27
04 Experimentální část.....	28
4.1. Charakteristika strojů a měřicích zařízení	28
4.1.1. Obráběcí stroj – Pásová pila	28
4.1.2 Obráběcí stroj – NC frézka.....	29
4.1.3. Elektrický odporový dynamometr	30
4.1.4. Termočlánek typu K	31
4.1.5. Dílenský mikroskop ZEISS.....	32
4.1.6. Laboratorní profiloměr MITUTOYO	32

4.1.7. Digitální dutinoměr MITUTOYO	33
4.1.8 Digitální posuvné měřítko.....	33
4.2. Příprava zkušebních vzorků	33
4.3. Charakteristika přívodu procesních médií	36
4.3.1. Přívod podchlazeného vzduchu	36
4.3.2. Přívod zkapalněného oxidu uhličitého.....	38
4.4. Metodika experimentu	39
4.4.1 Metodika měření řezné síly a momentu	40
4.4.2 Metodika měření teploty obrobku.....	41
4.4.3 Metodika měření trvanlivosti nástroje.....	41
4.4.4 Metodika měření drsnosti povrchu	42
4.4.5 Metodika měření rozměrové přesnosti.....	43
4.5. Vyhodnocení experimentu.....	43
4.5.1 Měření síly a momentu.....	43
4.5.2 Měření teploty obrobku	46
4.5.3 Měření trvanlivosti nástroje	49
4.4.4 Měření drsnosti povrchu.....	51
4.4.5 Měření rozměrové přesnosti	53
05 Ekonomické zhodnocení.....	55
05 Diskuze	57
06 Závěr	59
Seznam použité literatury	60
Seznam příloh	62

Seznam použitých značek a zkratk

Označení	Jednotka	Popis
n	[ot.*min ⁻¹]	otáčky vřetene
D	[mm]	jmenovitý průměr nástroje
f	[mm]	posuv na otáčku
v_c	[m*min ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[m*min ⁻¹]	posuvná rychlost
v_e	[m*min ⁻¹]	řezný pohyb
i_z	[-]	počet břitů nástroje
d	[mm]	průměr předvrtaného otvoru
A_{Di}	[mm ²]	průřez třísky
F_{Ci}	[N]	řezná síla působící na jeden břit
F_C	[N]	výsledná řezná síla
χ_r	[°]	nástrojový úhel nastavení
h_d	[mm]	šířka třísky
$k_{s1.1}$	[MPa]	měrná řezná síla pro 1 mm tloušťky třísky
k_s	[MPa]	měrná řezná síla
M_k	[Nm]	kroucí moment
t	[min]	strojní čas
l_p	[mm]	délka náběhu vrtání
l_n	[mm]	délka přeběhu vrtání
L	[mm]	celková délka vrtání
Q	[J]	celkové teplo
$Q_{tř}$	[J]	třecí teplo
Q_{def}	[J]	teplo vzniklé deformacemi
Q_N	[J]	teplo odvedené nástrojem
Q_T	[J]	teplo odvedené třískou
Q_O	[J]	teplo odvedené obrobkem
Q_P	[J]	teplo odvedené prostředím

01 Úvod

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

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

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

Bakalářská práce je rozdělena do několika základních částí – část teoretická, experimentální a část závěrečná, která informuje o dosažených výsledcích práce.

V rámci teoretické části je popsána technologie vrtání, druhy nástrojů a strojů pro její využití. Technologie vrtání je rozebrána také z hlediska kinematiky a silového působení při obrábění. Dále jsou popsána řezná média a jejich využitelnost při obrábění.

Část experimentální uvádí jednotlivé metody a vybrané parametry, kterými byly hodnoceny vlivy použitých procesních médií u technologie vrtání.

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

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

02 Vrtání

Technologie vrtání slouží k obrábění děr. Obrábění děr řadíme mezi obrábění vnitřních ploch strojních součástí, jejich tvar se odvíjí od jejich funkce, avšak většinou se jedná o výrobu děr, které mají kruhový průřez.

Metoda vrtání zhotovuje otvory do plného materiálu nebo zvětšuje již zhotovený otvor, který mohl vzniknout předvrtáním, odlitím, předlisováním atd. Jako nástroj používáme vrták, který koná hlavní řezný pohyb rotační, ve výjimečných případech může konat rotační pohyb obrobek. Vedlejší pohyb přímočarý ve směru osy koná nástroj, ve většině případů je tento pohyb kolmý k obráběné ploše.

Řezná rychlost se bere jako rychlost na jmenovitém průměru vrtáku. U vrtání není konstantní hlavní řezná rychlost, která je největší na obvodu nástroje a ke středu klesá k nule. Tento fakt znamená, že hrot vrtáku teoreticky neobrábí, pouze plasticky deformuje materiál. [2]

2.1 Základní způsoby vrtání

Navrtání

Pro přesné umístění díry se používá předřadná operace navrtávání. Navrtáváním se zajistí přesné umístění hrotu vrtáku na střed díry. Pro tuto operaci se používají středící vrtáky.



Obr. 1 Středící vrták [1].

Krátké a dlouhé díry

Do plného materiálu se vrtají krátké díry (hloubka děr se pohybuje v rozmezí 5 až 10násobku průměru vrtáku), dlouhé díry (hlubší než 10násobek průměru vrtáku).



Obr. 2 Vrtání krátkých a dlouhých děr [5].

Vrtání na jádro

Do plného materiálu pro větší průměry a průchozí díry se používá tzv. vrtání na jádro, v průřezu je odběr materiálu znázorněn jako mezikruží.



Obr. 3 Vrtání na jádro [3].

Zvětšování děr vyvrtáváním

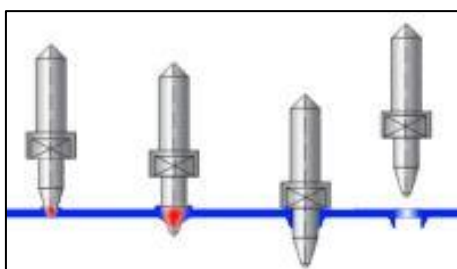
Dále můžeme díry zvětšovat vrtáním do předvrtaných, předlitých, předlisovaných otvorů, na tuto operaci se používají stejné nástroje jako při vrtání do plného materiálu.



Obr. 4 Zvětšování děr [5].

Termální vrtání

Do kategorie speciálního vrtání se řadí termální vrtání do plechu. Vrták může být i odstupňovaný různými průměry nebo jen konický.



Obr. 5 Ukázka termálního vrtání [4].

Vrtání díry zároveň s dokončujícími operacemi

Vrtání díry se současným vystružováním, závitováním nebo hlazením sdruženými nástroji. Tato operace, vrtání díry se současnými dalšími operacemi, je využívána pouze ve velkosériové výrobě pro zkrácení strojního času.

Kromě kovových materiálů se vrtá do kompozitních a nekovových materiálů, jako jsou skoro všechny plasty, beton, kámen, cihly, dřevo. Na tyto materiály se využívá vrtáků s jinou geometrií a konstrukcí.



Obr. 6 Sdružený vrták pro vykonávání více operací [5].

2.2 Kinematika řezného procesu

Výpočet řezné rychlosti:

$$v_C = \frac{\pi \times D \times n}{1\,000} \text{ [m/min]}. \quad (1)$$

Výpočet posuvné rychlosti:

$$v_f = \frac{f \times n}{1\,000} \text{ [m/min]}. \quad (2)$$

Výpočet řezného pohybu:

$$v_e = \sqrt{v_C^2 + v_f^2} \text{ [m/min]}. \quad (3)$$

Kde:

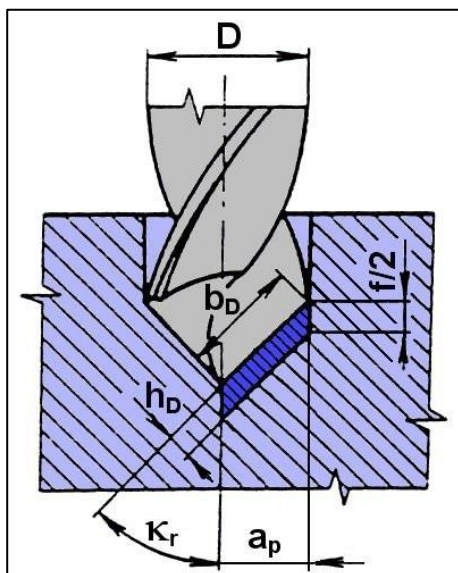
D jmenovitý průměr vrtáku [mm],

n otáčky nástroje [min^{-1}],

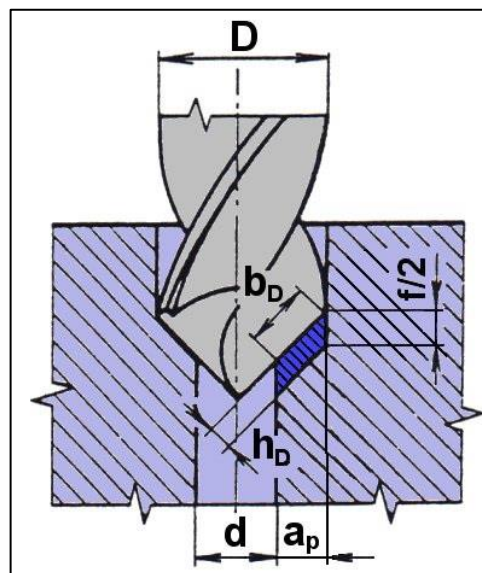
f posuv na otáčku [mm].

2.3 Výpočet průřezu třísky, řezné síly a krouticího momentu

Průřez třísky se vypočítá pomocí posuvu a jmenovitého průměru vrtáku. U vrtání do předvrtaných otvorů musíme do výpočtu zanést ještě průměr předvrtané díry.



Obr. 7 Průřez třísky při vrtání do plného materiálu [6].



Obr. 8 Průřez třísky při vrtání do předvrtaného materiálu [6].

Průřez třísky při vrtání do plného materiálu:

$$A_{Di} = \frac{f}{i_z} \times \frac{D}{2} \quad [\text{mm}^2]. \quad (4)$$

Pro šroubovité vrták lze upravit tento vztah na:

$$A_{Di} = f \times \frac{D}{4} \quad [\text{mm}^2]. \quad (5)$$

Průřez třísky při vrtání do předvrtaného materiálu:

$$A_{Di} = \frac{f}{i_z} \times \frac{D-d}{2} \quad [\text{mm}^2]. \quad (6)$$

Pro šroubovité vrták lze upravit tento vztah na:

$$A_{Di} = f \times \frac{D-d}{4} \quad [\text{mm}^2]. \quad (7)$$

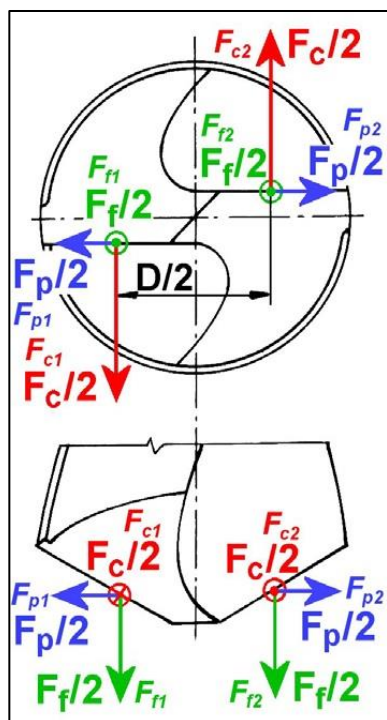
Kde:

f posuv na otáčku [mm],

i_z počet břitů nástroje [-],

D jmenovitý průměr vrtáku [mm],

d průměr předvrtaného otvoru [mm].



Obr. 9 Znárodnění sil působících při vrtání[6].

Výpočet řezné síly stanovíme pomocí Kienzleho vztahu pro výpočet z měrné řezné síly pro tloušťku třísky 1 mm.

Při vrtání šroubovitým vrtákem je tříska odebrána současně dvěma břity, které jsou vůči sobě symetricky umístěny. Síla se dělí mezi dva břity. Obecně je tedy výsledná síla, síla působící na jeden břit násobkem počtu břitů.

Výsledná řezná síla:

$$F_C = F_{Ci} \times i_z \text{ [N]}. \quad (8)$$

Síla působící na jeden břit:

$$F_{Ci} = k_s \times A_{Di} \text{ [N]}. \quad (9)$$

Měrná řezná síla:

$$k_s = k_{s1.1} \times h_d^{-m} \text{ [MPa]}. \quad (10)$$

Šířka třísky:

$$h_d = \frac{f}{i_z} \times \sin \chi_r \text{ [mm]}. \quad (11)$$

Krouticí moment při vrtání:

Při vrtání do plného materiálu:

$$M_K = F_C \times \frac{D \times 10^{-3}}{4} \text{ [N*m]}. \quad (12)$$

Při vrtání do předvrtaného otvoru:

$$M_K = F_C \times \frac{(D + d) \times 10^{-3}}{4} \text{ [N*m]}. \quad (13)$$

Kde:

- F_{Ci} řezná síla na jeden břít [N],
 i_z počet břítů nástroje [-],
 k_s měrná řezná síla [MPa],
 A_{Di} průřez třísky [mm²],
 $k_{s1.1}$ měrná řezná síla pro 1 mm tloušťky třísky [MPa],
 h_d tloušťka třísky [mm],
 m exponent Kienzleho vztahu [-],
 f_{ot} posuv na otáčku [mm],
 χ_r nástrojový úhel nastavení [°]
 D jmenovitý průměr vrtáku [mm],
 d průměr předvrtaného otvoru [mm].

2.4 Výpočet strojního času

Strojní čas dle základního vztahu:

$$t = \frac{L}{v_f} = \frac{L}{n \times f_{ot}} \text{ [min]}. \quad (14)$$

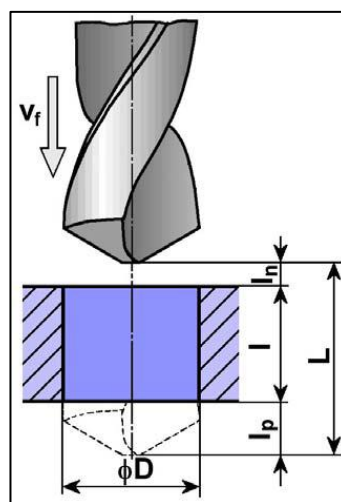
Délka náběhu a přeběhu (pro úhel špičky 118°):

$$l_p = 0,5 \times D \times \tan 31^\circ \cong 0,3 \times D \text{ [mm]}. \quad (15)$$

$$l_n = (0,5 \div 0,1) \times D \text{ [mm]}. \quad (16)$$

Celková délka:

$$L = l_n + l + l_p \text{ [mm]}. \quad (17)$$

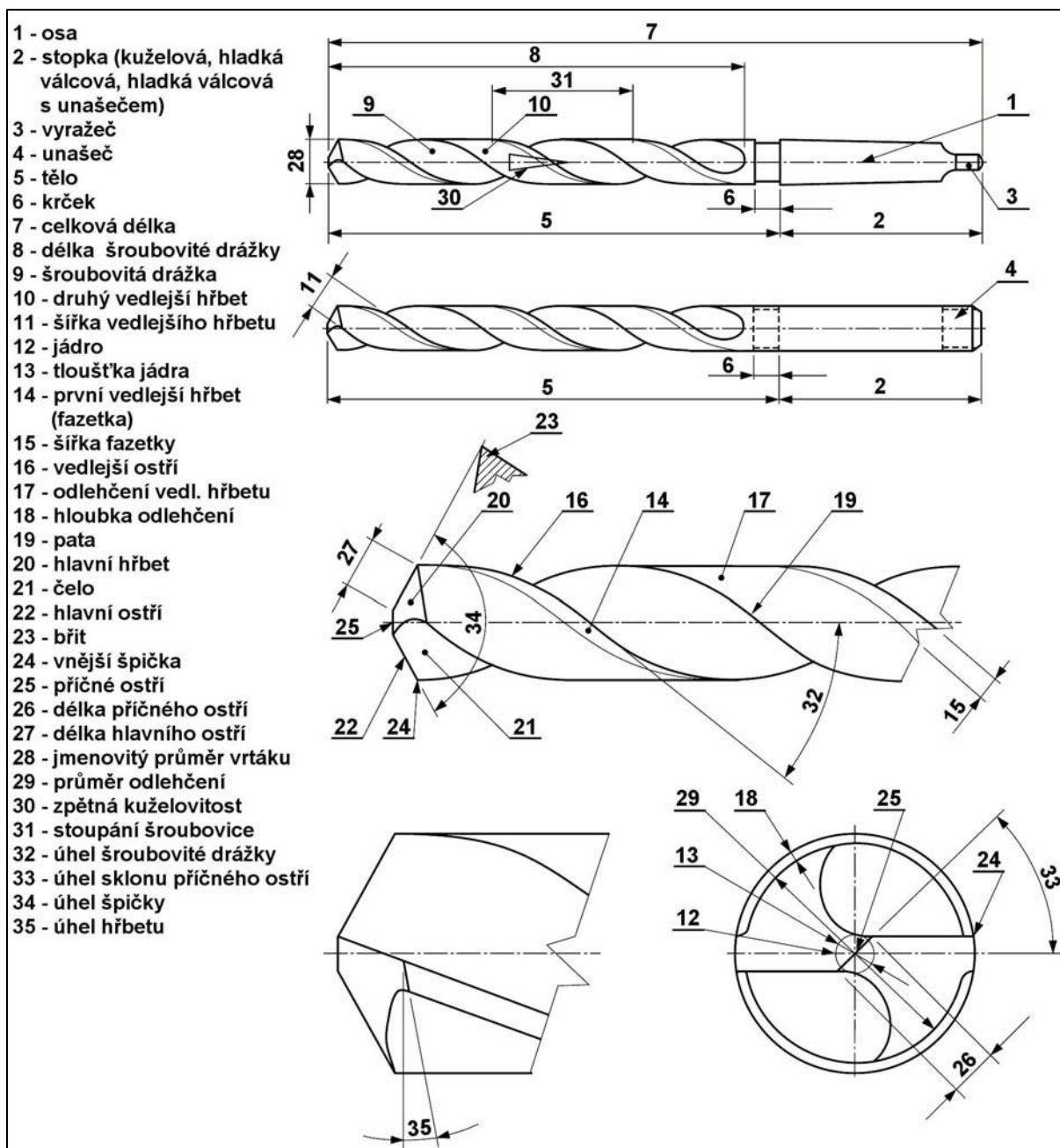


Obr. 10 Výpočet strojního času [6].

2.5 Druhy nástrojů a geometrie nástroje

Nástroje používané při vrtání se nazývají vrtáky. Dělí se podle způsobu použití, druhu obráběného materiálu a způsobu uchycení do stroje.

2.5.1 Geometrie nástroje



Obr. 11 Geometrie nástroje [6].

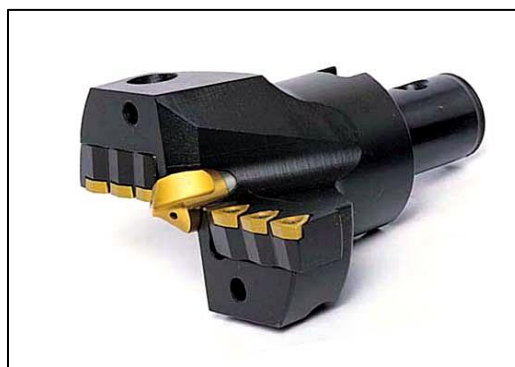
2.5.2 Rozdělení vrtáků

Základní dělení vrtáků:

- a) Kopinaté vrtáky.
- b) Šroubovité vrtáky.
- c) Středící vrtáky a navrtáváky.
- d) Dělové vrtáky.
- e) Vrtací hlavy a jádrové vrtáky.
- f) Vysoce výkonné vrtáky s výměnnými břitovými destičkami.

Kopinaté vrtáky

Nejstarším a nejjednodušším druhem jsou kopinaté vrtáky. Řezná část je tvořena dvěma břity. V dnešní době řeznou část kopinatých vrtáků tvoří břitová destička z rychlořezné oceli nebo slinutého karbidu. Velikou nevýhodou je špatný odvod třísek z místa řezu, odvod je zajištěn pouze velkým přívodem procesní kapaliny.



Obr. 12 Kopinatý vrták s VBD [7].

Šroubovité vrtáky

Nejpoužívanější vrtáky jsou šroubovité. Mají šroubovité drážky, kterými je usnadněn odvod třísek z místa řezu, kromě toho jsou i mírně kuželové s menším průměrem u stopky. Oba tyto aspekty jsou pozitivní pro odvod tepla z místa řezu. Vrták má dvě hlavní ostří umístěné symetricky vůči ose vrtáku a propojené příčným ostřím. Pro přesné vedení vrtáku je vrták opatřen válcovou fazetkou umístěnou na vedlejších ostřích. U šroubovitých vrtáků se setkáváme s dvěma typy stopek, a to s válcovou nebo kuželovou označovanou jako kužel Morse. Dále se dělí podle směru otáčení, délky a stoupání šroubovice.

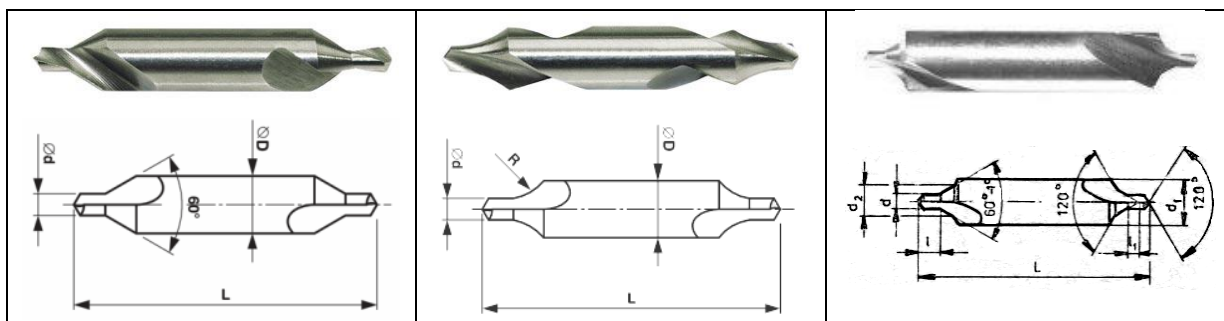


Obr. 13 Šroubovitý vrták s válcovou stopkou, povlakovaný [4].

Vyrábějí se z nízkolegovaných ocelí s označením -C-, z rychlořezných ocelí s označením -HSS- nebo z vysokovýkonných rychlořezných ocelí obohacených o kobalt označované jako -HSS Co-. U větších průměrů se vyrábí vrták ze dvou částí,

stopka je z konstrukční oceli a tělo nástroje je vyrobeno z nástrojové oceli. Pro obrábění litin, ale i ocelí se v případě potřeby používají vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami. Některé vrtáky jsou povlakovány nitridem titanu pro zvýšení řezivosti a otěruvzdornosti.

Středící vrtáky se používají pro navrtávání. Navrtání je důležitá technologická operace pro přesné určení polohy osy děr. U soustružení se navrtání používá pro upnutí do hrotů.

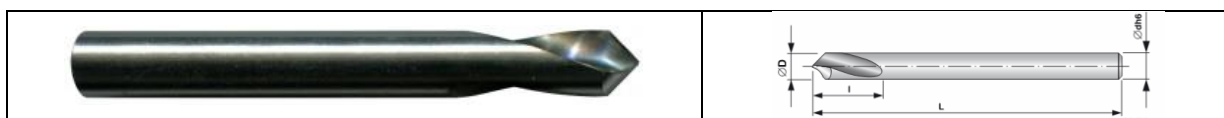


Obr. 14 Středící vrták 60°
tvar A
(ČSN 22 1110) [4].

Obr. 15 Středící vrták 60°
tvar R
(ČSN 22 1116) [4].

Obr. 16 Středící vrták 60°
tvar B
(ČSN 22 1112) [4].

Kromě středících vrtáků existují **navrtáváky**, které se používají na NC a CNC strojích. Navrtáváky mají vrcholový úhel 90°, 120° nebo 145°, tedy větší oproti středícím vrtákům, které mají 60°.



Obr. 17 NC navrtávák 90° (ZVSE 221185) [4].

Dělové vrtáky

K vrtání hlubokých děr se používají dělové vrtáky, kterými lze vyvrtat díru několika desítek až stovek průměrů vrtáků. Mají k tomu uzpůsobené ostří, které zajišťuje co nejlepší vedení, tak aby nedošlo k vybočení mimo osu. Nutno předvrtat šroubovitým vrtákem, aby bylo zajištěno správné vedení. Řezná část je tvořena ze slinutého karbidu, nebo rychlořezné oceli. Držák je ve tvaru trubky, která má menší průměr než vrtaný otvor. Uvnitř držáku se přivádí pod tlakem procesní médium.



Obr. 18 Dělový vrták [4].

Vrtací hlavy a jádrové vrtáky

Pro vrtání velkých průměrů (od 20 mm) do plného materiálu se používají vrtací hlavy. Vrtací hlava je osazena břitovými destičkami, které jsou buď připájené, nebo mechanicky spojené s tělem vrtací hlavy. U vrtacích hlav se přivádí procesní médium mezi vrtákem a dírou a odchází společně s třískami vnitřní částí vrtáku. Na obdobném principu se používají jádrové vrtáky. Používají se pro díry průměrů 120 až 140 mm. Profil řezu je ve tvaru mezikružší, takže nedochází k obrábění na celém průřezu díry.



Obr. 19 Vrtací hlavy [5].

Jako vysoce výkonné vrtáky můžeme označit **vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami**. Poté se vrták skládá ze dvou částí, a to z držáku, který je vyroben z některé z konstrukčních ocelí vyšší pevnosti, a z řezné části, která se skládá minimálně ze dvou vyměnitelných břitových destiček, které se upínají mechanicky, obvykle šroubem s vnitřním šestihranem. Vzhledem k rychlostem, které u těchto vrtáků lze použít, můžeme nazvat tyto vrtáky vysokovýkonnými nástroji. Přesnost těchto vrtáků je určena tuhostí nástroje.

2.6 Druhy strojů

Dříve byly pro vrtání využívány hlavně vrtačky se svislým vřetenem. Nyní se v sériové výrobě vrtání provádí na víceúčelových obráběcích centrech. Klasické vrtačky najdeme pouze v kusové výrobě.

Vrtačky dělíme na:

- a) Stolní vrtačka.
- b) Sloupcová vrtačka.
- c) Stojanová vrtačka.
- d) Radiální vrtačka.

Stolní vrtačka je tvořena vřeteníkem, v kterém je umístěn motor, převodovka a vřeteno. Vřeteník je umístěn na sloupu, který je pevně přidělán ke stolu. Většinou se používá k vrtání děr do průměru 16 mm.

Sloupcová vrtačka je obdobná jako stolní, ale sloup je pevně připevněn k podstavci. Na sloupu s vřeteníkem se nachází též posuvný stůl. Většinou se používá k vrtání děr do průměru 40 mm.



Obr. 20 Stolní vrtačka [5].



Obr. 21 Sloupcová vrtačka [5].

Stojanová vrtačka má robustní stojan, na kterém se pohybuje vřeteník a stůl. Dle pevnosti stojanu lze vrtat díry průměru až 80 mm.

Radiální vrtačka má vřeteník posuvný na rameni. Rameno se může výškově nastavovat na sloupu, který je pevně přichycen k základní desce. Na základní desku se upínají větší obrobky a menší obrobky se upínají přes upínací kostku.



Obr. 22 Stojanová vrtačka [5].



Obr. 23 Radiální vrtačka [5].

2.7 Teplo a teplota při vrtání

Teplota při obrábění je velmi důležitý parametr při obrábění. Teplo při obrábění vzniká přeměnou mechanické energie, takto se přemění 95 až 98% energie na teplo. Pro zachování tepelné bilance se musí rovnat teplo vzniklé v místě řezu teplu odvedenému z místa řezu. Tepelnou bilanci můžeme vyjádřit rovnicí:

$$Q = Q_{\text{tr}} + Q_{\text{def}} = Q_N + Q_T + Q_O + Q_P \quad [\text{J}]. \quad (18)$$

Kde:

Q celkové teplo [J],

Q_{tr} teplo vzniklé třením při obrábění [J],

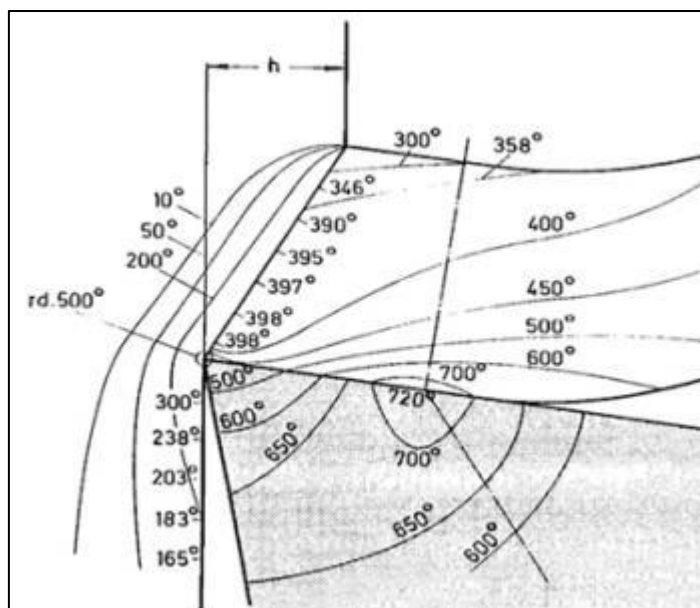
Q_{def} teplo vzniklé z plastických a pružných deformací [J],

Q_N teplo odvedené nástrojem [J],

Q_T teplo odvedené třískou [J],

Q_O teplo odvedené obrobkem [J],

Q_P teplo odvedené prostředím [J].



Obr. 24 Rozložení teplot v místě řezu [5].

Množství vzniklého tepla závisí na vynaložené práci při obrábění. Práce se dá vyjádřit jako velikost síly působící na určité dráze, z toho vyplívá vztah:

$$Q = F_C \times v_C \times t \text{ [J]}. \quad (19)$$

Kde:

- Q..... celkové teplo [J],
- F_C řezná složka síly obrábění [N],
- v_C řezná rychlost [m/min],
- t čas obrábění [min].

Teplo ovlivňuje několik faktorů významných při obrábění, jako jsou mechanické změny, petchování a zpevňování obrobeného materiálu. Dále teplo negativně působí na řezné vlastnosti nástroje a ovlivňuje tření na čele i hřbetu nástroje. Teplo také ovlivňuje trvanlivost nástroje.

Teplota nepřímo ovlivňuje řezný proces. Na velikosti vzniklého tepla závisí použití řezné rychlosti, posuvu a hloubky řezu.

03 Řezné prostředí

Strojírenský průmysl se pořád vyvíjí, stejně tak i technologie obrábění. Vývojem procházejí obráběcí stroje, řezné nástroje, ale také procesní média. Zároveň s tímto vývojem je dbáno mnohem více na bezpečnost práce, snižování nákladů na výrobu a v neposlední řadě zasahuje do technologie obrábění také ekologie.

Rozvoj s sebou nese nové strategie při obrábění, jedná se o tuhost a větší využitelnost strojů, vývoj nových nástrojů a úpravu jejich geometrie, až k procesním médiím, která pomáhají zlepšit řezné parametry.

Na procesní média máme několik technologických požadavků. Hlavními z nich jsou mazací a chladicí účinek. Chladicím účinkem rozumíme schopnost odvodu tepla z místa řezu a mazacím účinkem rozumíme schopnost bránit přímému styku nástroje a obrobku. Další požadavek je čisticí účinek, který spočívá v odstraňování třísek z místa řezu. Požadujeme také provozní stálost, ochranný účinek, aby médium nezpůsobovalo korozi a zdravotní nezávadnost. Požadavek na přiměřené provozní náklady, které spočívají především se spotřebou řezného média.

Mezi procesní média řadíme kapaliny, plyny, mlhy a pasty. Z ekonomického hlediska je důraz na zefektivnění využití těchto médií. Snaha je o snižování množství média, které se musí ekologicky likvidovat, především se jedná o kapaliny. Tento fakt vede k využití obrábění za sucha, neboli jen s přítomností atmosférického vzduchu, a k využití plynů jako procesních médií. Obrábění za sucha můžeme uplatnit pouze v případě, že lze zaručit stejnou jakost obrobku, za stejný strojní čas.

3.1. Důvody využití řezného prostředí

Minimalizace množství tepla

Při obrábění, hlavně při dokončovacích operacích je potřeba zabránit tepelným deformacím obrobku. Pokud je zabráněno tepelným deformacím, lze docílit nízkých tolerancí rozměrů a tvarů obrobku. S ohledem na toleranci výsledných rozměrů je nutno minimalizovat odvod tepla obrobkem. Obecně se celkové množství tepla sníží zmenšením množství měrné energie na řezný proces.

S tím úzce souvisí ochlazování třísek, které mohou zůstat v dutině obrobku, upínacího přípravku nebo obráběcího stroje. Pokud nejsou použity řezné kapaliny, je ochlazovací efekt třísek velmi malý. Proto je nutno se zaměřit na odstraňování třísek z výše jmenovaných oblastí.

Nízký koeficient tření

Nízký koeficient tření zajišťují procesní kapaliny, Také ho lze dosáhnout vhodným typem ochranné vrstvy nanesené na břit, jedná se o povlaky nitridu pro vrtání, především nitridy titanu a chromu.

Odvod třísek z místa řezu

K zahlcování místa řezu třískami může docházet především u vrtání, závitování a brusných nástrojů, ale i u frézování. Pokud nedochází k dokonalému odvodu třísek z místa řezu, poškozují se obrobená plocha a břit nástroje, pokud se třísky dostanou mezi nástroj a obrobek. Odvod třísek lze zajistit odplavováním procesní kapalinou, vyfukováním procesním plynem, nebo musí být zajištěno odsávání.

Trvanlivost břítu

Při obrábění může docházet k velmi intenzivnímu střídání teplot při obrábění, zejména při přerušovaném řezu. Tím se zatěžuje břit nástroje. Na břítu následně může docházet k mikroskopickým a následně makroskopickým trhlinám, které mohou způsobit vylovení břítu. Toto vzniká především u přerušovaného řezu. Použitím procesního média se může intenzita střídání teplot razantně zvýšit, čímž se sníží trvanlivost nástroje. Teplotní stálosti dosáhneme většinou obráběním za sucha.

3.2. Kapalně prostředí

Fyzikální a chemické vlastnosti řezných kapalin se projevují mazacím účinkem, chladicím účinkem a čisticím účinkem. U řezných kapalin je také požadavek na provozní stálost, zdravotní nezávadnost a přiměřené náklady.

3.2.1 Druhy řezných kapalin

Řezné kapaliny se rozdělují na kapaliny s převažujícím mazacím účinkem a s převažujícím chladicím účinkem. Mezi řezné kapaliny patří vodní roztoky, emulzní kapaliny, mastné oleje, zušlechtěné řezné oleje a syntetické kapaliny.

Vodní roztok je nejjednodušší typ řezné kapaliny, ale není příliš vhodný z hlediska aplikace. Vodní roztoky mají převažující chladicí účinek. Voda jako základ těchto roztoků musí podstoupit několik úprav, změkčování, přidání přísad proti korozi a pro zlepšení smáčivosti. Vodní roztok musí být alkalický. Vodní roztoky jsou náchylné na tvorbu kalů a nepříjemných zápachů, z důvodu rozmnožování bakterií.

Minerální oleje jsou výrobky z ropy s dobrými mazacími vlastnostmi. Oproti tomu mají malý chladicí faktor. Mají dobrou ochrannou účinnost a dobrou odolnost proti stárnutí. Jsou základem pro řezné oleje.

Řezné oleje jsou zušlechtěné minerální oleje, které se vyznačují vysokým mazacím účinkem. Do řezných olejů jsou přidávány přísady pro zlepšení mazací schopnosti. Tyto přísady jsou mastné látky, organické sloučeniny a pevná maziva.

Emulzní roztoky tvoří disperzní soustavu dvou nerozpustných kapalin, oleje a vody, z nichž jedna tvoří mikroskopické kapky, které jsou rozptýlené v druhé kapalině. Emulzní kapaliny kombinují přednosti olejů a vodních roztoků. Chladicí účinek je dán koncentrací emulze. Emulzní roztoky tvoří 80 % všech použitých řezných kapalin.

Mastné oleje a tuky jsou látky živočišného a rostlinného původu. Jejich vlastnosti jsou obdobné jako u minerálních olejů, ale mají větší náchylnost ke stárnutí. Mastné oleje také lépe odvádějí teplo než minerální oleje. Mezi mastné látky patří: řepkový olej, ricinový olej, lněný olej a další.

Syntetické kapaliny mají velkou provozní stálost a mají větší mazací a chladicí schopnosti než minerální oleje. Jsou většinou rozpustné ve vodě.

Metoda obrábění	Ocel			Litina	Nikl a slitiny	Bronz a slitiny	Měď a slitiny	Hliník a slitiny	Hořčík a slitiny
	nízkouhlíková	s vyšším obsahem uhlíku	nerozová						
Soustružení	D 3	D5	D10	-	E	D3	D3	D3	B
Vrtání a vystružování	E, D10	F	J	D5	E	B	B	B	B
Frézování	D5	D5	D10	D5	F	B	D3	D3	B
Řezání závitů	H	J	J	D10	J	C	B	C	B
Řezání pilou	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	B
Výroba ozubení	E	F	J	D5	-	B	-	-	-
Protahování	J	J	J	D10	J	C	B	C	B
Broušení	D2	D2	D2	D2,5	D2	D2	D2	D2	B

Tab. 1 přehled doporučených řezných kapalin pro různé metody obrábění [8]

Legenda:

A – minerální oleje,

B – mastné oleje,

C – maštěné oleje,

D – emulze (číslo značí koncentraci v %),

E – minerální oleje s přísadami,

F – lehké minerální oleje s přísadami,

H – oleje aditivované,

J – maštěné oleje s přísadami.

3.2.2 Práce s řeznou kapalinou

Přívodem řezné kapaliny do místa řezu můžeme pozitivně ovlivnit parametry řezného procesu, zejména trvanlivost břítu nástroje a jakost plochy. Aby procesní kapalina pozitivně ovlivňovala proces obrábění, musí se čistit. Nečistoty v řezné kapalině mají negativní vliv na drsnost povrchu a snižuje se trvanlivost nástroje. Kapalina se čistí usazováním nebo filtrací.

Nutná je i výměna kapalin. Četnost výměny řezné kapaliny závisí na provozních časech, druhu obrábění a požadované přesnosti.

Kapaliny nejsou zdravotně ani požárně zabezpečeny. Každý pracovník by měl dbát bezpečnostních předpisů, které dodavatel přikládá k produktu.

3.3 Plynné prostředí

Většina obráběcích operací se provádí při dokonalém chlazení a mazání s přívodem řezné kapaliny. Chlazení plynem se začalo využívat při obrábění pomocí slinutých karbidů a řezné keramiky. Plyn je přiváděn pod tlakem do místa řezu. Má nízký chladicí i mazací účinek. Vhodné plyny jsou CO_2 , N_2 , inertní argon nebo freon pod vysokým tlakem, pomocí kterého se odstraňují třísky a nečistoty z místa řezu. Pro používání plynů musejí být obráběcí haly dobře odvětrávány. Kromě těchto plynů se využívá i podchlazený vzduch.

Plynné látky jako řezná média nejsou běžně rozšířena, protože mají relativně nízký chladicí účinek, problematický čistící účinek a žádný mazací účinek. Některé obráběné materiály, případně nástrojové materiály se však chladí vzduchem přiváděným pod tlakem do místa řezu. U prvních slinutých karbidů a řezných keramik bylo povoleno výhradně chlazení vzduchem, až na základě pozdějšího rozvoje technologie výroby bylo umožněno výrobcům nástrojů doporučovat pro tyto materiály i použití řezných kapalin.

Jedním z účinných způsobů chlazení plynem je chlazení stlačeným CO_2 (tenký paprsek plynu se do místa řezu přivádí pod tlakem 0,5 až 7,0 MPa), doporučováno např. pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Tato metoda má řadu nevýhod, k nimž patří především vysoké náklady na CO_2 , jisté nebezpečí při jeho používání a nutnost dokonalého odsávání a větrání pracoviště. Zvláštním případem aplikace plynného řezného prostředí je tzv. suché obrábění, kdy řezným prostředím je atmosférický vzduch. Rozšiřování tohoto způsobu obrábění souvisí s vývojem nových řezných materiálů, které nevyžadují chlazení, a přesto jsou schopny výkonně a efektivně obrábět. [5]

3.3.1. Obrábění s využitím podchlazeného vzduchu

Jedná se o efektivní způsob chlazení místa řezu. Využití podchlazeného vzduchu jako procesního média je využíváno hlavně při finálním opracování, není tak vhodné pro těžké a střední hrubování včetně vrtání.

K výrobě podchlazeného vzduchu se využívá vírová trubice. Její princip byl objeven úplnou náhodou francouzským fyzikem Georgem Ranquem v roce 1930. Jedná se o jednoduché zařízení, které ještě není dostatečně teoreticky popsáno.

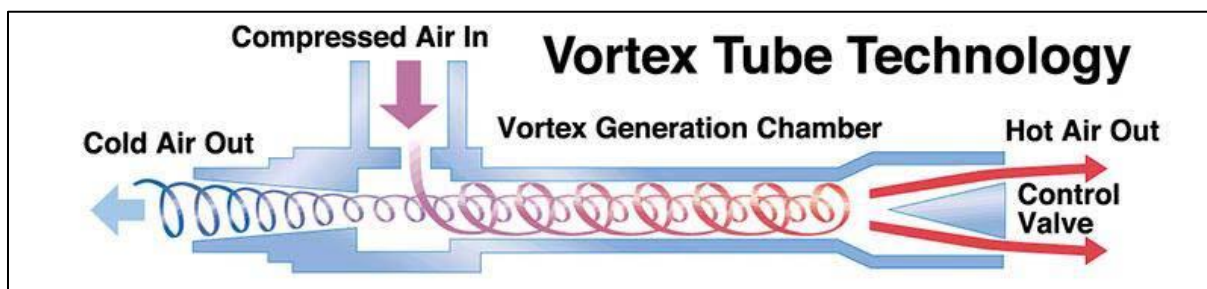


Obr. 25 Vírová trubice [9].

Kromě obrábění kovů může být tento způsob chlazení využíván například ke svařování nebo řezání papírových krabic.

Princip vírové trubice (Cold Air Gun – obchodní název)

Stlačený vzduch vstupuje do tangenciálně vrtaného stacionárního generátoru (kde dosahuje až rychlosti zvuku), který nutí vzduch rotovat trubici podél vnitřní stěny směrem k horkému řídicímu ventilu. Část tohoto vzduchu vystupuje přes jehlový ventil jako horký výfuk vzduchu. Zbývající vzduch je tlačěn zpět středem proudu vzduchu, kde stále se točící se pohybuje pomalejší rychlostí při konání jednoduché (přirozené) výměny tepla. Vnitřní pomaleji se pohybující sloupec vzduchu nechává teplo vnějšímu rychleji se pohybujícímu sloupci vzduchu. Když pomalejší vnitřní sloupec vzduchu prochází středem stacionárního generátoru a vystupuje studeným výfukem, dosáhne extrémně nízké teploty. Odcházející vzduch dosahuje teploty až +100 °C. Vzduch, který neodchází, je tlačěn středem proudu vzduchu na opačnou stranu. Zde vystupuje jako studený vzduch, který dosahuje teploty až -46 °C. Trubice se připojuje k centrálnímu rozvodu stlačeného vzduchu, kterým disponuje už většina firem. [9]

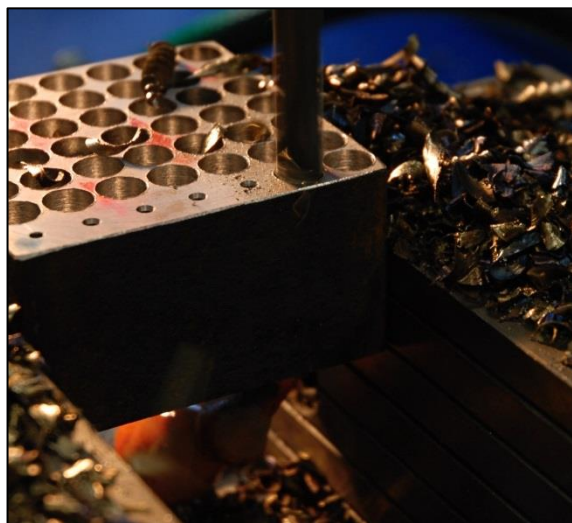


Obr. 26 Princip vírové trubice [9].

Využití při technologii vrtání

Efektivní přívod podchlazeného vzduchu z vírové trubice k místu řezu při vrtání, je přívod do předvrtaného otvoru. Z toho je vyvozena podmínka, že obrobek musí být předvrtaný nebo musí mít např. předlitou díru. Také je potřeba pod obrobkem mít dostatek místa pro přívod k předem předvrtanému otvoru.

Pokud bychom přiváděli ochlazený vzduch ze stejného směru jako pohyb vrtání, ochlazovaly bychom třísky a tělo vrtáku.



Obr. 27 Vrtání s vírovou trubicí.

3.3.2. Obrábění za využití zkapalněného CO₂

Všechny plynné látky mají relativně malý chladicí účinek. S větším efektem se dostavil způsob chlazení stlačeným CO₂. Tento způsob chlazení je zvláště vhodný u těžkoobrobitelných materiálů. Tenký paprsek plynu se přivádí až do místa řezu pod tlakem 0,5 až 7 MPa. Velkým nebezpečím a nevýhodou této metody jsou vysoké náklady a nutnost dokonalého odvětrávání pracoviště.

Podstata vynikajících vlastností chlazení dodávaného bez ztráty tlaku je ukryta v dodávání chlazeného média o teplotě -73 °C. Z tohoto důvodu mohou technologové navýšit řezné podmínky, jelikož první experimenty ukázaly, že se životnost nástrojů zdvojnásobila. V současné době se pracuje na tříkanálovém řešení, kde bude možné chladit oxidem uhličitým, aerosolem a emulzí.

Teoreticky zde pojednáváme o zavedení nové tzv. čisté technologie. Tak čisté, že podniky nebudou prakticky produkovat žádný odpad. Oxid uhličitý se po vykonání práce odpaří do vzduchu, jako jeho přirozená součást. [10]

Využití při technologii vrtání

Zde musí být splněna podmínka přívodu k místu řezu jako u vírové trubice, a to zespodu obrobku do předvrtaného otvoru. Při použití CO₂ nepotřebujeme tolik místa zespodu obrobku, přívod plynu je zajištěn pouze malou kapilárou a nezabere tolik místa jako přívod vírovou trubicí. Nebo je možnost přivádět CO₂ uvnitř těla vrtáku, pokud je k tomu stroj a nástroj uzpůsoben.



Obr. 28 Přívod CO₂ kapilárou do předvrtaného otvoru.

3.3.3. Obrábění za využití zkapalněného dusíku

Obrábění s využitím zkapalněného dusíku je obdobné jako obrábění s využitím zkapalněného oxidu uhličitého. U dusíku dochází k takzvanému kryogennímu chlazení, které je definováno teplotou nižší, než je $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dusík s jeho teplotou varu nám to zaručuje při $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, tím dochází k většímu chladicímu faktoru, ale zůstává zde nulový mazací účinek.

3.4 Obrábění za sucha

Při obrábění za sucha odpadají náklady spojené s procesním médiem (nákup, likvidace, doprava a odvod z místa řezu popřípadě filtrace). Pokud srovnáme ekonomické náklady, které tvoří použití řezné kapaliny, jedná se o 7 až 16 % výrobních nákladů na jeden obrobek. Náklady na nástroj se pohybují v rozmezí 2 % až 4 % na jeden obrobek.

Nejdůležitějším faktorem je tedy teplota v místě řezu, která ovlivňuje především životnost nástroje. Tato teplota je přibližně o $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyšší než u obrábění s procesní kapalinou. Je nutno zvolit takovou technologii a parametry obrábění, aby nedocházelo k tepelným deformacím obrobku. Vyšším teplotám také musí odolávat nástroj a musí být zajištěn odvod třísek z místa řezu. Pokud se jedná o obrábění s přerušovaným řezem, nedochází zde k intenzivnímu střídání teplot na břitu nástroje. Obrábění za sucha je šetrné k lidskému zdraví a neznečišťuje pracovní prostředí.

04 Experimentální část

Experimentální část je zaměřena na účinek procesních plynů na technologii vrtání. Plynná média, která byla při experimentech využita, jsou atmosférický vzduch, podchlazený vzduch a zkapalněný oxid uhličitý. V experimentální části jsou shrnuty podmínky, za kterých bylo prováděno obrábění, popis měření jednotlivých parametrů, zpracování výsledků a jejich vyhodnocení.

V experimentální části jsou vyhodnocována měření v průběhu obrábění, jako je teplota v místě řezu, působící síla a moment a trvanlivost nástroje. Dále jsou vyhodnoceny konečné parametry, kterými jsou drsnost a rozměrová přesnost obrobku.

4.1. Charakteristika strojů a měřicích zařízení

Tato kapitola popisuje použité stroje a zařízení při zpracování experimentální části této bakalářské práce. Veškerá příprava vzorků, jejich zkoumání a měření probíhalo v Technické univerzitě v Liberci, konkrétně v laboratoři Katedry obrábění a montáže (dále jen „laboratoř KOM TUL“).

4.1.1. Obráběcí stroj – Pásová pila

Příprava vzorků začala přípravou hrubého polotovaru dělením na pásové pile. Pásová pila na kov typu ARG 300 Plus H.F. od firmy Pilous (obr. 29) je součástí laboratoře KOM TUL. Technické parametry této pásové pily jsou shrnuty v tabulce 2.



Obr. 29 Pásová pila Pilous ARG 300 plus H.F.

Rozměr pilového pásu	3 110 × 27 × 0,9 [mm]
Maximální rozměr řezu kruhového průřezu 90° / 40° / 60°	300 / 240 / 155 [mm]
Maximální rozměr řezu čtvercového průřezu 90° / 40° / 60°	300 / 230 / 150 [mm]
Maximální rozměr řezu obdélníkového průřezu na ležato 90° / 40° / 60°	360 × 290 / 250 × 290 / 155 × 155 [mm]
Maximální rozměr řezu obdélníkového průřezu na stojato 90° / 40° / 60°	340 × 300 / 210 × 300 / 135 × 135 [mm]
Výkon motoru 400V	2,3 [kW]
Rychlost pilového pásu	15 – 90 [m/min]
Rozměry stroje	1600 × 950 × 1600 [mm]
Hmotnost stroje	570 [kg]

Tab. 2 Technické parametry pásové pily Pilous, ARG 300 Plus H.F. [11].

4.1.2 Obráběcí stroj – NC frézka

Srovnání hrubého polotovaru na požadované rozměry a tvar bylo provedeno na frézce FNG 32 od výrobce TOS Olomouc s. r. o. (obr. 30), která je součástí laboratoře KOM TUL. FNG 32 je konvenční nástrojařská frézka, v našem případě číslicově řízená (NC) s vertikálním vřetenem. Parametry frézky jsou shrnuty v tabulce 3.



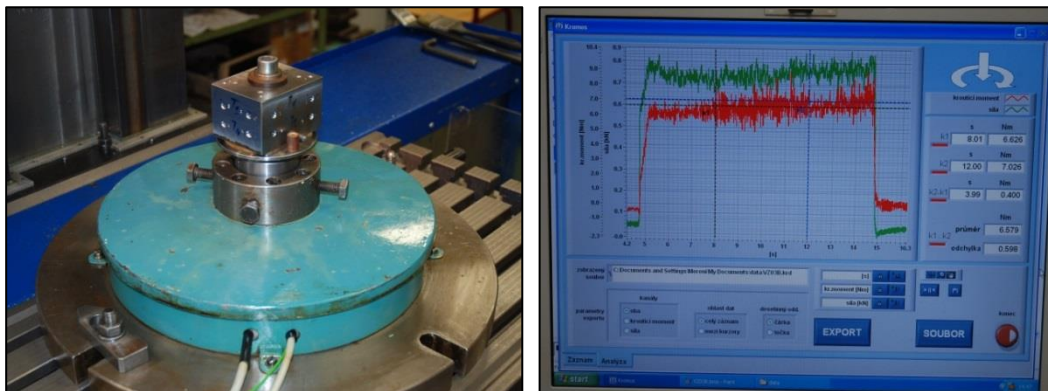
Obr. 30 Nástrojařská NC frézka FNG32, TOS Olomouc s. r. o. [12]

Stůl	
Rozměr pracovní plochy	800 × 400 [mm]
Upínací drážky (počet / rozteč)	7 / 14 × 50 [mm]
Maximální zatížení stolu	350 [kg]
Pracovní zdvih (podélný – X / příčný – Y / svislý – Z)	600 / 400 / 400 [mm]
Posuv pracovní X, Y	15 – 1 000 [mm/min]
Posuv pracovní Z	6 – 400 [mm/min]
Rychloposuv X, Y	2 000 [mm/min]
Rychloposuv Z	800 [mm/min]
Vertikální vřeteno	
Vzdálenost osy vřetene od vedení stojanu	250 – 650 [mm]
Rozsah otáček	50 – 4 000 [ot.*min ⁻¹]
Řazení otáček	plynulé
Natočení vřetena	± 90°
Výsuv pinoly	80 [mm]
Upínání nástroje	pneu-hydraulické
Stroj	
Výkon hlavního motoru	4,0 [kW]
Výkon posuvného motoru	1,1 [kW]
Celkový příkon	22 [kVA]
Hmotnost	2 500 [kg]
Zastavěná plocha	2 070 × 2 120 [mm]
Výška	2 115 [mm]

Tab. 3 Technické parametry frézky FNG 32, TOS Olomouc s. r. o. [12].

4.1.3. Elektrický odporový dynamometr

Elektrický odporový dynamometr (obr. 31) funguje na principu změny odporu deformací vodiče nebo polovodiče. Dynamometr je tedy osazen odporovými tenzometry. Změna odporu vodiče je přímo úměrná deformaci, která vzniká na deformačním elementu (obrobku) působením síly nebo krouticího momentu. [13]



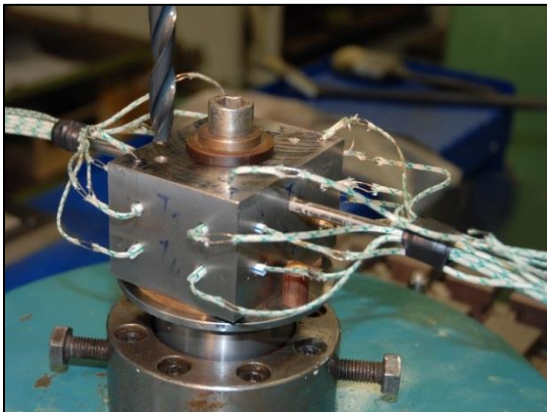
Obr. 31 Elektrický odporový dynamometr a software Kromos.

Dynamometr byl připojen přes jednotku, která zpracovává hodnotu odporu, do počítače. Pro záznam hodnot a zpracování měřených dat byl využit software Kromos.

4.1.4. Termočlánek typu K

Podstatou umělého termočlánku je umístění termočlánku přímo do místa řezu. Termočlánky fungují na principu termoelektrického jevu. Tento jev využívá vzniku termoelektrického napětí v obvodu tvořeného dvěma různými vodiči, jejichž konce jsou vodivě spojeny, jestliže jsou oba spoje udržovány na různých teplotách. Při obrábění toho využijeme tak, že měřicí spoj umístíme k místu řezu a srovnávací spoj udržujeme na známé teplotě. Velikost napětí, které ve vodičích vznikne, je závislé na rozdílech teplot, ale také na kombinaci materiálů vodiče. [13]

Termočlánek typu K tvoří kombinace slitin vodičů nikl-chrom (Ni-Cr) a nikl-hliník (Ni-Al). Obor měřitelných teplot při dlouhodobějším použití je $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při krátkodobém použití se dá měřit až $1\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 32 Obrobek s navařenými termočláanky.



Obr. 33 Provozní jednotka PP65.



Obr. 34 Sběrnice s připojenými termočláanky a svorkovnicemi [13].



Obr. 35 Kondenzátorová svářečka.

Jednotlivé termočlánky byly přivařeny k obrobku (obr. 32) kondenzátorovou svářečkou (obr. 35), do místa měření. Termočlánky byly připojeny do svorkovnic a následně do sběrnice (obr. 34) ve správném pořadí a polaritě, připojené na provozní jednotku PP65 od firmy B&R (obr. 33). Provozní jednotka zaznamenávala jednotlivé měření, výstupem byly teploty jednotlivých termočlánků v čase obrábění. [14]

4.1.5. Dílenský mikroskop ZEISS

Dílenským mikroskopem byla měřena trvanlivost nástroje, neboli opotřebení břitu nástroje pro jednotlivá procesní média.

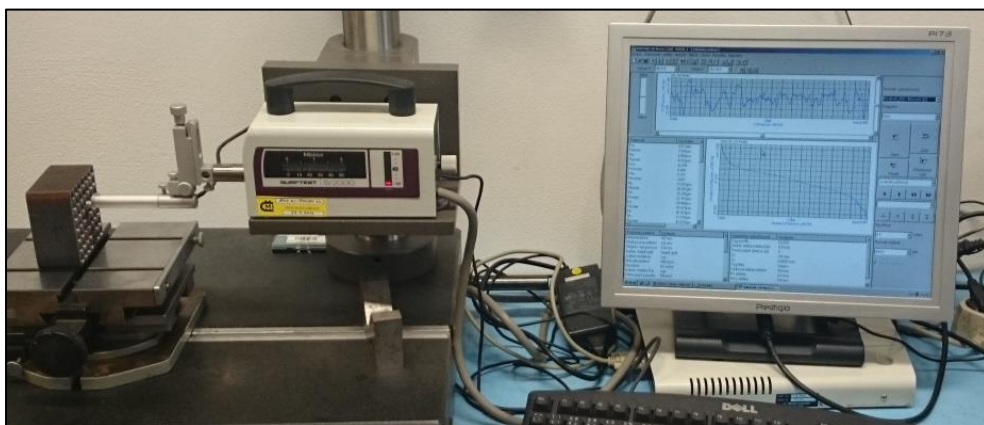
Mikroskop je osazen dvěma mikroskopickými šrouby, kterými lze pohybovat se stolem ve dvou osách. Lze také rotovat kolem svislé osy. Okulár je vybaven nitkovitým křížem, který slouží pro měření. [13]



Obr. 36 Dílenský mikroskop ZEISS [10].

4.1.6. Laboratorní profilometr MITUTOYO

Laboratorní profilometr Mitutoyo SurfTest SV-2000N2 (obr. 37) pracuje na principu dotykové metody snímání povrchu. Pomocí hrotu je snímán povrch nerovnosti povrchu a v převodníku dochází k transformaci pohybu hrotu na elektrický signál. Tento signál je zpracován pomocí počítačového softwaru SurfPak. Pomocí tohoto softwaru jsme schopni snadno vyhodnotit měřené parametry jakosti povrchu.



Obr. 37 Profilometr Mitutoyo SV-2000N2.

4.1.7. Digitální dutinoměr MITUTOYO

Dutinoměr Mitutoyo Holtest Digimatic s rozsahem měření 10 až 12 mm byl použit pro zjištění rozměrové přesnosti. Tento digitální dutinoměr má přesnost pro tento měřený rozsah $\pm 2 \mu\text{m}$ a číslicový krok je 0,001 mm. [15]



Obr. 38 Dutinoměr Mitutoyo Holtest Digimatic.

4.1.8 Digitální posuvné měřítko

Technické parametry jsou uvedeny v tabulce 4.

Rozsah	0-150 [mm]
Rozlišení	0,01 [mm]
Přesnost	0,02 [mm]

Tab. 4 Technické specifikace digitálního posuvného měřítka. [15]

4.2. Příprava zkušebních vzorků

Pro zkušební vzorky byla zvolena uhlíková ocel k zušlechťování a povrchovému kalení dle **ČSN 41 2050** (ocel 12 050.1 – normalizačně žíhaná). Podle normy ISO je označení **C60E4**. Mechanické vlastnosti této oceli jsou uvedeny v tabulce 5.

Ocel byla zvolena v polotovaru **TYČE ČTVERCOVÉ 80 × 80 × 1 000 dle ČSN 42 5520.0**. Použijeme-li značení polotovaru a materiálu dle normy ČSN 01 3142: **4HR 80 – ČSN 42 5520.0 – 12 050.1**

Ocel 12 050		
Obsah uhlíku	%	0,42 až 0,50
Mez kluzu	MPa	275 až 590
Mez pevnosti	MPa	460 až 1 060
Tvrдость	HB	183 až 300
Třída odpadu	–	002

Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli 12 050.

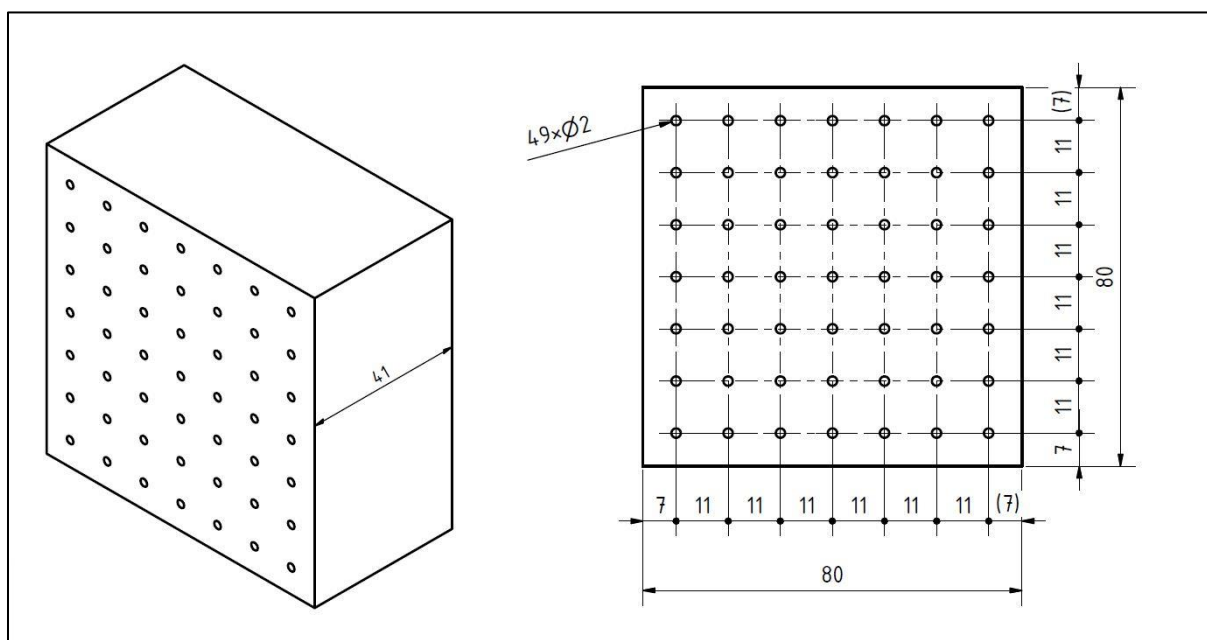
V první fázi byl polotovár rozdělén na pásové pile Pilous ARG 300 Plus H.F (obr. 39). Následně byly vzorky frézovány na přesný rozměr 80 × 80 × 41 mm (obr. 40). Vzorek s těmito rozměry se navrtal 49 dírami průměru 2 mm na ploše 80 × 80 mm (obr. 41). Díry byly vzdáleny 11 mm od sebe a v každé ose bylo 7 děr. Díry byly připraveny z technologického hlediska pro přívod procesního plynu.



Obr. 39 Nařezání polotovaru.



Obr. 40 Frézování na přesný rozměr.



Obr. 41 Schéma vzorku připraveného na trvanlivost.

Tyto vzorky byly využity pro měření trvanlivosti nástroje, celkem bylo připraveno 9 vzorků.

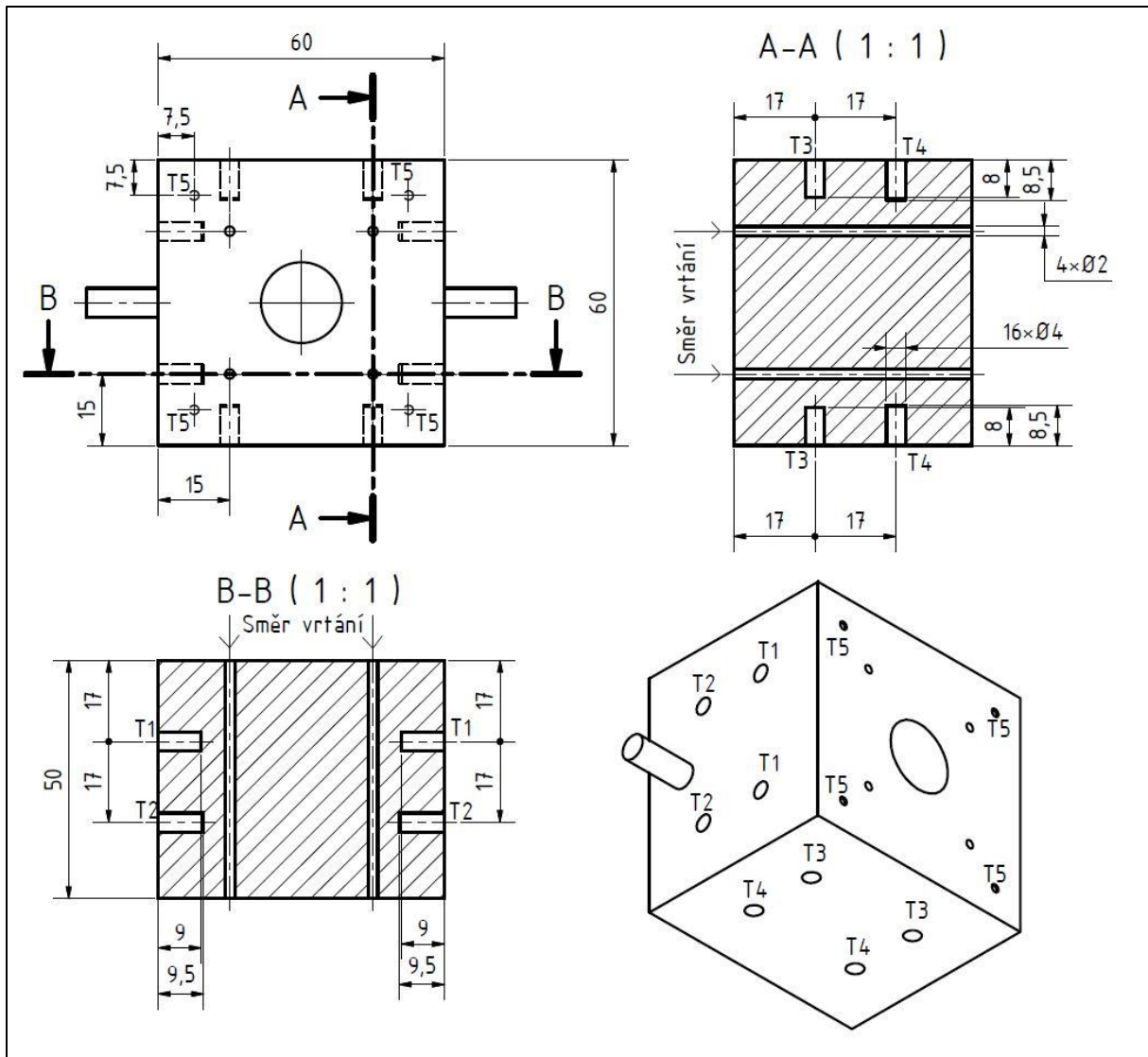
Pro **měření síly, krouticího momentu a teplot** byly připraveny vzorky o přesném rozměru 60 × 60 × 50 mm stejně jako vzorky pro měření trvanlivosti. Pro možnost upnutí vzorku na dynamometr, do vzorku jsme vyvrtali otvor průměru 17mm. Pro přívod procesního plynu byly do každého vzorku vrtány 4 díry o průměru 2 mm a vzdálenosti 15 mm od každé strany.



Obr. 42 Příprava děr pro termočlánky.

Do těchto vzorků byly připraveny otvory pro ústění termočlánků (obr. 42). Celkem se umístilo pro jedno měření pět termočlánků, každý termočlánek byl umístěn v jiné vzdálenosti od obráběné plochy. Pro termočlánky T1 až T4 bylo potřeba vyvrtat díru o průměru 4 mm. Tento proces byl proveden ve 4 krocích, nejprve došlo k orýsování a vyznačení středu díry důlčíkem. Ve druhém kroku byl vzorek navrtán navrtávkem a ve třetím kroku byla vyvrtána díra vrtákem průměru 4 mm do menší hloubky, než byla určena. V posledním kroku bylo zarovnáno čelo díry frézou o průměru 4 mm a dorovnáno na přesnou hloubku. Druhý až čtvrtý krok byl proveden na NC frézce FNG32, TOS Olomouc s.r.o. Pro termočlánek T5 bylo uděláno technologické navrtání na horní straně vzorku pro přesné umístění.

Ze stran termočlánků T1 a T2 ve výšce 10 mm od spodní hrany vzorku byly vyvrtány otvory pro vložení kolíků průměru 6 mm. Tyto kolíky zaručovaly přenos krouticího momentu beze ztráty do dynamometru. Celkem bylo připraveno 5 vzorků na měření teploty, síly a krouticího momentu.



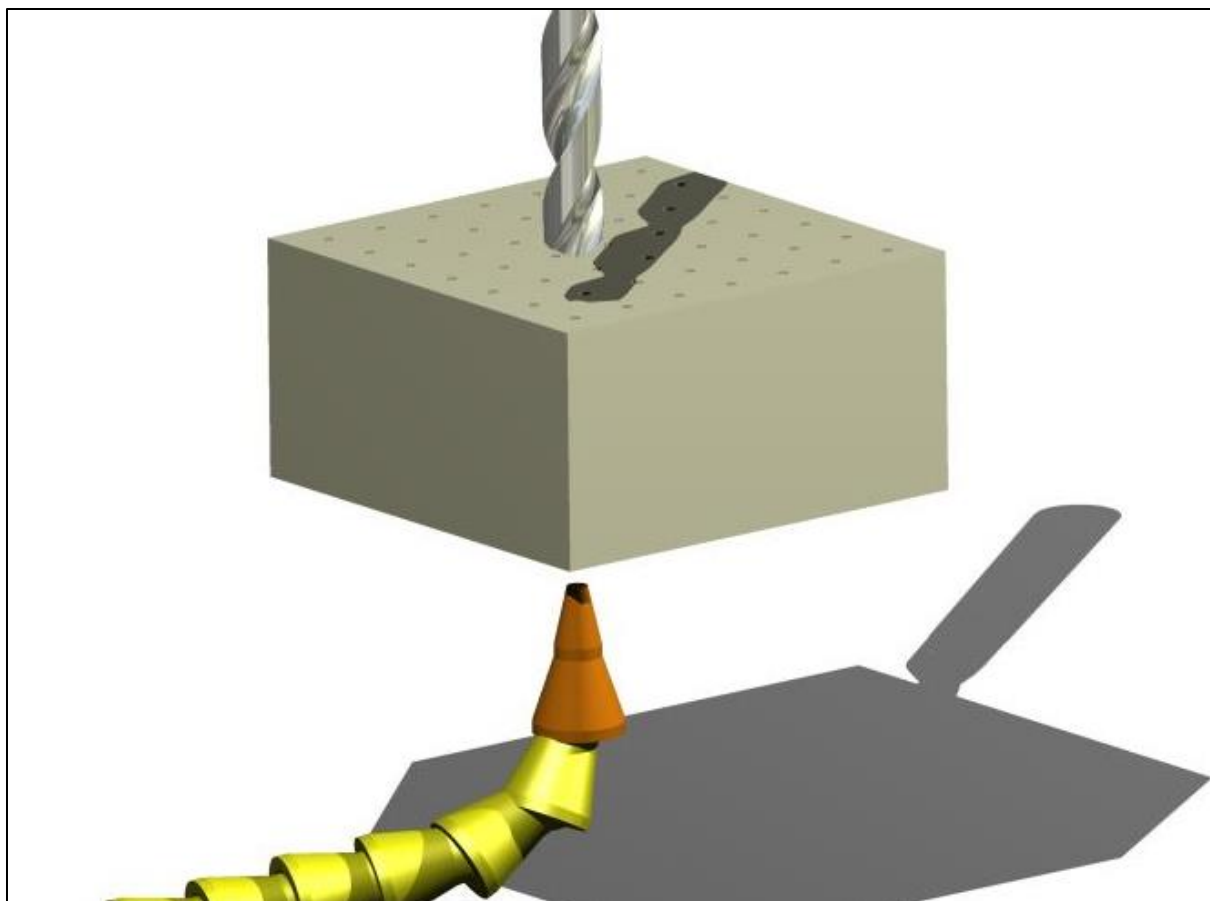
Obr. 43 Schéma vzorku pro měření teploty, síly a krouticího momentu.

4.3. Charakteristika přívodu procesních médií

Pro měření vzorků byly zvoleny tři druhy rezného prostředí, atmosférický vzduch neboli obrábění za sucha, s přívodem podchlazeného vzduchu a s přívodem zkapalněného oxidu uhličitého.

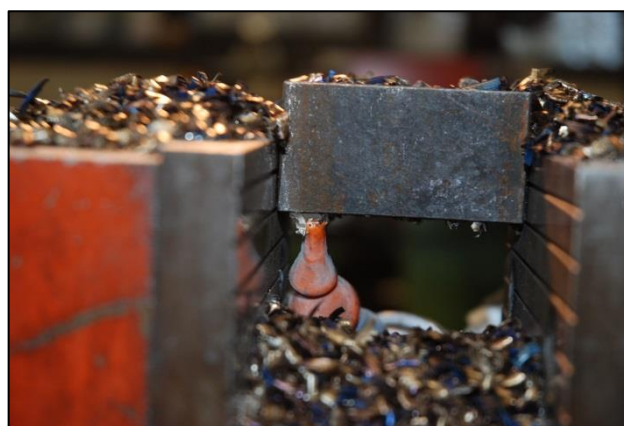
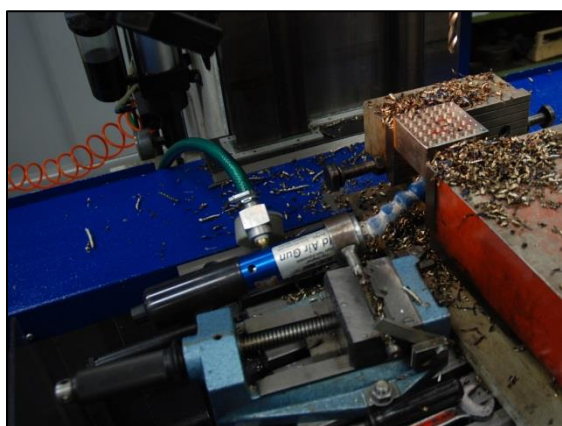
4.3.1. Přívod podchlazeného vzduchu

Pro přívod podchlazeného vzduchu. K místu řezu od vírové trubice byla použita hadice z kloubových článků. Tato hadice byla co možná nejkratší, aby nedocházelo k výrazným ztrátám do okolí. Vírová trubice byla upevněna do samostatného svěráku za uchycovací část.



Obr. 44 Schéma přívodu podchlazeného vzduchu.

Přívod podchlazeného vzduchu byl ze spodní části vzorku proti směru pohybu vrtáku do předem připravených technologických děr o průměr 2 mm. Tím byl zaručen přívod procesního média do místa řezu a efektivní využití podchlazeného vzduchu. Pro každý vrtaný otvor se musela vírová trubice přenastavit.

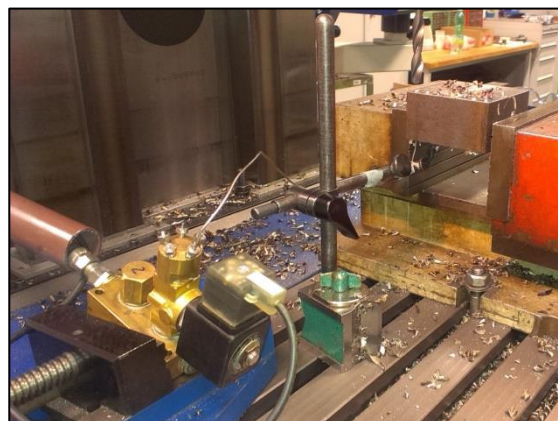


Obr. 45 Přívod podchlazeného vzduchu vírovou trubicí k místu řezu.

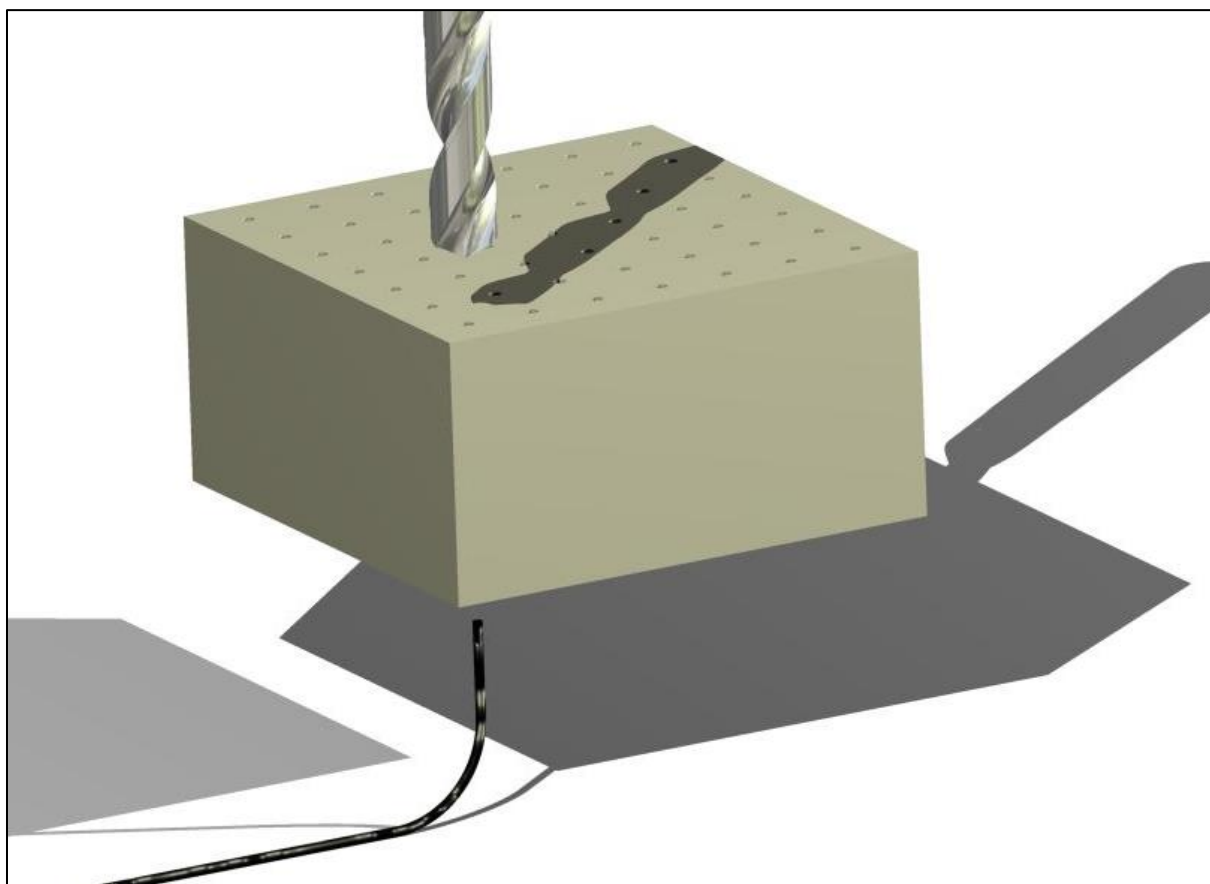
Vírová trubice byla napojena na centrální rozvod stlačeného vzduchu. Před jejím použitím byla minimálně 30 minut zapnutá, aby se nachladila. Tím bylo zaručeno stejného chlazení u všech vrtaných otvorů.

4.3.2. Přívod zkapalněného oxidu uhličitého

Zdrojem oxidu uhličitého byla tlaková láhev, z které byl přiveden zkapalněný oxid uhličitý k elektronicky řízenému ventilu. Ventil byl upnut ve svěráku na stole frézky a od ventilu k místu řezu byl oxid uhličitý dopravován kapilárou. Kapilára byla u vzorku upevněna magnetickým stojánkem, aby nedošlo k vychýlení směru proudu plynu. Tím byla zajištěna dodávka oxidu uhličitého do technologicky připraveného otvoru po celou dobu obrábění.



Obr. 46 Řídicí jednotka CO₂ Control a elektronicky řízený ventil s kapilárou.



Obr. 47 Schéma přívodu zkapalněného CO₂

Pro řízení ventilu byla využita jednotka CO₂ Control (obr. 46) od firmy Linde Gas, která zaručovala přívod média po celou dobu v době obrábění jednotlivých děr. Ze zadaných parametrů rychlosti posuvu a délky obrábění byl vypočtený čas obrábění a s přídavkem zadaný do jednotky CO₂ Control. Čas přívodu oxidu uhličitého byl 15 vteřin pro každý vrtaný otvor.

4.4. Metodika experimentu

V této kapitole jsou shrnuty podmínky, za kterých docházelo k obrábění jednotlivých vzorků. Dále je tu podrobně popsáno měření jednotlivých veličin.

Jednotlivé měřené parametry pro každé řezné prostředí:

1. Měření řezné síly a momentu.
2. Teplota obrobku.
3. Trvanlivost nástroje.
4. Drsnost povrchu.
5. Rozměrová přesnost.

Veškeré měření vzorků proběhlo na NC frézce, kde byla nastavena stejná rychlost otáčení vřetene a posuv pro vzorky trvanlivosti a vzorky měření teploty, síly a momentu. U všech experimentů byl použit stejný nástroj stejného průměru a stejný materiál. Díky tomu byla zaručena stejná kritéria pro všechny druhy obrábění v různých řezných prostředích. Pracovní podmínky jsou shrnuty v tabulce 6.

Stroj	Frézka FNG 32	
Nástroj	Šroubovitý vrták \varnothing 10 mm HSS ČSN 221121	
Způsob obrábění	Vrtání do předvrtaných děr	
Materiál vzorků	Ocel 12 050.1	
Rozměr vzorků trvanlivosti	80 × 80 × 41	[mm]
Rozměr vzorků na měření teploty, síly a momentu	60 × 60 × 50	[mm]
Otáčky vřetene n	1 000	[ot/min]
Posuv f	250	[mm/min]
Hloubka záběru a_p	4	[mm]
Řezné prostředí 1	Obrábění bez chlazení	
Řezné prostředí 2	Obrábění s využitím podchlazeného vzduchu	
Řezné prostředí 3	Obrábění s využitím zkapalněného oxidu uhličitého	

Tab. 6 Pracovní podmínky.

Pro řezná prostředí jsme zvolili označování vzorků (tab. 7) písmeny VZ, dále bylo označení řezného prostředí 01 až 03 a posledním znakem bylo pořadové písmeno jednotlivých vzorků (v tabulce značeno písmenem X).

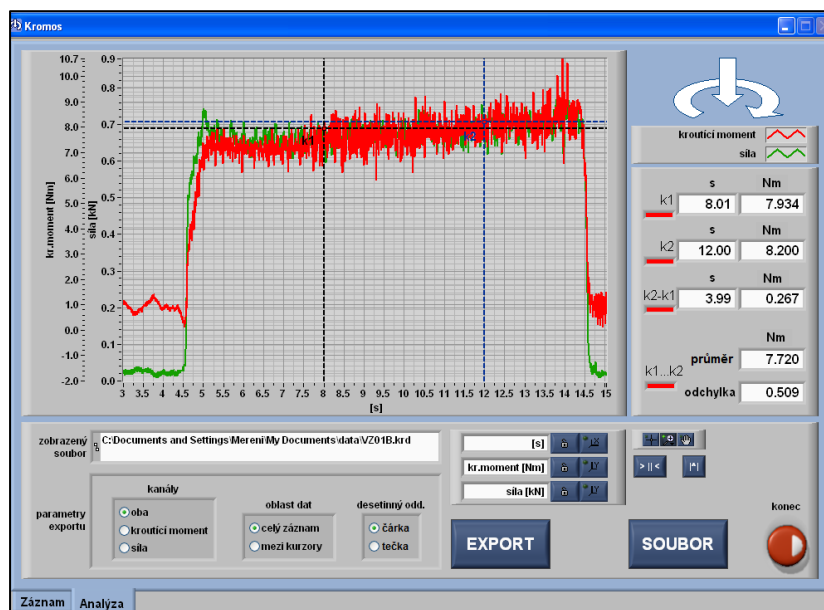
Řezné prostředí	Označení
Obrábění za sucha	VZ01X
Obrábění s vírovou trubicí	VZ02X
Obrábění s CO ₂	VZ03X

Tab. 7 Označování vzorků podle řezného prostředí.

4.4.1 Metodika měření řezné síly a momentu

Měření řezné síly a momentu bylo provedeno na elektrickém odporovém dynamometru. Měřila se síla působící v ose vrtáku na vzorek a krouticí moment se středem v ose vrtáku. Měření probíhalo na vrtané délce 40 mm. Hodnoty měření zaznamenával software Kromos. Kromě záznamu hodnot program přímo vykresloval hodnoty do grafu.

Záznam hodnot byl zapnut před najetím vrtáku do vzorku a ukončen po zastavení posuvu. Naměřené hodnoty byly exportovány do textového souboru s příponou *.csv. Program zaznamenal každou vteřinu 200 hodnot každé veličiny.



Obr. 48 Graf síly a momentu v softwaru Kromos (obrábění bez procesního média).

Na grafech v softwaru Kromos je zobrazen červenou čarou krouticí moment a zelenou čarou působící síla. Pomocí těchto grafů bylo možno okamžitého srovnání naměřených hodnot a jejich porovnání. Dalo se také okamžitě vyloučit chybné měření a zopakovat ho.

Pro zpracování naměřených dat byl vybrán úsek každého měření trvající 9,5 vteřiny obrábění vzorku. Tyto hodnoty byly rozděleny po 0,5 vteřině a z těchto časových úseků byla vytvořena střední hodnota síly a momentu. Tímto jsme eliminovali různé pulzování síly a momentu. Pro vyhodnocení celkové síly a momentu pro jedno řezné prostředí byla vyhodnocena střední hodnota z hodnot v jednotlivých úsecích stejného řezného prostředí. Z těchto hodnot pro každé médium lze vytvořit graf krouticího momentu a síly jednotlivých prostředí v závislosti na čase. Vyhodnocování výsledků probíhalo z 5 měření.

4.4.2 Metodika měření teploty obrobku

Měření teploty obrobků probíhalo pomocí termočlánků typu K. Tyto termočlánky se přivařily kondenzátorovou svářečkou na připravená místa ve vzorku. Tato místa jsou znázorněna v kapitole 4.2. Příprava zkušebních vzorků na obrázku 43. Po přivaření byly termočlánky připojeny do svorkovnice a ta byla následně připojena do sběrnice. Ze sběrnice se zaznamenávaly hodnoty v provozní jednotce PP65.

Při měření jednoho vzorku jsou zaznamenávány teploty z pěti termočlánků označených T1 až T5. Přivedení podchlazeného vzduchu bylo zahájeno do otvoru 15 vteřin před začátkem nájezdu vrtáku do materiálu, u CO₂ to bylo 5 vteřin díky využití elektricky spínaného ventilu.

Ze zaznamenaných hodnot byly vyhodnoceny počáteční a maximální hodnoty teploty na jednotlivých termočláncích T1 až T5. Pro vzorky VZ03 byla vyhodnocena minimální teplota, neboli teplota maximálního podchlazení zkapalněným CO₂. Hodnoty jsou střední hodnotou měření v jednotlivých řezných prostředích. Hodnoty jsou zpracovány z 5 měření pro každé médium.

4.4.3 Metodika měření trvanlivosti nástroje

Měření trvanlivosti nástroje se hodnotilo z hlediska dvou parametrů. Jeden parametr bylo opotřebení na hlavním ostří a druhý parametr bylo opotřebení na vedlejším hřbetu. Zkoumání těchto dvou hodnot se provádělo na dílenském mikroskopu. Měření bylo prováděno na vzorcích o velikosti 80 × 80 × 41 mm.

Maximální vrtaná délka byla 2 009 mm. Pokud bylo překročeno alespoň jedno kritické opotřebení, byla délka vrtání kratší. Kritická hodnota na hlavním ostří byla stanovena hodnotou $O_{HO\ kr.} = 0,3$ mm a na vedlejším hřbetu byla stanovena hodnotou $O_{VH\ kr.} = 3$ mm. První kontrola opotřebení byla provedena po 7 vyvrtané díře (na délce 287 mm) a další kontroly byly prováděny po 6 otvorech (po 246 mm).

Celkem mohlo být provedeno 8 měření, pokud hodnoty nepřesahovaly kritickou mez, poté byl vrták vyřazen a pokračovalo se v novém měření. Pro každé řezné prostředí byly měřeny 3 nástroje.

Pro každé řezné prostředí byla vyhodnocena střední hodnota na určitých obrobených délkách, jedna hodnota pro opotřebení na hlavním ostří a jedna pro opotřebení na vedlejším hřbetu. Tyto hodnoty jsou zaneseny do grafu opotřebení v závislosti na délce obrábění, kde lze snadno zhodnotit použité řezné prostředí vůči trvanlivosti nástroje.

4.4.4 Metodika měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti bylo vyhodnocováno na vzorcích, na kterých byla vyhodnocována trvanlivost nástroje. Pro každé řezné prostředí byla změřena drsnost pro 5 otvorů. Ze vzorků trvanlivosti byly zvoleny dva otvory z trvanlivosti vrtáků A a B a jeden otvor z trvanlivosti vrtáku C. Otvory pro měření drsnosti byly voleny uprostřed vrtané délky (okolo 1 000 mm vrtané délky). Každý otvor byl změřen s 10 opakováními v různých hloubkách a s různým natočením.

Snímání drsnosti bylo prováděno na celkové délce 4,8 mm. Dle normy ČSN EN ISO 4288 je pro vyhodnocování zvolena délka 4 mm. Interval snímání je tedy oříznut o 0,8 mm základní délky na délku vyhodnocovací. Pro vyhodnocovací interval měření software Surfpack vyhodnotil drsnost povrchu dle různých parametrů.

Hodnocení povrchu proběhlo dle 3 parametrů drsnosti. Jako první parametr drsnosti je **Ra**. **Drsnost Ra** je definována jako průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu v rozsahu základní délky.

Druhým parametrem je **drsnost Rz**, je definována jako součet největší výšky výstupku a největší hloubky profilu v rozsahu základní délky.

Poslední parametr drsnosti udává **celkovou výšku profilu Rt**, ta je definována jako součet nejvyššího výstupku a nejnižší prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky.

Z naměřených hodnot drsností je vyhodnocena střední hodnota pro každý parametr hodnocení drsnosti pro všechny tři typy řezného prostředí.

4.4.5 Metodika měření rozměrové přesnosti

Měření rozměrové přesnosti probíhalo ve stejném rozsahu jako měření drsnosti. Ve stejných otvorech jako byla hodnocena drsnost. Opakováno bylo 10 měření v jednom otvoru.

Pro pokrytí celého otvoru proběhlo prvních 5 měření po vzdálenosti 8 mm, poté byl mikrometr pootočen o 60° a dalších 5 měření proběhlo po stejné vzdálenosti. Tím byl pokryt co nejlépe celý rozsah jednotlivých otvorů.

Z těchto hodnot byly vyhodnoceny střední hodnoty pro jednotlivá řezná prostředí.

4.5. Vyhodnocení experimentu

Vyhodnocení experimentu je z naměřených dat při zpracování experimentální části bakalářské práce podle výše popsané metodiky měření a záznamu dat a jeho vyhodnocení.

4.5.1 Měření síly a momentu

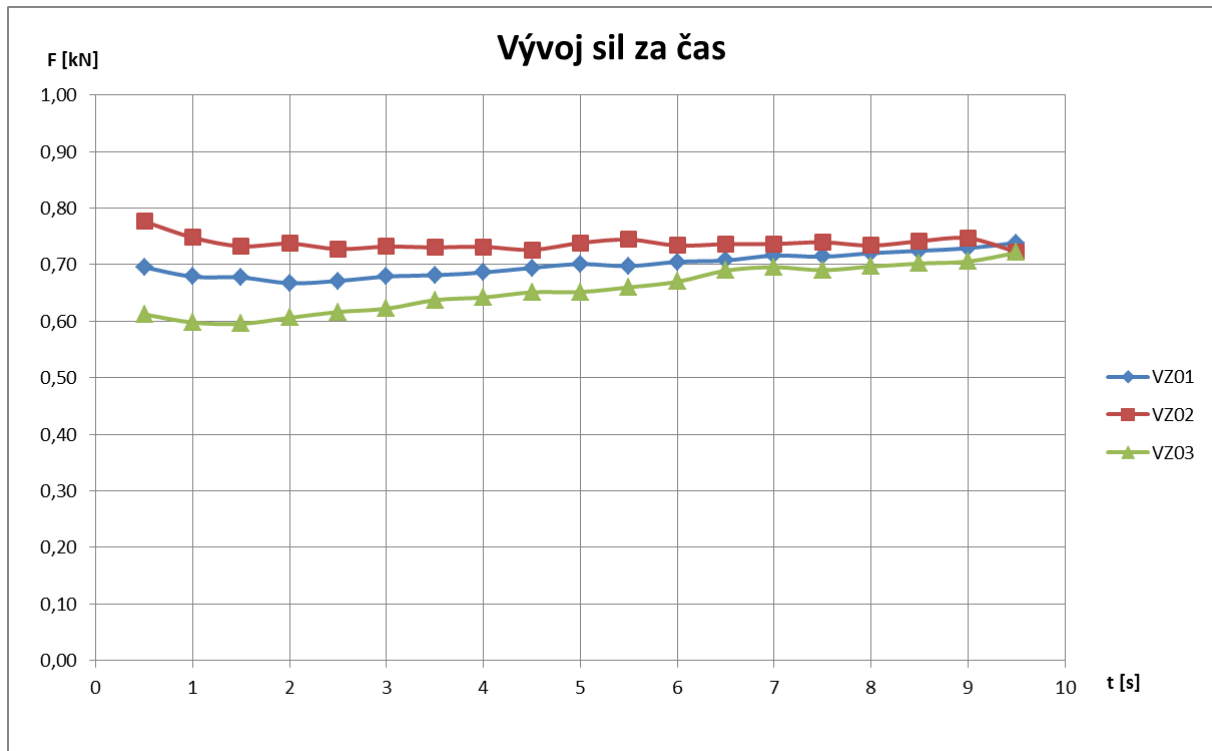
Měření síly a momentu probíhalo na elektrickém odporovém dynamometru. Měřená síla byla vytvořena posuvem vrtáku na obrobek, neboli ve směru osy. Měřený moment je moment, který se přenesl na obrobek z vřetene.

Po zpracování naměřených dat sil můžeme říci, že naměřené hodnoty bez procesního média (VZ01) mají konstantní průběh po celou dobu obrábění. Tato hodnota se pohybuje přibližně na 700 N.

Obrábění s přívodem podchlazeného (VZ02) vzduchu můžeme rozdělit do třech fází. Druhá fáze je konstantní a její konstanta je přibližně okolo 750 N a zabírá největší část ze zaznamenávaného intervalu. Fáze první je klesající na hodnotu konstanty druhé fáze. V poslední fázi je tendence také klesající. Některé průběhy můžeme také interpretovat jako konstantní na celém intervalu měření anebo lehce klesající na celém intervalu. Směrodatná je pro nás hodnota konstantní části, která je vyšší než u vzorků bez procesního média přibližně o 50 N.

Při obrábění s přívodem zkapalněného CO₂ (VZ03) má vývoj vzrůstající síly. Průběh začíná na hodnotě 600 N a končí na hodnotě 700 N. Můžeme tedy mluvit o nárůstu síly 10 N za sekundu při těchto podmínkách obrábění s využitím CO₂.

Zpracovaná data jsou v tabulce 8 a jejich průběhy vyobrazeny v grafu 1.



Graf 1. Průběh sil při obrábění.

Síla [kN]	VZ01	VZ02	VZ03
	0,70	0,74	0,66

Tab. 8 Hodnoty sil v jednotlivých úsecích měření.

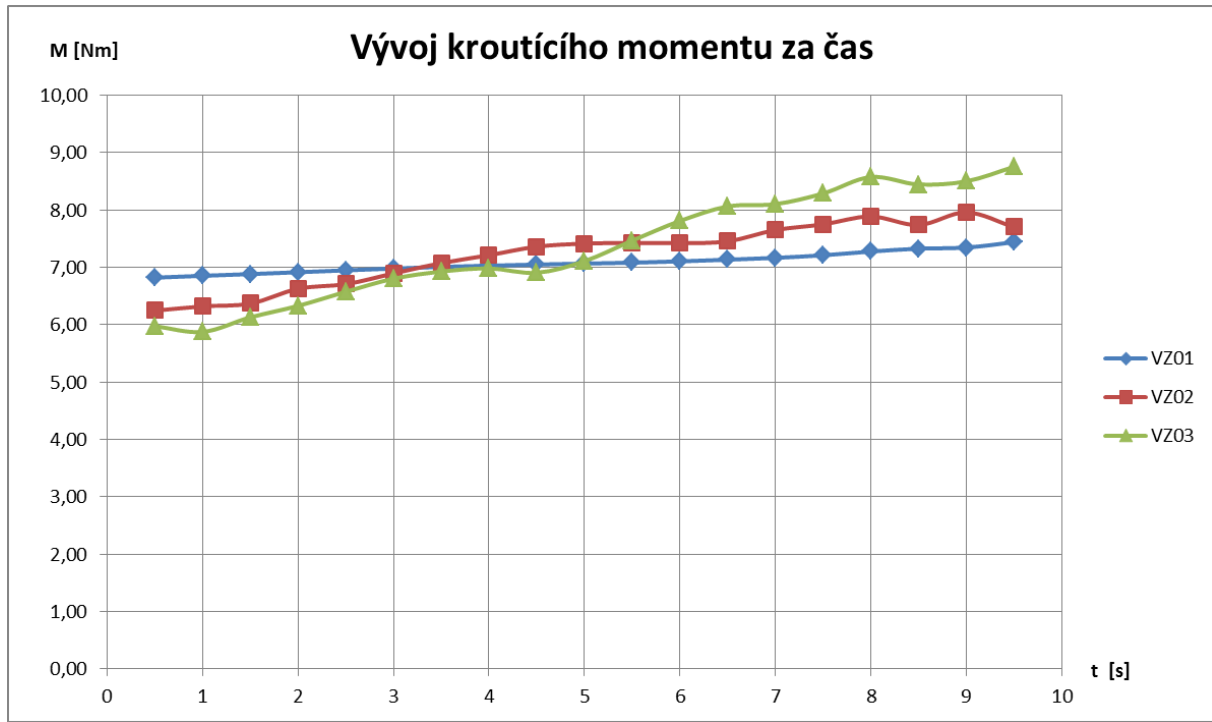
U hodnot sil nejsou tak velké rozdíly průběhů hodnot, jako byly naměřeny u kroučícího momentu. Největší nárůst kroučícího momentu byl zaznamenán u obrábění s přívodem zkapalněného CO_2 (VZ03). U obrábění s přívodem podchlazeného vzduchu (VZ02) je také na intervalu obrábění znatelný nárůst kroučícího momentu. Při obrábění bez procesního média (VZ01) můžeme hodnotit kroučící moment jako konstantní nebo lehce vzrůstající, ale tato hodnota nárůstu momentu je oproti vzorkům VZ02 a VZ03 zanedbatelná.

Konstantní hodnotou kroučícího momentu při obrábění vzorků VZ01 je hodnota přibližně $7 \text{ N}\cdot\text{m}$. Pokud obrábíme vzorky VZ02 je na počátku obráběného intervalu hodnota kroučícího momentu pod hodnotou vzorků VZ01 a na konci intervalu obrábění se pohybuje nad konstantní hodnotou vzorků VZ01. Toto platí i pro vzorky VZ03, ale s tím že tyto vzorky jsou na začátku intervalu i pod hodnotou vzorků VZ02 a jejich stoupání je strmější než u vzorků VZ02.

Hodnoty kroučícího momentu jsou zaneseny v tabulce 9 a v grafu 2.

Kroučící moment [N*m]	VZ01	VZ02	VZ03
	7,09	7,22	7,35

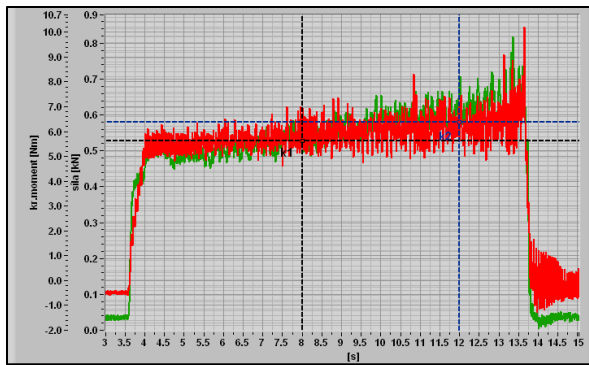
Tab. 9 Hodnoty kroučícího momentu v jednotlivých úsecích měření.



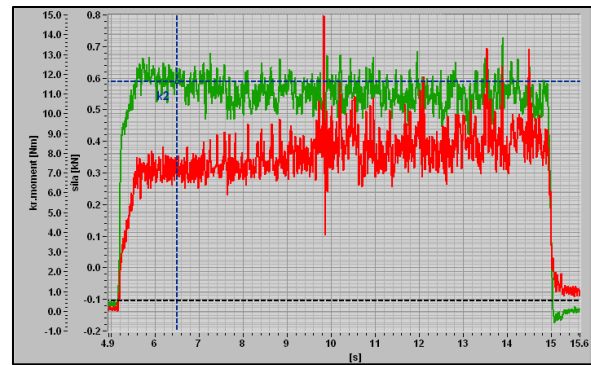
Graf 2. Průběh sil při obrábění.

Naměřené hodnoty síly a momentů jsou celkem nevýznamné, oproti průběhům měření. Hlavně u kroučícího momentu, kde nárůst momentu u CO₂ tak i u vírové trubice může působit velice negativně, pokud bude delší vrtaná délka.

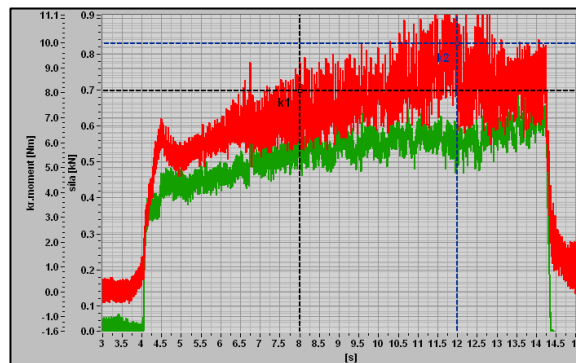
Nárůst kroučícího momentu, který vzniká s přívodem zkapalněného CO₂, je způsoben nulovým mazacím účinkem. Toto zapříčinilo i velké rozkmitání dynamometru, jak je vidět na obrázku 49. Podchlazený vzduch nemá tak veliké rozkmitání, to může být způsobeno nízkým přimazáváním centrální rozvodné soustavy stlačeného vzduchu v laboratoři, z které byl stlačený vzduch odebírán.



VZ01



VZ02



VZ03

Obr. 49 Grafy jednotlivých vzorků ze softwaru Kromos

Pro každé měření jsou zpracovány grafy ze softwaru Kromos. Tento program vyhodnotil grafy síly a krouticího momentu ze všech hodnot jednotlivých měření. Program zaznamenal 200 hodnot každé veličiny za vteřinu. Červená křivka znázorňovala vývoj krouticího momentu a zelená křivka znázorňovala vývoj síly.

4.5.2 Měření teploty obrobku

Měření teploty můžeme rozdělit na několik částí průběhu. V první řadě po zapnutí záznamu hodnot se objevuje lineární část, kde je snímána teplota okolí. Po přivedení procesního média u vzorků VZ03 dochází k podchlazení termočlánků na teplotu nižší, než je teplota okolí. U vzorku VZ02 k podchlazení termočlánků nedochází. Jeden důvod je silná stěna a nízký chladicí efekt vírové trubice. Následuje prudký nárůst teplot z důsledku tření při obrábění. V poslední fázi dochází k poklesu teploty na teplotu okolí.

Nejblíže obrobenému povrchu jsou termočlánky T1 a T2. Naopak nejdále byl termočlánek T5, který je na horní ploše obrobku. Na termočláncích T1 a T2 předpokládáme nejvyšší teplotu při obrábění. Naopak na termočlátku T5 nejmenší nárůst teploty. Přesto termočlánek T5 nebyl zahříván pouze teplotou šířenou

v obrobku, ale také odlétajícími třískami. Vyobrazení umístění všech termočlánků na vzorku je znázorněno na obrázku 43.

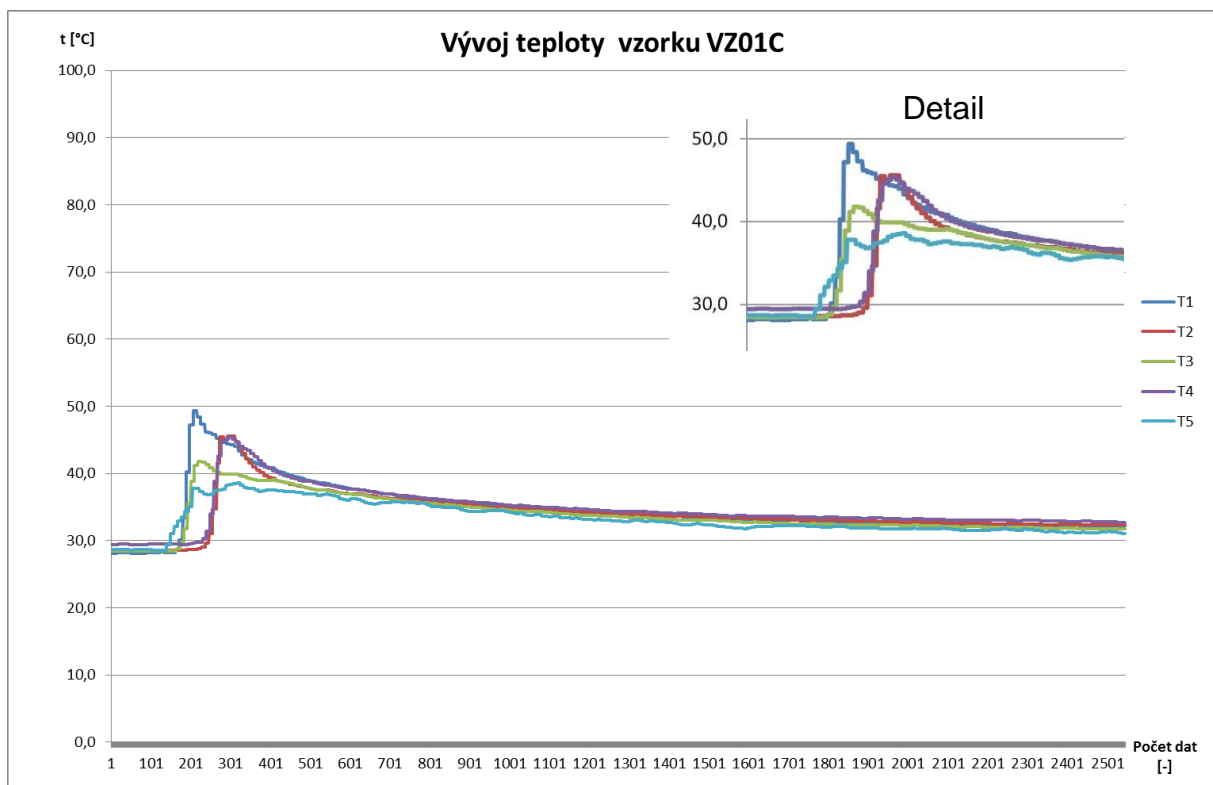
Vyhodnocení jednotlivých maximálních a počátečních teplot je zaneseno do tabulky 10. V tabulce je také zaznamenáno podchlazení u vzorků VZ03 od zkapalněného CO₂.

Vzorek	Teplota [°C]	Termočlánek				
		T1	T2	T3	T4	T5
VZ01	T _{poč}	28,8	28,6	29,3	29,8	29,6
	T _{max}	46,4	44,5	44,6	55,4	46,0
VZ02	T _{poč}	28,5	28,2	29,0	28,7	29,2
	T _{max}	55,6	54,7	48,0	41,4	45,8
VZ03	T _{poč}	27,5	27,1	27,9	28,1	28,4
	T _{max}	51,9	44,0	41,5	42,0	37,1
	T _{min}	26,0	21,9	26,8	24,0	26,3

Tab. 10 Hodnoty teplot jednotlivých termočlánků.

Legenda:

- T_{poč} Teplota při započtení měření teploty,
 T_{max} Maximální teplota dosažená při měření,
 T_{min} Minimální teplota dosažená při měření.



Graf 3. Vývoj teploty na vzorku VZ01C.

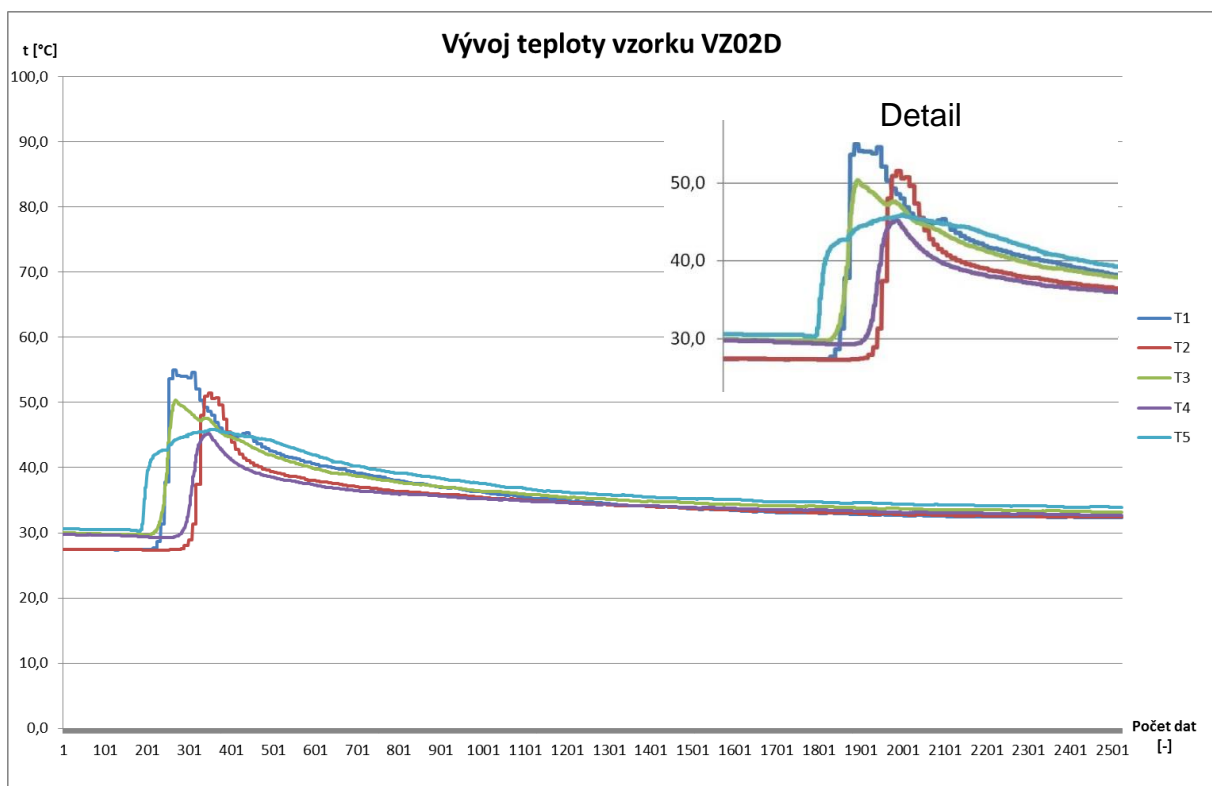
Vývoj teplot u vzorků bez procesního média (VZ01) má v první fázi konstantní náběh, poté rychlý nárůst teploty a v konečné fázi je pozvolné snížení teploty. Příklad vývoje teploty u vzorků VZ01 je znázorněn v grafu 3 na vzorku VZ01C.

U vzorků VZ02 některé hodnoty teplot vyšly vyšší než u vzorků VZ01, kde nedocházelo k žádnému chladicímu účinku. U vzorku VZ02 je možné, že vírová trubice nemá tak velký koeficient chlazení, aby se tato hodnota projevila ve výsledných hodnoceních. Na grafu 4 je znázorněn vývoj teploty na vzorku VZ02D.

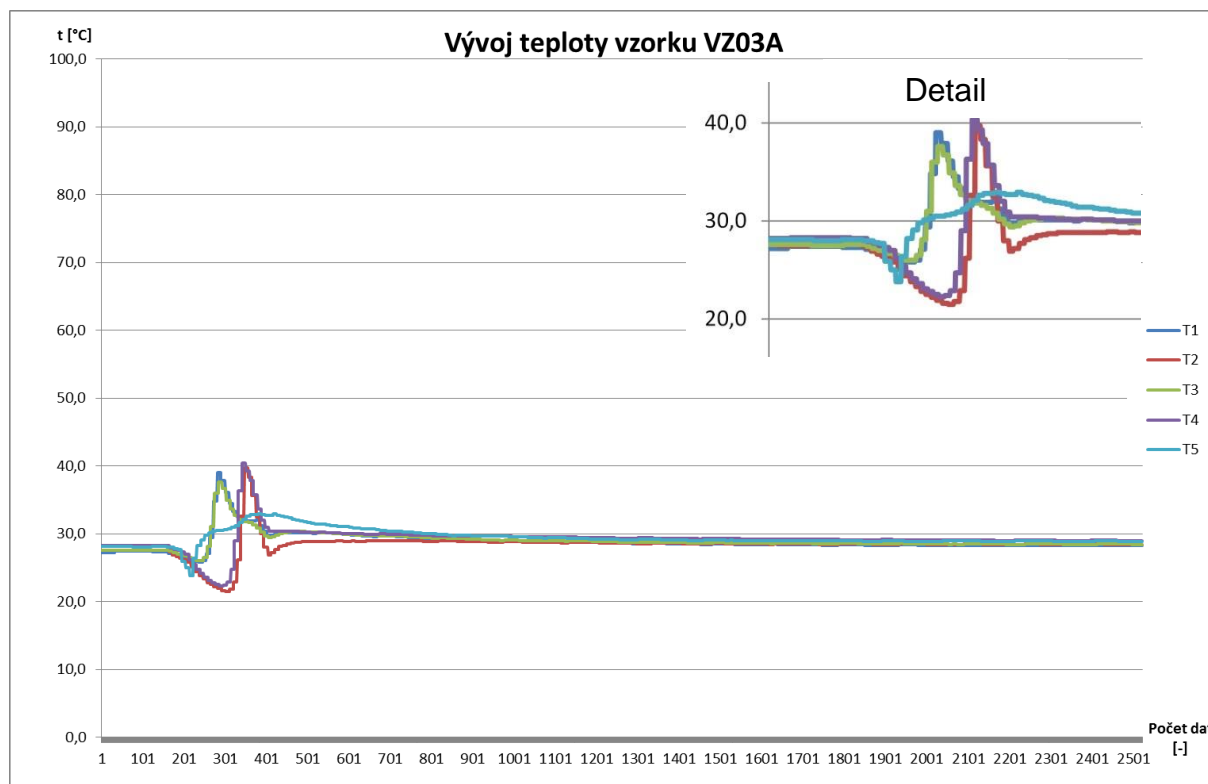
Naopak u tohoto vzorku je vidět, že termočlánky T1 a T2, které jsou nejbližší obráběné ploše, mají nejvyšší teplotu.

U měření teploty na vzorcích VZ03 způsobil zkapalněný CO_2 ochlazení termočlánků před tím než došlo k nájezdu nástroje do materiálu. Poté došlo k nárůstu teploty jednotlivých termočlánků nad hodnotu počáteční teploty. Maximální teplota u vzorků VZ03 nedosahovala hodnot naměřených u vzorků VZ01 a VZ02. V grafu 5 je znázorněn vývoj teploty při přívodu zkapalněného CO_2 do místa řezu na vzorku VZ03A.

Zkapalněný oxid uhličitý se dá považovat za výrazné chladicí médium pro snížení teploty obrobku. Oproti chlazení vírovou trubicí, která nedosahuje velkého chladicího efektu a má celkem podobné průběhy teploty jako vzorky VZ01.



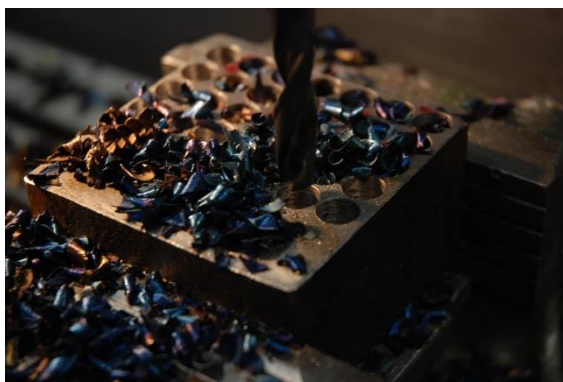
Graf 4. Vývoj teploty na vzorku VZ02D.



Graf 5. Vývoj teploty na vzorku VZ03A.

4.5.3 Měření trvanlivosti nástroje

Měření trvanlivosti proběhlo při podmínkách určených v tabulce 6, v kapitole 4.4.1 Pracovní podmínky. Celkové vrtané délky 2 009 mm nebylo dosaženo u dvou vzorků obráběných za sucha (VZ01), překročily kritickou mez na předposledním měření. U vzorků chlazených zkapalněným oxidem uhličitým (VZ03) došlo k destrukci nástroje také dvakrát, ale až na posledním měření. U nástrojů VZ03A až VZ03C docházelo k tvorbě nárůstků na břitu nástroje, které bylo nutné vždy před měřením odstranit.



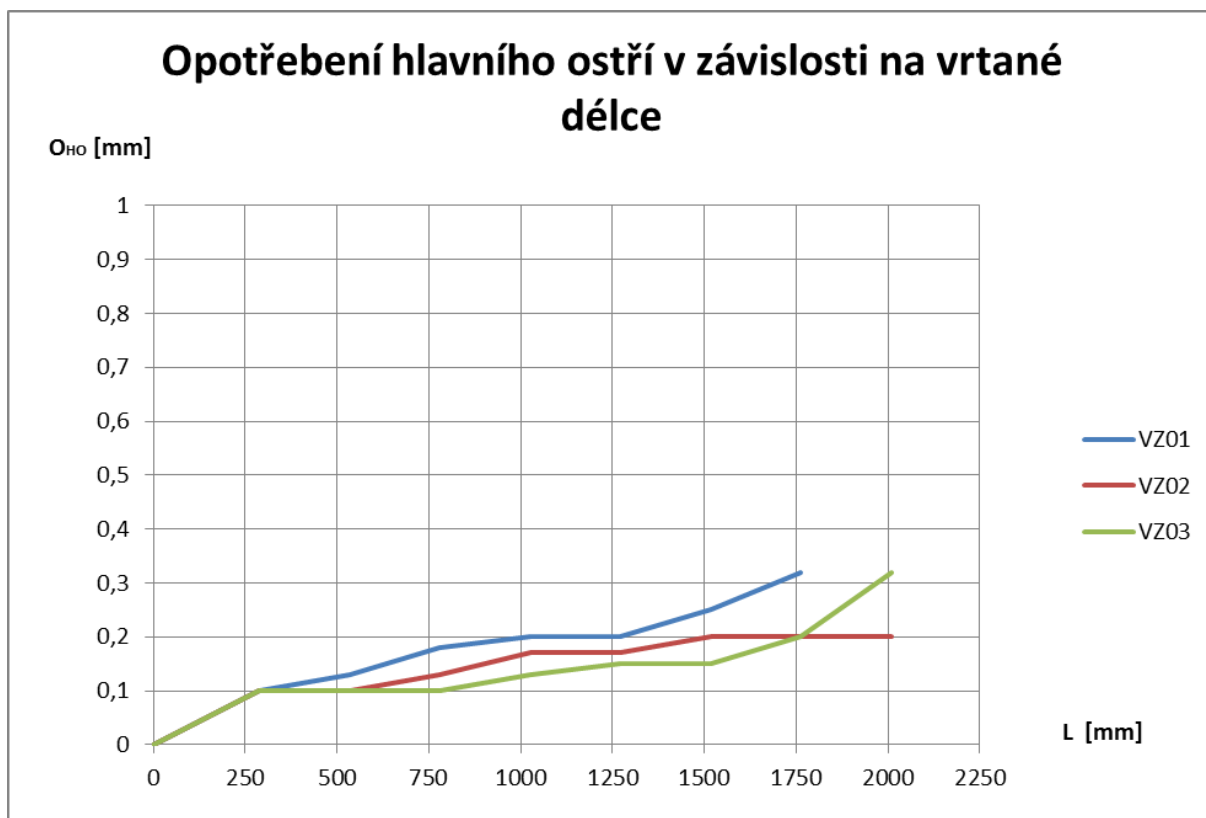
Obr. 50 Trvanlivost nástroje bez procesního média.

Nejlépe vyšly vzorky s využitím podchlazeného vzduchu (VZ02), které nedosáhly ani v jednom případě kritických hodnot.

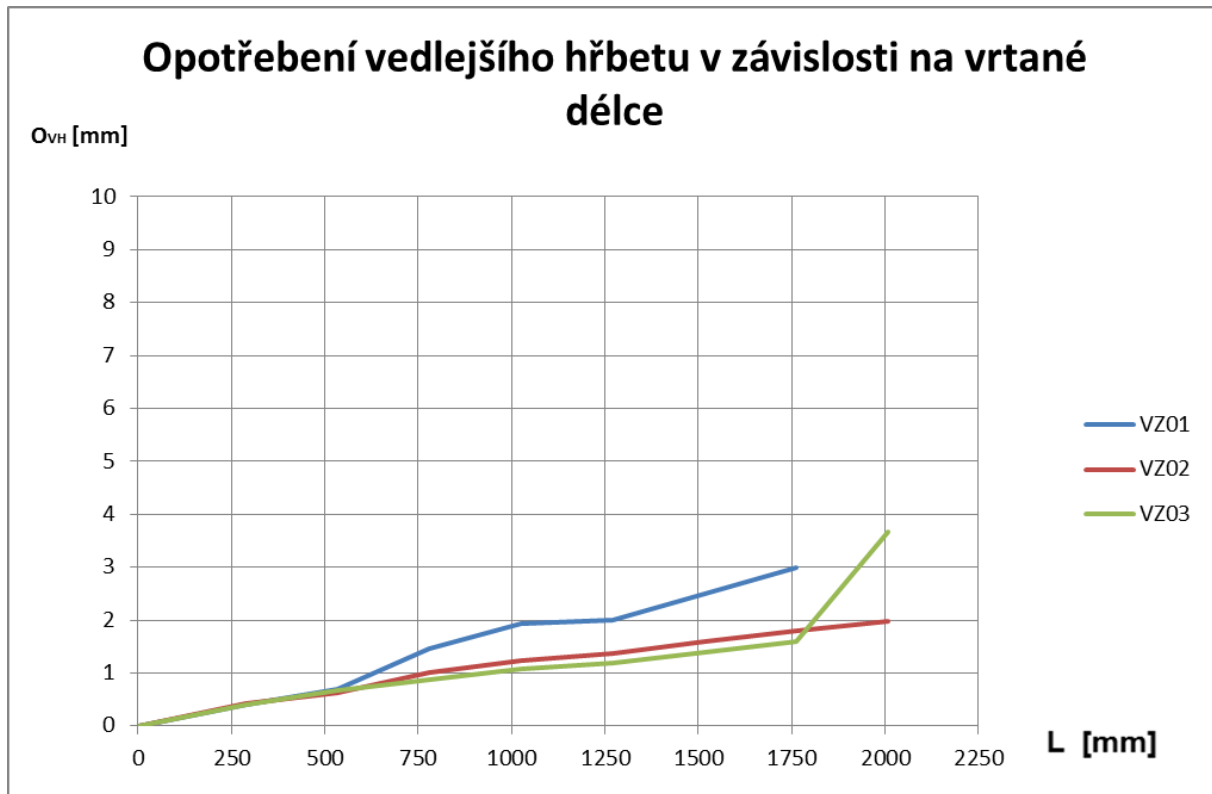
Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11. V grafu 6 je znázorněno opotřebení hlavního ostří v závislosti na délce vrtání a v grafu 7 je znázorněno opotřebení vedlejšího hřbetu v závislosti na délce vrtání.

Číslo měření	Provrtaná délka	VZ01		VZ02		VZ03	
		O _{HO}	O _{VH}	O _{HO}	O _{VH}	O _{HO}	O _{VH}
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	287	0,10	0,40	0,10	0,43	0,10	0,40
2	533	0,13	0,70	0,10	0,63	0,10	0,67
3	779	0,18	1,47	0,13	1,00	0,10	0,87
4	1025	0,20	1,93	0,17	1,23	0,13	1,07
5	1271	0,20	2,00	0,17	1,37	0,15	1,20
6	1517	0,25	2,50	0,20	1,60	0,15	1,40
7	1763	0,32	3,00	0,20	1,80	0,20	1,60
8	2009	-	-	0,20	1,97	0,32	3,67

Tab. 11 Opotřebení nástroje.



Graf 6 Opotřebení hlavního ostří v závislosti na vrtané délce.

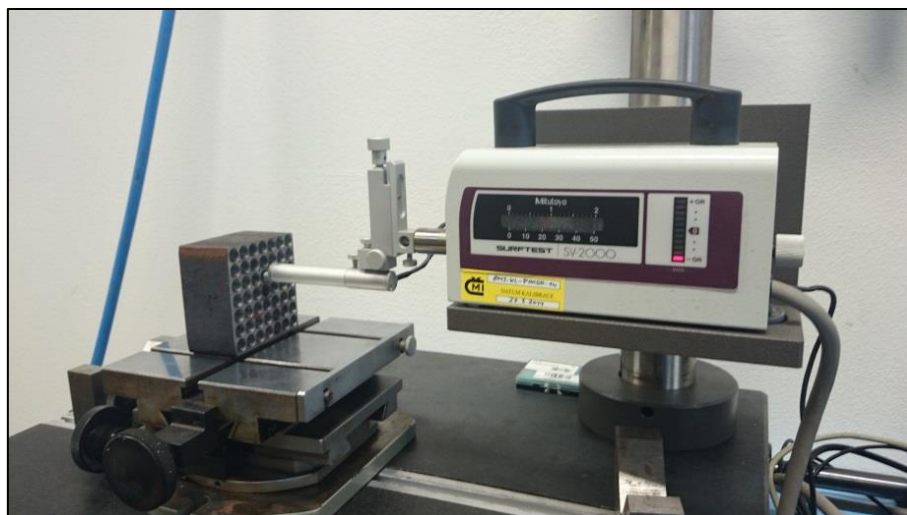


Graf 7 Opotřebení vedlejšího hřbetu v závislosti na vrtané délce.

4.4.4 Měření drsnosti povrchu

Vyhodnocení jednotlivých drsností bylo provedeno v softwaru Surfpack. Dále byly tyto hodnoty dále zpracovány, aby mohlo dojít k jednoduchému porovnání. Kromě vyhodnocení jednotlivých parametrů drsností software Surfpack zobrazuje křivku snímaného povrchu (obr. 52).

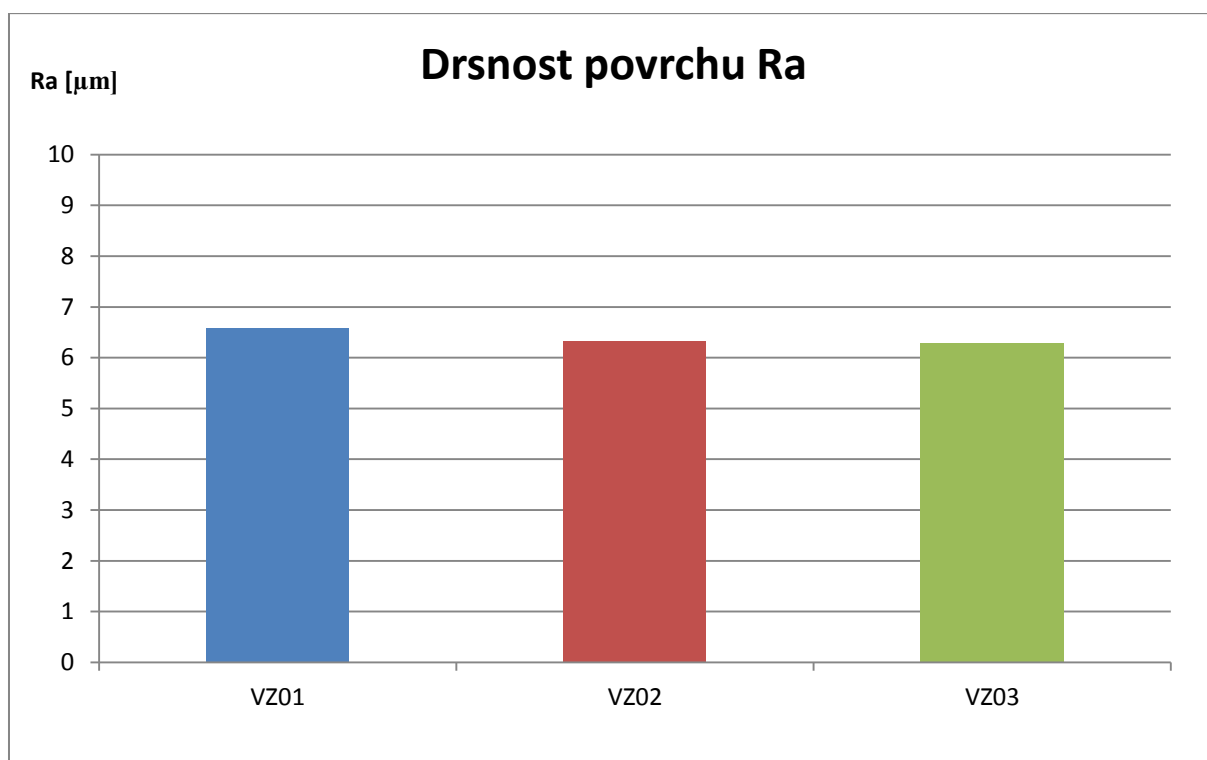
Nejlepší drsnost po obrábění měly vzorky, u kterých byl využit jako procesní médium zkapalněný oxid uhličitý (VZ03). Pokud bychom hodnotili z pohledu nejmenšího rozdílu středních hodnot drsností R_a jednotlivých otvorů, vzorek VZ03 by měl nejvyšší rozdíl. Oproti tomu vzorky, kde docházelo k obrábění za sucha (VZ01), mají nejmenší rozdíl středních hodnot drsností R_a , ale zato je drsnost nejhorší v porovnání se vzorky VZ02 a VZ03.



Obr. 51 Měření drsnosti profilometrem Mitutoyo.

Výsledky naměřených hodnot a statisticky zpracované výsledky jsou zavedeny v tabulce 12. Hodnoty drsnosti Ra jsou zavedeny do sloupcového grafu 8.

V grafu je názorně vidět, že hodnoty drsností jsou velice podobné a rozdíl z hlediska výsledného hodnocení účinků řezných prostředí nemá velkou váhu. Rozdíly VZ01 a VZ03 mezi vzorky podle parametrů Ra se pohybují v hodnotách desetín mikrometru.

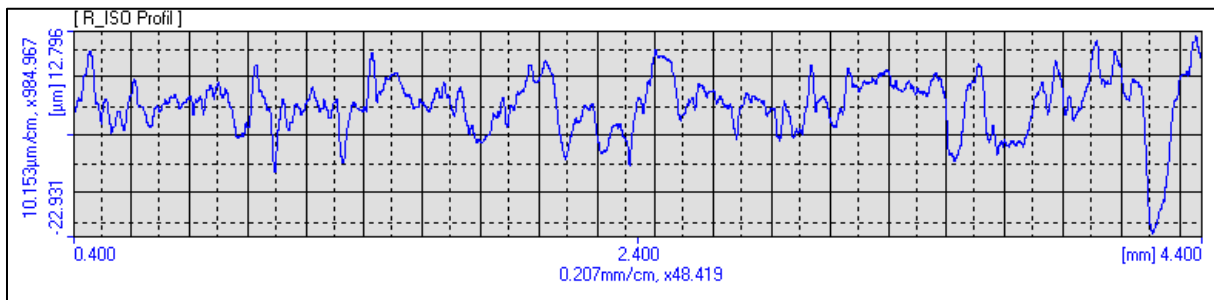


Graf 8 Drsnost povrchu Ra.

Drsnost	VZ01	VZ02	VZ03
Ra [μm]	6,76	6,34	6,28
Rz [μm]	31,61	30,96	30,42
Rt [μm]	44,46	43,19	41,67

Tab. 12 Drsnost povrchu.

V softwaru Surfpack, který kromě vyhodnocení jednotlivých parametrů drsností, zobrazoval profil nasnímaného povrchu. Na vodorovné ose byla zobrazena vyhodnocovaná část 4 mm a na svislé ose je zobrazena odchylka snímacího břitu na povrchu.



Obr. 52 Profil nasnímaného povrchu.

4.4.5 Měření rozměrové přesnosti

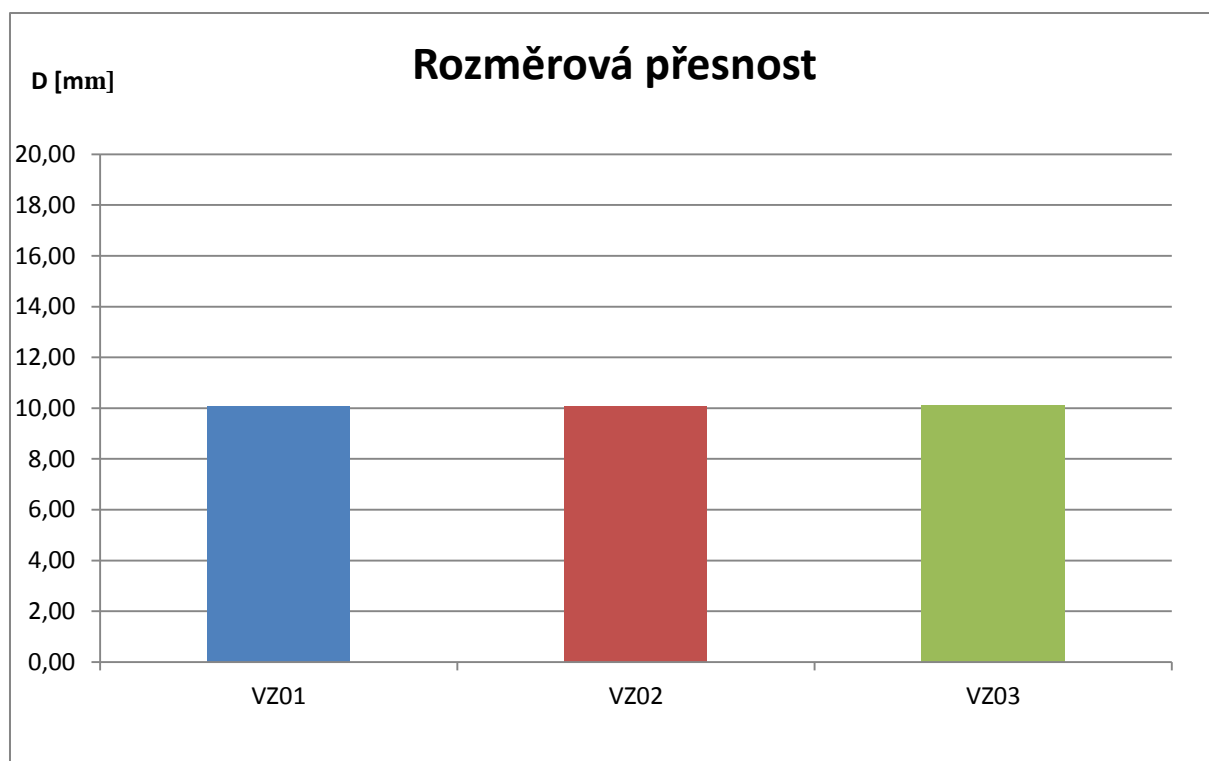
Měření rozměrové přesnosti je dalším z hodnotících parametrů. Měření proběhlo na stejných otvorech jako měření drsnosti. Pro každé řezné prostředí bylo změřeno 10 hodnot v 5 otvorech. Z těchto hodnot byla vyhodnocena rozměrová přesnost a zanesena do tabulky 13 a grafu 9.

Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při obrábění s podchlazeným vzduchem (VZ02). Naopak při obrábění se zkapalněným oxidem uhličitým (VZ03) byl statisticky vypočten největší průměr.

Průměr otvorů [mm]	VZ01	VZ02	VZ03
	10,08	10,06	10,11

Tab. 13 Rozměrová přesnost.

Mezi hodnotami drsností je velice nepodstatný rozdíl, jelikož se jednalo o hrubování.



Graf 9 Rozměrová přesnost.

05 Ekonomické zhodnocení

Ekonomické zhodnocení procesních médií se hodnotilo pro jednosměrný provoz na jednom stroji po celý rok 2015, který má 251 pracovních dní. Délka pracovní směny je 7,5 hodiny.

Výpočet zahrnuje řezné parametry, při kterých byly obráběny vzorky (4.4. Metodika experimentu). Celková délka vrtání s nájezdem a přejezdem je 45 mm. A celkový čas na obrábění jednoho otvoru a nájezd k druhému otvoru je 30 vteřin. Hodnota času obrábění otvoru a délka pracovní směny udává, že stroj obrobí 900 otvorů za směnu. Pro výpočet byla stanovena cena 3,2 Kč za jednu kilowatthodinu.

Náklady na procesní médium obráběním za sucha nejsou žádné. Zde nepotřebujeme žádné zařízení pro procesní médium a ani nemáme žádnou spotřebu elektrické energie pro využití tohoto procesního média.

Při obrábění s využitím podchlazeného vzduchu vstupuje do nákladů vírová trubice, kompresor, příslušenství (hadice, držák) a spotřeba elektrické energie. Jednotlivé náklady a celková cena za rok a cena na jeden otvor jsou uvedeny v tabulce 14.

Vírová trubice	11 000,00 Kč
Kompresor	6 000,00 Kč
Příslušenství	1 000,00 Kč
Spotřeba el. energie za rok	13 253,00 Kč
Celkem za rok	31 253,00 Kč
Cena na jeden otvor	0,14 Kč

Tab. 14 Náklady na využití podchlazeného vzduchu jako procesního média.

Při obrábění s využitím zkapalněného oxidu uhličitého vstupuje do nákladu pronájem dvou tlakových nádob (pro zajištění kontinuální výroby), cena média, příslušenství (řídící jednotka, škrtec ventil, hadice a držák). Spotřeba CO₂ je 2 g/s a čas přívodu plynu je 15 vteřin. Jednotlivé náklady a celková cena za rok a cena na jeden otvor jsou uvedeny v tabulce 15.

Cena pronájmu 2 tl. nádob za rok	12 000,00 Kč
Cena média (CO ₂)	102 000,00 Kč
Příslušenství	20 000,00 Kč
Spotřeba el. energie za rok	3 012,00 Kč
Celkem za rok	137 012,00 Kč
Cena na jeden otvor	0,61 Kč

Tab. 15 Náklady na využití CO₂ jako procesního média.

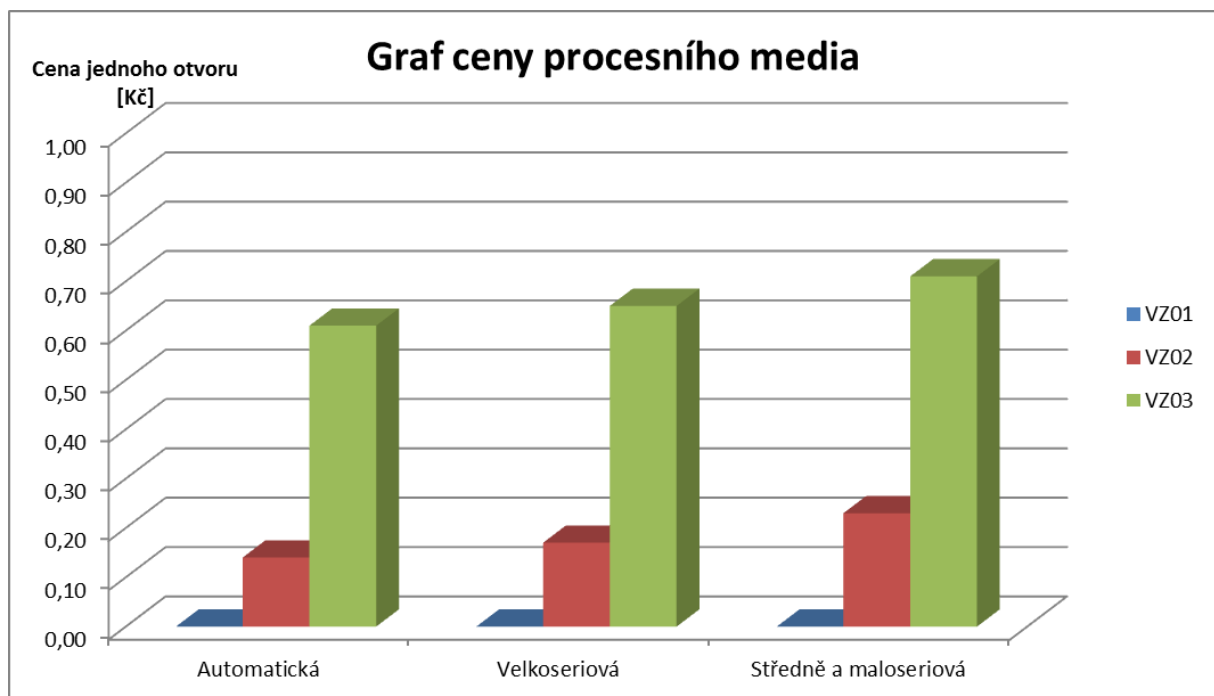
Z výsledků můžeme učinit závěr, že obrábění za pomoci zkapalněného oxidu uhličitého je více než 4krát dražší než obrábění s přívodem podchlazeného vzduchu. Hlavní důvod tak rozdílných nákladů tvoří cena plynu CO₂.

Předchozí výpočty jsou provedeny pro plně automatický až ideální provoz. Tohoto stavu nelze dosáhnout ve skoro žádném provozu, proto jsou v tabulce 16 uvedeny hodnoty cen pro velkosériovou výrobu (tvoří 80 % ideálního provozu) a pro středně- a malosériovou výrobu (tvoří 60 % ideálního provozu).

Výroba	Za sucha	S podchlazeným vzduchem	S CO ₂
Automatická	0,00 Kč	0,14 Kč	0,61 Kč
Velkosériová	0,00 Kč	0,17 Kč	0,65 Kč
Středně a malosériová	0,00 Kč	0,23 Kč	0,71 Kč

Tab. 16 Náklady procesních médií na různé typy výroby.

Všechny tyto hodnoty cen jsou orientační a slouží pouze pro ekonomické zhodnocení pro tuto bakalářskou práci.



Graf 10 Cena procesního media

06 Diskuze

V této práci byla rozebrána problematika účinků procesních plynů na technologii vrtání a kvalitu obrobených součástí. Zdali a do jaké míry jsou schopny ovlivnit procesní plyny proces vrtání, jsme ověřovali měřeními na experimentech. Posuzovanými hodnotami byla velikost řezných sil, teplota obrobku, otupení břitu nástroje, rozměrová přesnost a jakost povrchu. Záměrem bylo dosáhnout výsledků, které byly minimálně podobné s výsledky při využití procesních kapalin při vrtání. Pro vyhodnocování výsledků jsme zvolily tři prostředí, okolní vzduch, podchlazený vzduch a zkapalněný oxid uhličitý.

Z hlediska hodnocení síly při obrábění se největší síly dosáhlo při obrábění s podchlazeným vzduchem. Hodnota síly dosahovala 750 N. U obrábění za sucha se hodnota síly pohybovala níže, a to kolem hodnoty 700 N. Při obrábění za využití zkapalněného oxidu uhličitého docházelo během obrábění k nárůstu síly z hodnoty 600 N na hodnotu 700 N. Při měření krouticího momentu měla pouze hodnota při obrábění za sucha konstantní průběh, velikost krouticího momentu je 7 N*m. Při obrábění s podchlazeným vzduchem měla hodnota vzrůstající tendenci. Nejvíce stoupající hodnoty byly u měření s CO₂. Při využití oxidu uhličitého dosahovaly hodnoty 8,76 N*m a u podchlazeného vzduchu hodnoty 7,96 N*m. Stoupající hodnota u CO₂ je způsobena nulovým mazacím efektem. Podchlazený vzduch, který byl odebírán z centrálního rozvodu stlačeného vzduchu laboratoře, je mírně přimazáván, proto nárůst momentu není tak vysoký.

Při měření teplot obrobků bylo naměřeno obdobných hodnot teplot při vrtání bez procesního média a s využitím podchlazeného vzduchu. Tyto hodnoty se pohybovaly mezi 41,4 °C až 55,6 °C. Při využití zkapalněného oxidu uhličitého byly hodnoty nižší. Hodnoty se pohybovaly mezi 37,1 °C až 51,9 °C. Největší podchlazení bylo naměřeno u CO₂ teplota 21,9 °C.

U měření trvanlivosti nástroje byla stanovena kritéria maxima vrtané délky na 2 000 mm, opotřebení hlavního ostří na hodnotě 0,3 mm a opotřebení vedlejšího hřbetu na hodnotě 3 mm. U obrábění za sucha došlo k překročení kritických hodnot opotřebení ve dvou případech na délce obrábění 1763 mm. Při obrábění s využitím CO₂ bylo dosaženo také kritických hodnot, ale až na maximální vrtané délce. Nejlepší vliv na trvanlivost nástroje měl podchlazený vzduch, kde nebylo dosaženo kritických hodnot. Hodnota opotřebení hlavního ostří je 0,2 mm a opotřebení vedlejšího hřbetu je 1,97 mm na maximální vrtané délce.

Procesní plyny nemají skoro žádný mazací efekt, proto jsou hodnoty drsností a rozměrové přesnosti velmi podobné. Dalo by se říci, že pro hrubování jsou zde celkem nevýznamné rozdíly mezi hodnotami.

Z hlediska hodnocení drsnosti R_a obrobeného povrchu nejlépe dopadlo obrábění s využitím CO_2 s hodnotou drsnosti $R_a = 6,28 \mu\text{m}$. Nejhorší hodnota ($R_a = 6,76 \mu\text{m}$) byla při obrábění za sucha, kde nedochází k žádnému chlazení, a při využití podchlazeného vzduchu je hodnota o $0,06 \mu\text{m}$ větší než u hodnoty s CO_2 ($R_a = 6,34 \mu\text{m}$).

U měření rozměrové přesnosti dopadlo CO_2 oproti drsnosti nejhůře ($10,11 \mu\text{m}$). Nejlépe dopadla hodnota $10,06 \mu\text{m}$ u obrábění s podchlazeným vzduchem. U obrábění za sucha byla naměřena hodnota $10,08 \mu\text{m}$.

S ohledem na drsnost povrchu a rozměrovou přesnost nejlépe dopadlo obrábění s podchlazeným vzduchem. Má nejmenší rozdíl průměru otvoru od jmenovitého rozměru vrtáku a pouze o $0,06 \mu\text{m}$ větší drsnost, než u hodnoty drsnosti s CO_2 . Všechny hodnoty drsností a rozměrových přesností jsou velice podobné, jelikož se jednalo o obrábění hrubováním.

07 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo porovnání účinků procesních plynů na technologii vrtání a kvalitu obrobeného povrchu.

Pro porovnání byly vybrány tři rezná prostředí, které byla posuzována mezi sebou za stejných pracovních podmínek na stejném obráběcím stroji (viz kapitola 4.4. Metodika experimentu). Mezi zkoumané prostředí byl vybrán atmosférický vzduch, podchlazený vzduch a zkapalněný oxid uhličitý.

Jednotlivé plyny byly hodnoceny podle těchto hledisek:

- velikost řezné síly a velikost krouticího momentu,
- teplota obrobku,
- velikost opotřebení hlavního ostří a vedlejšího hřbetu nástroje,
- drsnost povrchu Ra, Rz, Rt obrobených ploch vzorků,
- rozměrová přesnost vrtaných otvorů.

Z výsledků měření, které byly získány při vrtání **bez chlazení**, tedy s přístupem okolního vzduchu, je možno učinit tyto závěry:

- konstantní průběh krouticího momentu a síly na celém intervalu obrábění,
- k destrukci nástroje dochází dříve, než při využití zbylých dvou procesních plynů.

Z výsledků měření, které byly získány při vrtání **s využitím podchlazeného vzduchu**, je možno učinit tyto závěry:

- dosahuje nejlepší trvanlivosti nástroje na vrtané délce 2 000 mm,
- rozměrová přesnost otvorů má menší odchylku od jmenovitého průměru vrtáku, než při využití zbylých dvou prostředí.

Z výsledků měření, které byly získány při vrtání **s využitím zkapalněného oxidu uhličitého**, je možno učinit tyto závěry:

- největší nárůst krouticího momentu na obráběné délce 40 mm,
- dosažení nejmenší drsnosti, oproti využití zbylých dvou prostředí,
- dosažení nejnižších teplot při obrábění vzorků.

Seznam použité literatury

- [1] Katalog nástrojů Precitool. Dostupný na:
https://shop.precitool.de/bk/HKL_2014-2015/
- [2] Řasa J., Gabriel V., *Strojírenská technologie 3 – 1. díl, 2.*, Praha Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1
- [3] Vrtací nástroje Sandvik Coromant. Dostupný na:
<http://www.sandvik.coromant.com/SiteCollectionImages/knowledge/Drilling/082162.jpg>
- [4] StimZet, výrobce vrtáků, Vsetín, Technické informace. Dostupné na:
<http://www.stimzetvsetin.cz/images/tvareciB.jpg>
- [5] MM Průmyslové spektrum, Strojírenský měsíčník. Dostupné na:
<http://www.mmspektrum.com>
- [6] Humár A. Technologie obrábění – 2. část, Brno: VUT v Brně, 2004. Dostupné na:
http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf
- [7] Grumant, dodavatel nástrojů, katalog produktů. Dostupný na:
<http://www.grumant.cz/pro-zakazniky>
- [8] Střelcová R., *Řezné kapaliny a jejich uplatnění v moderní výrobě* (Bakalářská práce), Brno: VUT v Brně, 2008. Dostupné na:
https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/5944/2008_bp_strelcova_radka_48617.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [9] Vortec, *Vortex Tubes – vírové trubice* (katalog). Dostupné na:
http://www.lontech.cz/files/virove_trubice/prehled_modelu_virovych_trubic.pdf
- [10] Korejs M., *Účinek procesních plynů na technologii frézování a kvalitu obrobených součástí* (Bakalářská práce). Označení KOM – 1245

- [11] Produktový list Pilous, ARG 300 Plus H.F., Dostupný na:
<http://www.sst.cz/katalog/product-pdf/id/575>
- [12] Produktový list TOS Olomouc s. r. o., FNG 32. Dostupný na:
<http://www.tos-olomouc.cz/files/oc/produktove-informace/fng32.pdf>
- [13] Aplikovaný multioborový výzkum a vývoj progresivních způsobů chlazení u technologických procesů – TA03010492, Etapa 1. (r. 2013) a Etapa 2. (r. 2014)
- [14] Skripta Technologie II 1.díl. Ostrava: Vysoká škola Báňská Dostupný na:
http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [15] Katalog Mitutoyo. Dostupný na:
<http://dl.mitutoyo.eu/HE/eBook/CZ/index.html?page=590>

Seznam příloh

Příloha 1 – Tabulka drsností obrobekých součástí

Příloha 2 – Tabulka rozměrové přesnosti obrobekých součástí

Příloha 3 – Tabulka trvanlivosti nástroje

Příloha 4 – Tabulka hodnot krouticího momentu

Příloha 5 – Tabulka hodnot síly