TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

# Opotřebení řezného nástroje při frézování kovových a kompozitních materiálů na CNC obráběcím centru

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 Strojní inženýrství
*Studijní obor:* Strojírenská technologie a materiály

*Autor práce:* **Bc. Vítězslav Žoch**
*Vedoucí práce:* doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.

Katedra obrábění a montáže

Liberec 2021

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

# Wear of cutting tool during milling of metal and composite materials on a CNC machining center

## Master thesis

| | |
|---|---|
| *Study programme:* | N2301 Mechanical Engineering |
| *Study branch:* | Engineering Technology and Materials |
| *Author:* | **Bc. Vítězslav Žoch** |
| *Supervisor:* | doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D. |

Liberec 2021

## Zadání diplomové práce

# Opotřebení řezného nástroje při frézování kovových a kompozitních materiálů na CNC obráběcím centru

*Jméno a příjmení:* **Bc. Vítězslav Žoch**
*Osobní číslo:* S19000220
*Studijní program:* N2301 Strojní inženýrství
*Studijní obor:* Strojírenská technologie a materiály
*Zadávající katedra:* Katedra obrábění a montáže
*Akademický rok:* **2020/2021**

**Zásady pro vypracování:**

1. Shrnutí dosavadních poznatků o opotřebení řezného nástroje u kovových a kompozitních materiálů. Shrnutí poznatků o frézování na CNC obráběcích centrech.
2. Volba řezných nástrojů a řezných podmínek včetně vhodných procesních médií. Výběr kovových a kompozitních materiálů.
3. Návrh metodiky experimentů pro zjištění opotřebení řezného nástroje při frézování kovových a kompozitních materiálů na CNC obráběcím centru –studie z hlediska teplot a sil při obrábění, použitého média a celkové integrity obrobeného povrchu.
4. Realizace experimentů.
5. Hodnocení získaných výsledků z hlediska teplot a sil při obrábění, použitého média a celkové integrity obrobeného povrchu.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

| | |
|---|---|
| *Rozsah grafických prací:* | dle potřeby |
| *Rozsah pracovní zprávy:* | 50 – 60 stran textu |
| *Forma zpracování práce:* | tištěná/elektronická |
| *Jazyk práce:* | Čeština |

**Seznam odborné literatury:**


1. KOCMAN, K., PROKOP, K. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.

2. BILÍK, O. *Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění.* Ostrava: Vysoká škola báňská -TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5.

3. HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502.

4. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. *Jakost obráběných povrchů*. Ústí nad Labem: UJEP, 2003.

179s. ISBN 80-7044-539-4.


| | |
|---|---|
| *Vedoucí práce:* | doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.<br>Katedra obrábění a montáže |
| *Datum zadání práce:* | 6. října 2020 |
| *Předpokládaný termín odevzdání:* | 6. dubna 2022 |

L.S.

| | |
|---|---|
| prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld | doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková,Ph.D. |
| děkan | vedoucí katedry |

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

27. května 2021 Bc. Vítězslav Žoch

Katedra obrábění a montáže

Evidenční číslo práce: **KOM 1311**

Jméno a příjmení: **Bc. Vítězslav Žoch**

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

Konzultant: Doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.

Ing. Miloslav Ledvina, Ph.D.

Počet stran: 75

Počet příloh: 1

Počet tabulek: 23

Počet obrázků: 33

Počet grafů: 5

**Anotace**

Předkládaná diplomová práce podává informace ohledně frézování vybraných kovových a kompozitních materiálů. Hlavním cílem diplomové práce bylo zjištění opotřebení nástroje v závislosti na řezných silách, teplotách, drsnosti povrchu, rozměrové stability obráběného materiálu a celkové integrity obrobeného povrchu. Základní informace ohledně frézování vybraných materiálů jsou uvedeny v teoretické části práce. Další části se věnují realizaci, diskuzi a zhodnocení celého experimentu.

**Klíčová slova:** frézování, kompozitní materiál, kovový materiál

**Anotation:**

The presented master thesis provides information about milling of selected metal and composite materials. The main goal of the diploma thesis was to determine the wear of tools depending on the cutting forces, temperatures, surface roughness, dimensional stability of the machining material and the overall integrity of the machined surface. Basic information regarding the milling of selected materials is given in the theoretical part of the work. The next part is devoted to the implementation, discussion and evaluation of the entire experiment.

**Key words:** milling, composite material, metal material

**Poděkování:** Tímto děkuji vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. Štěpánce Dvořáčkové Ph.D. a konzultantům paní doc. Ing. Doře Kroisové Ph.D. a panu Ing. Miloslavu Ledvinovi Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Bc. Martinovi Váňovi za technickou podporu při realizaci experimentu a rodině za psychickou podporu a zázemí.

## Obsah

*SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ ..... 11*

*1 ÚVOD ..... 13*

*2 TEORETICKÁ ČÁST ..... 14*

**2.1. Třískové obrábění pomocí frézování ..... 14**

2.1.1. Frézování a dělení frézování ..... 14

2.1.2. Výpočet řezných sil, řezných rychlostí a posuvů ..... 17

2.1.3. Obrobitelnost ..... 21

**2.2. Problematika obrábění kompozitů ..... 22**

2.2.1. Výběr nástrojů pro frézování kompozitu ..... 22

2.2.2.Ortogonální frézování kompozitu s vláknovou výztuží ..... 24

2.2.3. Delaminace kompozitů ..... 25

2.2.4. Tvorba třísky při obrábění kompozitů ..... 25

2.2.5. Upínání obrobku z kompozitů ..... 25

2.2.6. Využití procesní kapaliny při obrábění kompozitů ..... 26

**2.3.Problematika obrábění kovů ..... 26**

2.3.1. Konstrukční ocel – ČSN 12 050 ..... 26

2.3.2. Slitina hliníku ..... 28

2.3.3. Korozivzdorná ocel ..... 29

*3 METODIKA MĚŘENÍ ..... 32*

**3.1. Výroba vzorků ..... 32**

3.1.1. Kovové vzorky ..... 32

3.1.2. Kompozitní vzorky ..... 32

**3.2. Strojní zařízení ..... 34**

3.2.1. Pásová pila pilous ..... 34

3.2.2. Frézovací centrum ..... 35

**3.3. Měřicí aparatura ..... 39**

3.3.1. Měření sil ..... 39

3.3.2. Měření termodynamické teploty ..... 41

3.3.3. Měření drsnosti povrchu ..... 42

3.3.4. Měření rozměrové stability ..... 43
3.3.5. Měření opotřebení nástroje ..... 43

*4 EXPERIMENT ..... 46*

**4.1 Měření sil při frézování ..... 46**

**4.2 Měření rozměrové přesnosti ..... 52**

**4.3 Měření opotřebení břitové destičky ..... 53**

**4.4 Měření termodynamické teploty ..... 53**

**4.5 Měření drsnosti povrchu ..... 54**

*5 DISKUZE ..... 61*

*6 ZÁVĚR ..... 68*

*SEZNAM OBRÁZKŮ: ..... 70*

*SEZNAM GRAFŮ: ..... 72*

*SEZNAM TABULEK: ..... 73*

*SEZNAM LITERATURY ..... 74*

# SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CNC – Computer Numerical Control, číslicově řízený stroj

ČSN – Československá norma

$\vec{v}$ – obvodová rychlost [m/s]

$\vec{\omega}$ – úhlová rychlost [rad/s]

$\vec{r}$ – poloměr křivosti [m]

$\overrightarrow{v_c}$ – řezná rychlost [m/s]

$\pi$ – Ludolfovo číslo [-]

$D$ – průměr nástroje [m]

$\vec{n}$ – počet otáček [ot/s]

$\overrightarrow{v_f}$ – posuvová rychlost za čas [m/s]

$\overrightarrow{f_n}$ – posuvová rychlost za otáčku [m/ot]

$\overrightarrow{f_z}$ – posuvová rychlost na břit [m/$n_z$]

$n_z$ – počet břitů nástroje [-]

$h_i$ – tloušťka třísky [m]

$\varphi_i$ – úhel posuvového pohybu [◦]

$A_{Di}$ – průřez třísky [$m^2$]

$a_p$ – hloubka záběru [m]

$\kappa_r$ – úhel nastavení hlavního ostří [°]

$b$ – šířka třísky [m]

$k_{ci}$ – měrná řezná síla [$N/m^2$]

$\overrightarrow{F_{Ci}}$ – dílčí řezná síla [N]

$\overrightarrow{F_C}$ – celková řezná síla [N]

$C_{Fc}$ – konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu [-]

x – exponent vlivu tloušťky třísky [-]

$n_{zz}$ – počet břitů v záběru [-]

$\varphi_{max}$ – maximální úhel posuvového pohybu [°]

$z$ – počet břitů frézy [-]

$\psi$ – úhel záběru frézy [°]

o – obvod 1/2 kružnice [m]

D – průměr nástroje [m]

t – čas [s]

L – délka vzorku [m]

f – posuv [mm/min]

$L_1$ – dráha při 1 měření [m]

$L_c$ – celkového dráha nástroje [m]

# 1 ÚVOD

V rámci diplomové práci byla řešena problematika opotřebení řezného nástroje při frézování kovových a kompozitních materiálů na CNC obráběcím centru.

Obrábění klasických kovových materiálů (např. konstrukční ocel, nerezová ocel, slitina hliníku) není tak obtížné včetně volby vhodných řezných podmínek, nástrojů aj. jako u kompozitních materiálů. Kompozitní materiály je obtížné obrábět a volba řezných podmínek, nástrojů, procesních médií aj. vyžaduje zpravidla selektivní přístup a velkou pečlivost.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo zjistit opotřebení řezného nástroje při frézování kovových a kompozitních materiálů na CNC obráběcím centru v závislosti na silách, teplotách, drsnosti povrchu, rozměrové stability obráběného materiálu a celkové integrity obrobeného povrchu.

Předkládaní práce je rozdělena do tří základních částí. První část je teoretická a popisuje současný stav poznání a věnuje problematice třískového obrábění frézováním vybraných materiálů. Dále jsou uvedeny vybrané nástroje pro frézování těchto materiálů. Další část popisuje metodiku a realizaci experimentu. Poslední část se věnuje diskuzi a porovnání výsledků a celkovému zhodnocení provedeného experimentu.

Obráběnými kompozitními materiály v rámci řešené diplomové práci byla uhlíková vlákna vázaná epoxidovou pryskyřicí. Vzájemnou kombinací matrice a vyztužujících vláken bylo dosaženo rozdílných mechanických vlastností, které bylo nutno zohlednit při volbě řezného nástroje (uhlíková vlákna jsou velmi abrazivní, a tudíž je vyžadováno co nejvíce odolný nástrojový materiál.) Kromě samotného nástroje měly hlavní vliv na kvalitu obrábění kompozitních materiálů i řezné podmínky. Důležité bylo správně zvolit posuv na otáčky a zajistit dokonalý řez, tak aby nedocházelo k tření nástroje o povrch obrobku. Vyztužující vlákna působí na nástroj silným abrazivním účinkem a jsou hlavní příčinou velmi intenzivního opotřebení nástroje. Hodnoty měrných řezných sil jsou mnohem nižší než při obrábění kovů – tím se snižují řezné síly a potřebný příkon obráběcího stroje.

# 2 TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části jsou shrnuty dosavadní poznatky ohledně třískového obrábění frézováním a upínání obrobků na frézkách. Dále je věnována pozornost problematice obrobitelnosti vybraných materiálů a doporučení při obrábění.

## 2.1. Třískové obrábění pomocí frézování

Výroba pomocí třískového obrábění spočívá v odebírání přebytečného materiálu z polotovaru, a tím dojde ke zhotovení konečného výrobku. Třískové obrábění se používá pro kusovou výrobu, malosériovou výrobu nebo hromadnou výrobu, kde nelze použít jiné metody výroby (např. broušení vložek motorů, odfrézovávání nálitků). Mezi druhy třískového obrábění lze zařadit soustružení, frézování, vrtání, řezání, broušení, hoblování, protahování a speciální metody třískového obrábění. Společnou vlastností všech těchto metod je, že břit nástroje odebírá materiál ve tvaru třísky z polotovaru a tvrdost nástroje je ve většině případů tvrdší než tvrdost materiálu. Všechny ostatní vlastnosti, mezi které patří geometrie nástroje, rychlosti posuvů, otáčky a relativní pohyb mezi obrobkem a nástrojem jsou pro každý druh obrábění specifické. Druh obrábění je volen dle typu výrobku, produktivity a přesnosti výroby. V případě této diplomové práci se bude jednat o frézování na číslicově řízeném stroji.

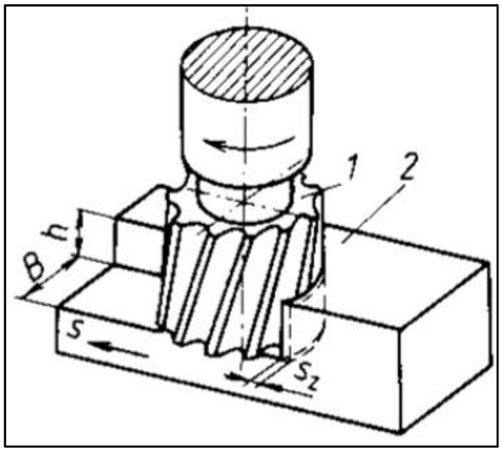
### 2.1.1. Frézování a dělení frézování

V dnešní době je frézování jedním z nejčastějších způsobů třískového obrábění. Frézování se provádí na frézkách konvenčních nebo číslicově řízených (CNC, Computer Numerical Control). Za použití stejných podmínek by z technologického hlediska neměl být rozdíl mezí obráběním na konvenčních strojích nebo CNC. Pro frézování je specifické, že nástroj je namáhán nepravidelně.

Frézování se dělí na 2 základní typy. Frézování čelem a frézování obvodem nástroje. Dále se frézování dělí podle relativní pohybu obrobku a nástroje vůči sobě na sousledné a nesousledné. Do další kategorie lze zařadit speciální metody frézování a těmi zatím jsou trochoidní frézování, rychlo-posuvové frézování a frézování s minimálně nakloněným vřetenem [1].

**Frézování čelem nástroje**

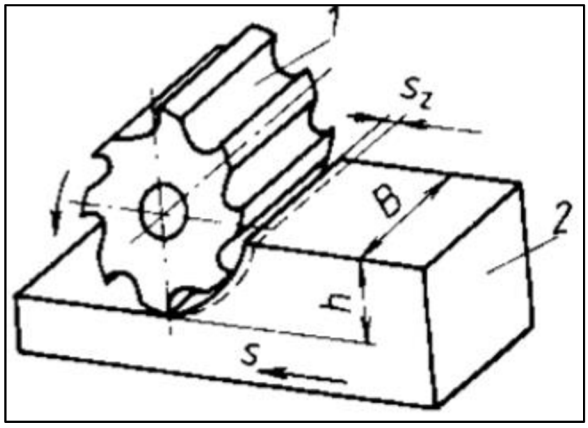
Čelní frézy jsou osazeny břity na čele i na obvodu nástroje, a proto mohou obrábět čelem i obvodem. Proto se tento způsob frézování dále ještě dělí na frézování symetrické a nesymetrické. Při symetrickém frézování je osa nástroje nad obrobkem a při frézování nesymetrickém je osa nástroje mimo obrobek. Při tomto frézování je dosahováno vyššího řezného výkonu a tím i lepší drsnosti povrchu. Volba sousledného a nesousledného frézování záleží dle typu zvolené operace. Tento způsob je preferovaný oproti frézování obvodem.




*Obrázek 1: Čelní frézován* [2]

**Frézování obvodem**

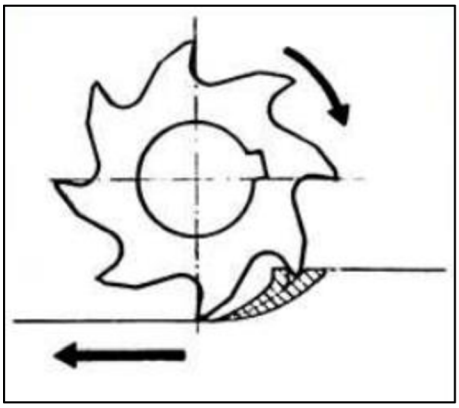
Frézování obvodem frézy nebo také frézování válcové se používá při použití válcových nebo tvarových fréz. Osa nástroje je vždy rovnoběžná s obráběnou plochou. Hloubka záběru se nastavuje kolmo na osu nástroje. Z hlediska relativního pohybu nástroje a obrobku lze použít obrábění sousledné nebo nesousledné




*Obrázek 2: Obvodové frézování* [2]

**Frézování sousledné**

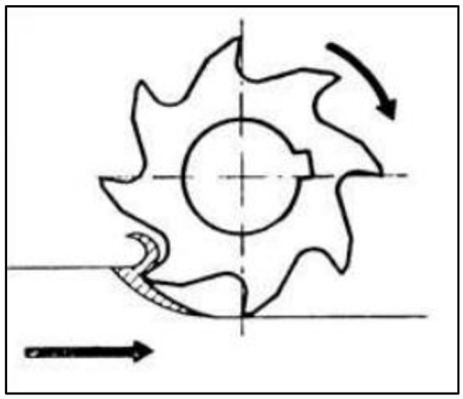
Při sousledném frézování nástroj vniká do materiálu a odebírá třísku o maximálním plném průřezu, který se snižuje během úběru až k nulové hodnotě. Během tohoto procesu jsou třísky odváděny za nástroj. Tyto aspekty mají pozitivní vliv na frézování z důvodu přenášení tepla do třísky a neobrušování břitu. Nevýhodou může být velké dynamické namáhání na vstupu nástroje do materiálu z důvodu odebírání plné tloušťky, a proto není doporučováno pro obrábění použití keramických nástrojů. Pro upínání obrobků při sousledném frézování není potřeba tak velká upínací síla z důvodu vtlačování obrobku do upínacího mechanismu. Při sousledném frézování se obvykle dosahuje lepší drsnosti povrchu a je používáno pro dokončovací operace.



*Obrázek 3: Sousledné frézování* [2]

**Frézování nesousledné**

Nesousledné frézování je ve většině případech nevhodná technologie úběru materiálu, ale přesto má svoje uplatnění. Nástroj vniká do materiálu a na počátku záběru ubírá nulovou tloušťku. Při výjezdu břitu z materiálu je tloušťka třísky na své maximální hodnotě (plná tloušťka), což je jedna z nevýhod. Vysoké teploty, které vznikají na výstupu mají negativní vliv na otupení nástroje a zároveň mohou tepelně ovlivnit materiál, který se bude teprve obrábět. Dále odvod třísek není ideální, jelikož třísky se dostávají před nástroj a mohou se tak do záběru dostat několikrát, a tím vzniká zbytečné teplo navíc. Další nevýhodou je vtahování obrobku do nástroje, a proto je potřeba vyšší upínací síla obrobku. Uplatnění této technologie lze nalézt v obrábění obrobku s nerovným přídavkem nebo křehkých materiálů, kde budou eliminovány rázy při vniku nástroje do obrobku.



*Obrázek 4: Nesousledné frézování* [2]

### 2.1.2. Výpočet řezných sil, řezných rychlostí a posuvů

V této kapitole následuje shrnutí základních vzorců pro výpočty veličin při frézování a odvození vztahů pro výpočet řezné síly.

**Výpočet řezné rychlosti**

Řezná rychlost neboli obvodová rychlost nástroje je jedním ze základních parametrů pro frézování. Otáčky a úhlová rychlost není jako parametr pro frézování vhodné uvádět, protože nezahrnují v sobě velikost nástroje, ačkoliv zdrojový kód programu pro obrábění počítá s otáčkami.

Vztah pro výpočet řezné rychlosti $\overrightarrow{v_c}$ :

$$\vec{v} = \vec{\omega} * \vec{r} \rightarrow \overrightarrow{v_c} = \pi * D * \vec{n} \tag{1.1}$$

kde: $\vec{v}$ [m/s] - obvodová rychlost,

$\vec{\omega}$ [rad/s] – úhlová rychlost,

$\vec{r}$ [m] – poloměr křivosti,

$\overrightarrow{v_c}$ [m/s] – řezná rychlost,

$\pi$ [-] – Ludolfovo číslo,

$D$ [m] – průměr nástroje,

$\vec{n}$ [ot/s] – počet otáček.

**Výpočet posuvové rychlosti**

Posuvová rychlost je velice důležitý parametr pro obrábění a je možné ji udávat ve 3 variantách – posuv na zub, posuv na otáčku a posuv za minutu (sekundu). Přičemž nejdůležitější z těchto parametrů je posuv na zub. Zdrojový kód pro obrábění pracuje s posuvem v milimetrech za minutu.

Vztah pro výpočet posuvové rychlosti $\overrightarrow{v_f}$ :

$$\overrightarrow{v_f} = \overrightarrow{f_n} * \vec{n} = \vec{\omega} * z * \vec{r} \tag{1.2}$$

$$\overrightarrow{f_n} = \overrightarrow{f_z} * n_z \tag{1.3}$$

kde: $\overrightarrow{v_f}$ [m/s] – posuvová rychlost za čas,

$\overrightarrow{f_n}$ [m/ot] - posuvová rychlost za otáčku,

$\overrightarrow{f_z}$ [m/$n_z$] - posuvová rychlost na břit,

$n_z$ [-] - počet břitů nástroje.

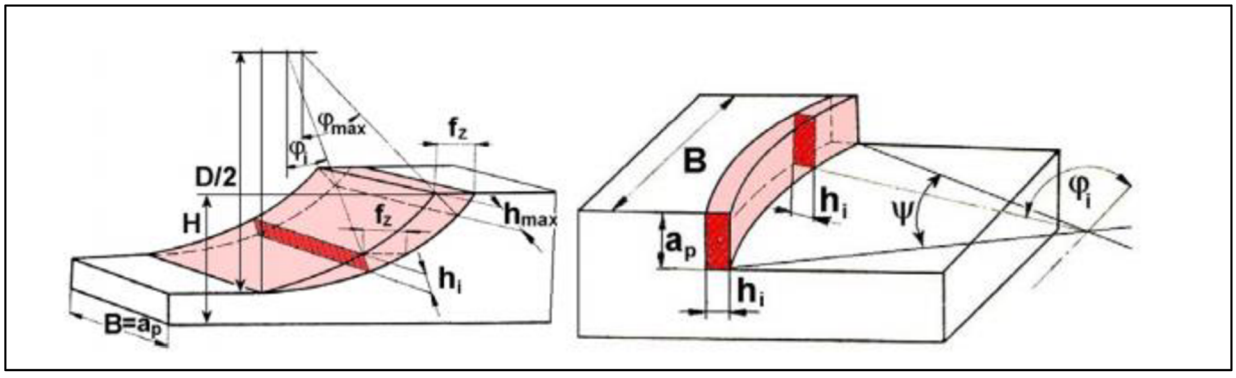
**Výpočet řezné síly**

K výpočtu řezné síly je potřeba nejdříve určit tloušťku odřezávané vrstvy materiálu, která se v průběhu obrábění mění od 0 k maximu nebo obráceně podle druhu obrábění. Určení tloušťky třísky v libovolném bodě lze vyjádřit vztahem:

$$h_i = \overrightarrow{f_z} * \sin \varphi_i \tag{1.4}$$

kde: $h_i$ [m] - tloušťka třísky,

$\varphi_i$ [°] – úhel posuvového pohybu.




*Obrázek 5: Geometrie odebíraného materiálu [1]*

Dále se určí plocha neboli průřez třísky vztahem:

$$A_{Di} = a_p * h_i \tag{1.5}$$

kde: $A_{Di}$ [m$^2$] – průřez třísky

$a_p$ [m] – hloubka záběru.

K určení parametru průřezu třísky čelního frézování je nutné počítat s úhlem nastavení hlavního ostří. Proto předchozí vztah (1.4) pro výpočet musí být mírně upraven:

$$h_i = \overrightarrow{f_z} * sin\varphi_i * sin\kappa_r \tag{1.6}$$

kde: $\kappa_r$ [°] – úhel nastavení hlavního ostří.

Šířka třísky je vypočítána dle následujícího vztahu:

$$b = \frac{a_p}{sin\kappa_r} \tag{1.7}$$

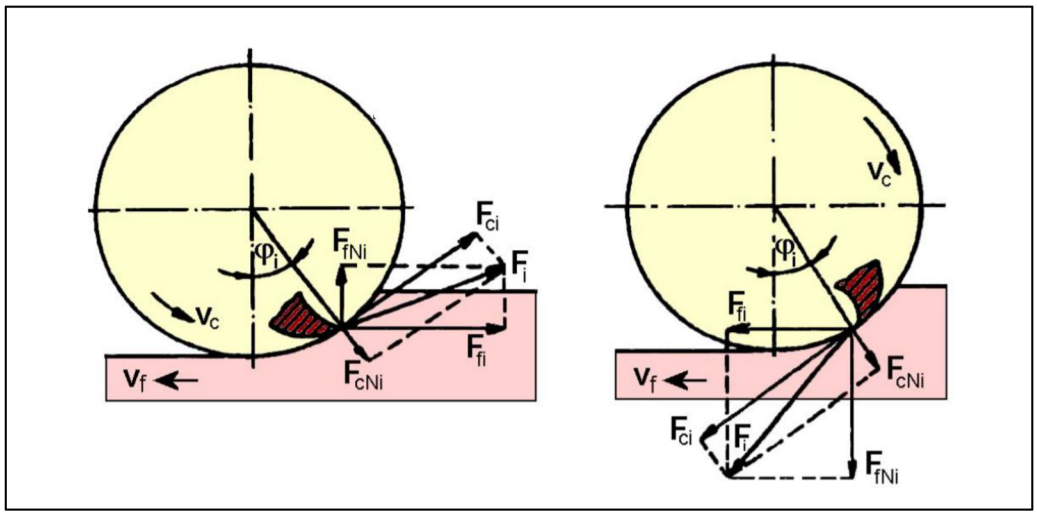
kde: $b$ [m] – šířka třísky.

Průřez třísky pro čelní frézování bude proto určen takto:

$$A_{Di} = b * h_i \tag{1.8}$$

Nyní je již možné přistoupit k výpočtu řezných sil.

Řezné síly se určují pomocí silových poměrů na 1 břitu, který je v poloze určené úhlem posuvového pohybu. Celková síla působící na 1 břit se rozloží na složky dle následujícího obrázku č. 6.




*Obrázek 6: Rozklad sil při frézování [1]*

Řezná síla se vyjádří pomocí vztahu:

$$\overrightarrow{F_{Ci}} = k_{ci} * A_{Di} \tag{1.9}$$

kde: $k_{ci}$[N/m$^2$] – měrná řezná síla.

Měrná řezná síla se vyjádří pomocí vztahu:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} \tag{2.0}$$

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

x [-] – exponent vlivu tloušťky třísky.

Celková řezná síla musí zahrnovat počet břitů záběru z důvodu, že fréza je většinou vícebřitý nástroj. Proto lze použít následující vztahy:

Vztah pro výpočet celkové řezné síly pro obvodové frézování:

$$\overrightarrow{F_C} = \sum_{i=1}^{n_z} \overrightarrow{F_{Ci}} \tag{2.1}$$

Vztah pro výpočet celkové řezné síly pro čelní frézování je zapotřebí doplnit opět úhlem nastavení hlavního ostří:

$$\overrightarrow{F_C} = \sum_{i=1}^{n_z} \overrightarrow{F_{Ci}} * sin^{(x-1)}\kappa_r \tag{2.2}$$

Vztah pro výpočet počtu břitů v záběru pro obvodové frézování:

$$n_{zz} = \frac{\varphi_{max}}{360} * z \tag{2.3}$$

kde: $n_{zz}$[-] – počet břitů v záběru,

$\varphi_{max}$ [°] – maximální úhel posuvového pohybu,

$z$ [-] – počet břitů frézy

Vztah pro výpočet počtu břitů v záběru pro čelní frézování:

$$n_{zz} = \frac{\psi}{360} * z \tag{2.4}$$

kde: $\psi$ [°] – úhel záběru frézy

### 2.1.3. Obrobitelnost

Obrobitelnost materiálu je souhrn materiálových vlastností pro konkrétní proces třískového obrábění. Výsledek obrobitelnosti je hodnocen pomocí ekonomičnosti, rychlosti, jednoduchosti a kvality obrobeného materiálu. Pro obrobitelnost materiálu neexistuje měřitelná absolutní veličina s jednotkou. Obrobitelnost neboli stupeň obrobitelnosti materiálu je pojem relativní. Při laboratorním měření se za použití stejné technologie, stejných řezných podmínek a použití stejného nástroje porovnává výsledek dvou nebo více materiálů, kterého bylo dosaženo.

**Hlediska obrobitelnosti**

1) Stálost rozměrů (rozměrová a geometrická přesnost)
   - rozměr obrobené součásti je většinou nejdůležitější faktor výrobku
   - přesnost s jakou musí být výrobek vyroben, je dán normou a je vždy na výkresu

2) Jakost povrchu
    - obrobitelnost se označuje podle drsnosti obrobené plochy
3) Velikost řezné rychlosti
    - při odpovídající zvolené trvanlivosti
    - obrobitelnost dána dle řezné rychlosti
4) Velikost řezného odporu
    - obrobitelnost podle řezného odporu
5) Utváření třísky
    - obrobitelnost se posuzuje podle nejvhodnější tvorby třísek [3].

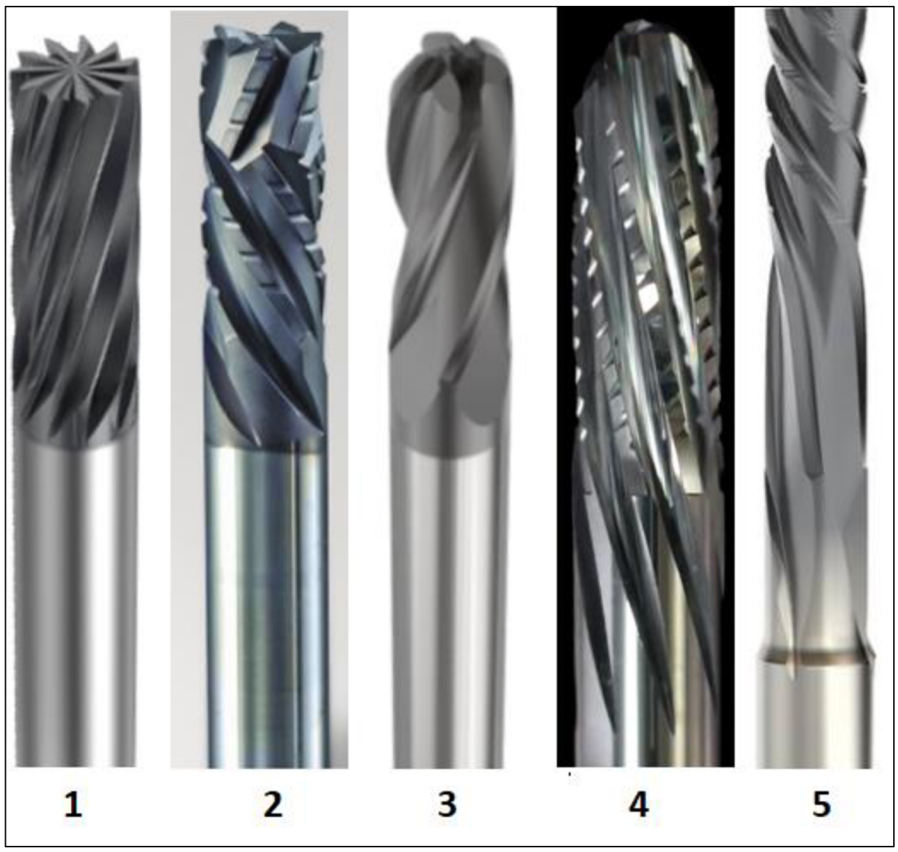
## 2.2. Problematika obrábění kompozitů

Kompozit je silně heterogenní materiál tvořený dvěma a více složkami, které jsou svými vlastnostmi velmi odlišné. Materiály se navzájem neslučují a ani úplně nerozpouštějí. Kompozit se obvykle skládá z matrice a výztuže. Úkolem matrice je držet vlákna pohromadě a výztuže zajišťují mechanické vlastnosti materiálu. Matrice mohou být kovové, keramické nebo polymerní. Výztuže se dělí na částicové, vláknové a deskové [4].

Obvyklý postup návrhu nástroje pro třískové obrábění se přizpůsobuje vlastnostem jednoho konkrétního, obvykle homogenního, obráběného materiálu. Na rozdíl u kompozitů musí nástroj umět obrábět více materiálů s odlišnými mechanickými vlastnostmi najednou. Tzn., nelze jít cestou návrhu nejlepšího nástroje pro daný materiál, ale musí se najít kompromis pro všechny složky kompozitu. Díky své vlastní nehomogenitě, abrazivní povaze výztuh a anizotropii lze v současné době považovat kompozit za těžkoobrobitelný materiál [5].

### 2.2.1. Výběr nástrojů pro frézování kompozitu

Pro frézování kompozitů neexistuje univerzální nástroj, a proto se tato kapitola bude věnovat pouze vybraným nástrojům. Řezné podmínky se liší dle nástroje, materiálu, operace a stroje. Obecně se řezná rychlost pohybuje mezi 300-600 m/min a posuv 1-5 m/min. Řezné podmínky jsou vždy uvedeny výrobcem.




*Obrázek 7: Vybrané nástroje pro obrábění kompozitních materiálů* [6–9]

Nástroj č.1 od firmy SANDVIK coromant je vyroben ze slinutého karbidu a je povlakován diamantem. Doporučen pro frézování hran a obrysů. Nástroj má velkou hloubku záběru a malý úhel stoupání. Vhodný na dokončovací operace s oporou.

Nástroj č.2 od firmy SECO je vyroben ze slinutého karbidu a je chemicky povlakován diamantem. Vyznačuje se přítlačnou konstrukcí a utvářečem třísky. Je vhodný pro hrubování obrysů.

Nástroj č.3 od firmy SECO je vyroben ze slinutého karbidu a je keramicky povlakován. Nástroj má poměrně malé stoupání. Je vhodný pro frézování kapes a rastrování ploch z důvodu kulového zakončení.

Nástroj č.4 od firmy HUFSCHMIED je vyroben ze slinutého karbidu a je povlakován diamantem. Nástroj se vyznačuje vysokou řeznou rychlostí 600 m/min a posuvem 5 m/min a je vhodný pro hrubování kapes z důvodu kulového zakončení a je opatřen utvářečem třísky.

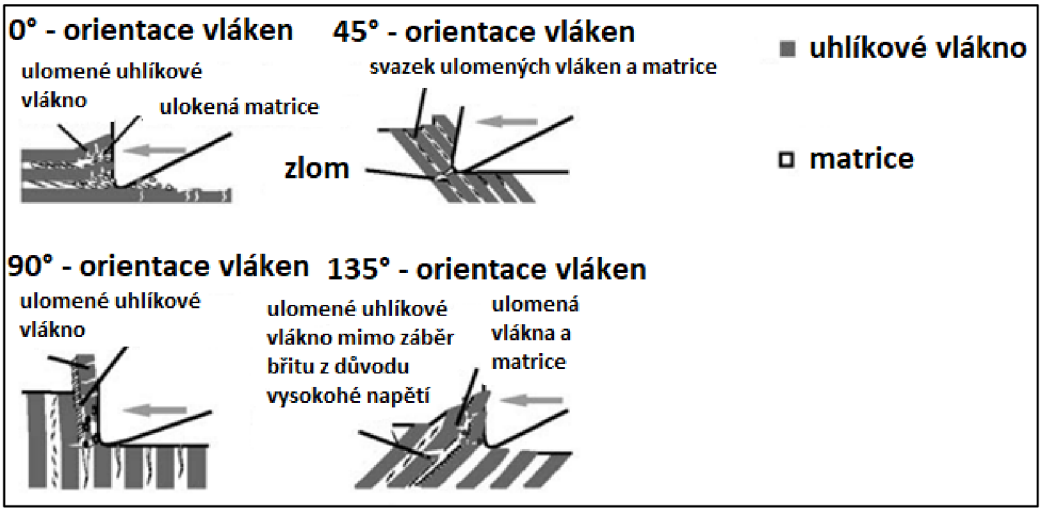
Nástroj č.5 od firmy SECO je vyroben ze slinutého karbidu a je povlakován diamantem. Nástroj se vyznačuje proměnlivým stoupáním a je doporučen pro dokončovací operace.

*Obrázek 8: Čelní fréza pro frézování velkých ploch [8]*

Nástroj na obrázku č. 8 je od firmy SANDVIK coromant a je opatřen břitovými destičkami, které jsou vyrobeny ze slinutého karbidu a povlakovány diamantem nebo kubickým nitridem bóru. Nástroj je vhodný pro frézování velkých ploch.

### 2.2.2.Ortogonální frézování kompozitu s vláknovou výztuží

Ve strojírenské praxi se lze nejčastěji setkat s obráběním kompozitů plněných vlákny, u nichž je třeba myslet na jejich orientaci. Orientace vláken má obrovský vliv na mechanické vlastnosti materiálu, ale i na schopnost materiálu být obroben.




*Obrázek 9: Natočení vláken kompozitu proti břitu nástroje [6]*

Obrázek č. 9 popisuje 4 různé techniky, v jakých může nástroj odebírat třísku v kompozitním materiálu. První možností je natočení vláken kompozitního materiálu vůči nástroji v 0°. V první fázi odebírání materiálu nástroj vtlačuje vlákna dovnitř, a to může mít destruktivní účinky na celý obrobek, protože při obrábění kompozitních dílů

s vláknovou výztuží je možno mechanicky ovlivňovat materiál v místech, kde neobrábíme. V další fázi nástroj obrábí více vláken najednou. Při vyjíždění nástroje z materiálu dochází k delaminaci materiálu. Z technologického hlediska by měl tento způsob úběru materiálu nejméně výhodný. Druhou možností je natočení vláken kompozitního materiálu vůči nástroji mezi 30-60°. V tomto případě mohou nastat podobné problémy jako v prvním případě, ale navíc je zde horší kvalita povrchu. Další možnosti je kolmé natočení nástroje vůči vláknu. Dochází zde k ohybu a následnému odstřižení vlákna. Vlákna jsou zde obráběna po jednom. Poslední možností je natočení vláken v 135° vůči nástroji, která je ze všech technik technologicky nejpřívětivější. Vlákna jsou podrobena ohybovému a tahovému napětí a poté jsou přetržena ve svazcích. Problémem může nastat při nedostatečné adhezi a vlákno může být vytaženo z matrice [10].

### 2.2.3. Delaminace kompozitů

Delaminace je poškození na povrchu materiálu typické pro kompozity a dřevo. Důvodem je proto vláknová struktura. S tímto problémem se lze setkat především u vrtání, ale například i u ortogonálního frézování otvorů. K delaminaci dochází jak při vnikání nástroje do povrchové vrstvy materiálu z jedné strany, tak při vyjíždění nástroje z materiálu z druhé strany. Delaminace je odlupování vrstvy tím, že nástroj materiál neřeže, ale tlačí na něj. Dojde k porušení adheze mezi vrstvami v materiálu. Tento problém se řeší speciální geometrií nástroje pro danou operaci [11].

### 2.2.4. Tvorba třísky při obrábění kompozitů

Při obrábění kompozitního materiálu nevzniká kontinuální tříska nebo hoblovačka. Naopak zde vznikají třísky nepravidelného charakteru, různé úlomky, elementární částice a prach. Z tohoto důvodu je třeba dbát na bezpečnost práce a zajistit odvětrávání strojů, aby se předešlo vdechnutí např. úlomků uhlíkových vláken. Na tvorbu třísky má vliv složení daného kompozitu, orientace vláken a typ nástroje [12].

### 2.2.5. Upínání obrobku z kompozitů

Dalším problém, se kterým je možné se setkat u kompozitu, je jeho upnutí před samotným obráběním. Kompozitní díl je navrhnut tak, aby měl určité mechanické vlastnosti v určitých směrech, ale na rozdíl například od oceli jeho mechanické vlastnosti v ostatních směrech jsou často zanedbatelné. Při upínání je možné vyvíjet sílu

na díl ve směru, ve kterém má špatné mechanické vlastnosti a lze ho tím znehodnotit. Z těchto důvodů je třeba při upínání kompozitů pracovat maximálně šetrně vůči obrobku, ale jinak se jeho upínání neliší od ostatních materiálů a také se u každého výrobku k upínání přistupuje individuálně.

### 2.2.6. Využití procesní kapaliny při obrábění kompozitů

K využití procesní kapaliny při obrábění kompozitů je třeba přistupovat individuálně. Z obecného hlediska je využití procesní kapaliny spíše nedoporučováno. Důvodem je velké navlhání polymerních matric a snížení adheze v materiálu. Pokud i po okamžitém ošetření výrobku při využití procesní kapaliny dochází ke znehodnocení výrobku je třeba použít chlazení vzduchem nebo jinými alternativními kapalinami např. tekutý dusík, oxid uhličitý. Ve většině případů se však obrábí na sucho. U této metody je nutné počítat s tím, že téměř veškeré vyvinuté teplo obráběním musí odvézt nástroj. Je třeba dbát na to, že polymerní matrice mají nízkou tepelnou vodivost a navíc nízkou teplotu tání [4].

## 2.3.Problematika obrábění kovů

Níže bude pozornost věnována pouze materiálům, které byly použity v rámci řešení diplomové práce.

### 2.3.1. Konstrukční ocel – ČSN 12 050

Jako vzorek pro obrábění v této diplomové práci byla použita ocel ČSN 12 050. Jedná se o konstrukční ocel vhodnou k zušlechťování a k povrchovému kalení. Používá se pro výrobu ozubených kol, hřídelů, ojnic a součásti strojů. Je velice nevhodná pro sváření.

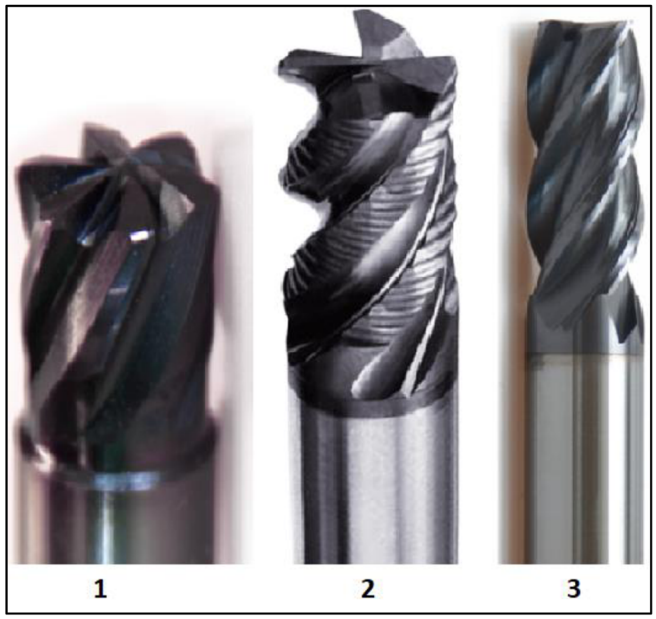
#### 2.3.1.1. Obrábění konstrukční oceli

Pro obrábění konstrukčních ocelí se v dnešní době nejvíce používají nástroje monolitické tvrdokovové. Jsou to nástroje, které dokážou obrábět oceli do tvrdosti až kolem 70 HRC a jejich posuv může dosahovat až 15 m/min. V této práci bude řešeno pouze frézování. Frézování ocelí má specifickou vlastnost v tom, že při frézování je nástroj namáhám cyklicky. Hlavní nevýhoda v cyklickém namáhání je ohřátí nástroje při úběru třísky a následného zchlazení při neobrábění. Proto je doporučeno při obrábění ocelí používat procesní kapalinu. Výhodou je i to, že ocel je dobrý vodič tepla.

Konstrukční ocel nemá vysoké mechanické vlastnosti (pokud nejde o obrábění zakalené vrstvy), a proto se neřeší problém, jak to obrobit, ale řeší se už jen produktivita a kvalita.

#### 2.3.1.2. Výběr nástrojů pro frézování konstrukční oceli

V této kapitole lze vidět výběr nástrojů pro frézování konstrukční oceli. V tomto případě se jedná o stopkové frézy.




*Obrázek 10: Monolitní frézy na obrábění konstrukční oceli* [18]

Nástroj č.1 od firmy Grumant je vyroben z tvrdokovu a je vhodný pro rychloposuvové frézování až 15 m/min pro hrubování obecních ploch.

Nástroj č.2 od firmy Grumant je vyroben ze slinutého karbidu a povlakován TiAlN. Nástroj je vhodný pro hrubování konstrukčních ocelí.

Nástroj č.3 od firmy Grumant je vyroben ze slinutého karbidu a povlakován TiAlN. Nástroj je vhodný pro dokončovací operace frézování konstrukční oceli.

U nástrojů č.2 a č.3 se řezná rychlost pohybuje kolem 100-200 m/min a posuv je 0.02-.0.08 mm/zub a úhel šroubovice je cca 45°.

### 2.3.2. Slitina hliníku

Hliník je velmi lehký kovový materiál, který se v praxi používá většinou ve formě slitin pro dosažení požadovaných mechanických vlastností. Hliník má velice špatnou obrobitelnost. Jako legující prvky se používají měď, mangan, zinek, křemík a hořčík. U slitin hliníku je obrobitelnost už mnohem lepší a v porovnání s ocelí stejné pevnosti je při obrábění dosahováno mnohem menších sil. Další výhodou/nevýhodou obrábění slitin hliníku je to, že hliník je velice dobrý vodič tepla. Výhodou je, že velkou část tepla odvede obrobek, ale nevýhodou je velká roztažnost hliníku a může to mít za následek nepřesnosti výroby. Slitiny hliníku lze rozdělit do 3 skupin a to slévárenské, ke tváření a automatové. Automatové materiály jsou materiály, které by měly mít dobrou obrobitelnost. Pro obrábění slitin hliníku se používají nástroje s kladným úhlem čela z důvodu malých mechanických vlastností hliníku. Jako laboratorní vzorek pro třískové obrábění slitinu hliníku byl vybrán materiál s označením EN AW 2030 [13–15].

#### 2.3.2.1. Výběr nástrojů pro frézování slitin hliníku

K obrábění slitin hliníku se používají nástroje s větším úhlem čela břitu.

*Obrázek 11:Stopková fréza s leštěnými břitovými destičkami pro obrábění slitin hliníku* [16]

Na obr č . 11 lze vidět nástroj od firmy SECO , který je doporučen k frézování slitin hliníku. Nástroj je opatřen leštěnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu. Nástroj není povlakován a je určen k velkému úběru třísky.

*Obrázek 12: Monolitní fréza k dokončovacím operacím pro frézování slitin hliníku* [18]

Na obrázku č. 12 je nástroj od firmy DORMER PRAMET, který určen k dokončovacím operacím.

U frézování slitin hliníku má velký vliv na výslednou drsnost povrchu leštěný nástroj. Řezná rychlost dosahuje hodnot až 900m/min a posuv 0,03 – 0,12 mm/zub.

### 2.3.3. Korozivzdorná ocel

Korozivzdorná ocel je vysokolegovaná ocel se zvýšenou odolnosti vůči korozi. Nejvíce zastoupeným prvkem po železe je chrom, kterého musí být ve slitině nejméně 12 %. Dalšími legujícími prvky jsou nikl, mangan, molybden, dusík, titan, niob, měď a křemík. Obvykle se v korozivzdorné oceli vyskytuje i uhlík ve velmi malém množství (setiny až desetiny procent).

#### 2.3.3.1. Obrábění korozivzdorných oceli

Obrobitelnost korozivzdorných ocelí je velmi ovlivněna jejich vlastnostmi, a to hlavně relativně vysokou pevností v tahu, vysokým stupněm zpevňování a vysokou houževnatostí. Obrobitelnost je rozdílná také pro různé druhy korozivzdorných ocelí např. dle zastoupení legujících prvků.

U obrábění korozivzdorné oceli se díky nepříznivým faktorům tvoří nárůstek na břitu nástroje, a to velmi negativně ovlivňuje odebírání třísky. Poté tříska neodchází, ale spíše tlačí na břit nástroje. Teploty v místě dotyku mohou být tak vysoké, že dojde k navaření třísek materiálu na břit nástroje. K omezení růstu nárůstku jsou využívány vysoké posuvy a nižší řezná rychlost. Špatná tepelná vodivost korozivzdorných ocelí také nepřispívá k dobré obrobitelnosti, a proto je nutné dbát na odvod tepla z obrobku a nástroje u všech druhů korozivzdorných ocelí. Přehřívání může způsobit otupení nástroje a lokální spálení povrchu obrobku.

Do těžkoobrobitelných materiálů se řadí austenitická korozivzdorná ocel. Kvůli její těžkoobrobitelnosti byly vyvíjeny další druhy (feritická, martenzitická). Obrobitelnost také zlepšuje obsah síranu manganu, který vzniká při přidání síry do oceli, a tak pozitivně ovlivňuje lámavost třísky, ale zároveň je také negativně ovlivněna odolnost vůči korozi a snižována tažnost. Z těchto důvodů by neměly tyto druhy být používány v agresivních prostředích či ohýbány přes malé rádiusy nebo kovány za studena. Síra také dále negativně ovlivňuje svařitelnost [17].

#### 2.3.3.2. Doporučení při obrábění korozivzdorných ocelí

Výběr stroje má zde vyšší nároky než u jiných materiálů. Tuhost stroje a spolehlivost chodu vřetene jsou nejdůležitějšími aspekty pro volbu stroje. Dále je nutné dbát na správné upnutí obrobku, které musí být dostatečně tuhé. U korozivzdorných ocelí se není obvykle třeba obávat, z důvodu vysoké pevnosti korozivzdorné oceli, že by byla ocel rozdrcena nebo zmáčknuta. Samozřejmostí je i co nejmenší vyložení nástrojů, což platí celkově pro obrábění. Při samotném obrábění je možnost použití procesní kapaliny, jelikož u korozivzdorné oceli nedochází k degradaci materiálu. Poslední neméně důležité doporučení je dbát na to, aby při dokončovací operaci neřezal nástroj v zóně deformačního zpevnění [17].

#### 2.3.3.3. Výběr nástrojů pro frézování nerezové oceli

V této kapitole lze vidět výběr nástrojů pro frézování nerezové oceli.

*Obrázek 13: Nástroje pro frézování nerezové oceli* [8, 20]

Nástroj č.1 od firmy SANDVIK coromant je nástroj osazený břitovými destičkami ze slinutého karbidu povlakován TiN. Nástroj je určen k frézování velkých nebo hrubování kapes a drážek.

Nástroj č.2 of firmy Guehring je vyroben ze slinutého karbidu a povlakován TiAl. Je určen k hrubování menších kapes. Nástroj má utvařeč třísky.

Nástroj č.3 of firmy Guehring je vyroben ze slinutého karbidu a je určen k dokončovacím operacím. Jeho velká hloubka záběru v radiálním směru zajišťuje celistvost povrchu.

Řezné rychlosti se pohybují kolem 50-150 m/min a posuv 0,008-0,2/zub.

# 3 METODIKA MĚŘENÍ

Metodika měření podává informace ohledně přípravy vzorků, prováděného měření, použitého strojního zařízení, frézovacích nástrojů a měřicích aparatur. Všechny použité nástroje, stroje a měřicí aparatury jsou majetkem Technické univerzity v Liberci.

## 3.1. Výroba vzorků

Cílem této diplomové práci bylo zjištění opotřebení řezného nástroje při frézování kovových a kompozitních materiálů. Jako kovové vzorky byly vybrány ocel 1.1191 (ČSN 12 050), slitina hliníku EN AW 2030 a nerezová ocel 1.4301 (ČSN 17 240). Jako zástupci kompozitních materiálů v této práci byly vybrány vzorky z materiálů epoxydové pryskyřice, epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken a epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken.

### 3.1.1. Kovové vzorky

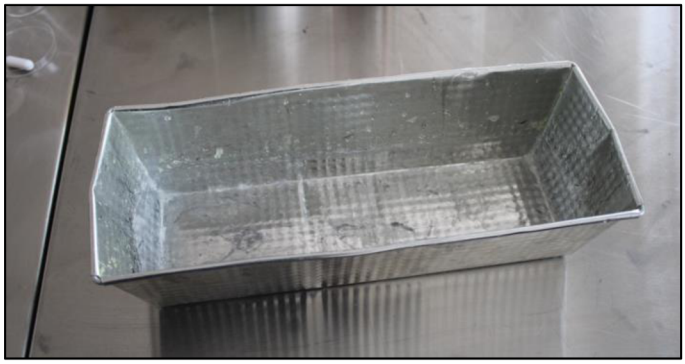
Příprava kovových vzorků byla značně jednodušší nežli u kompozitních materiálů. Kovové vzorky byly nařezány na přibližný rozměr pomocí poloautomatické pásové pily značky Pilous. Následně byly vzorky frézovány pomocí velké frézovací hlavy na požadovanou rozměrovou a geometrickou přesnost. Ke správnému porovnání jednotlivých hledisek je důležité, aby měly vzorky stejné rozměry. Takto připravené vzorky už mohly být použity pro dané měření. Jediná výjimka byla u měření teploty, kde před měřením ještě musely být vyvrtány otvory pro připevnění termočlánku.

### 3.1.2. Kompozitní vzorky

Pro výrobu kompozitních vzorků byla jako matrice zvolena dvousložková nízkomolekulární epoxidová pryskyřice ChS-EPOXY 520 od firmy Districhem a.s.. Vytvrzování pryskyřice probíhalo za pomocí tvrdidla T0492 v poměru 100:26 od firmy Districhem a. s.. Epoxydová pryskyřice a tvrdilo jsou zobrazeny na obrázku č. 14.

*Obrázek 14: Epoxidová pryskyřice a tvrdidlo*

Vzorky byly vyráběny v kovové formě (viz obrázek č. 15) vrstvením uhlíkových vláken/ tkaninou v separované formě na sebe a prosycovány epoxidovou pryskyřicí a tvrdidlem. Při přípravě vzorků bylo dbáno na to, aby pryskyřice obalila uhlíková vlákna a vytvořila požadované mezifázové rozhraní.



*Obrázek 15: Forma pro výrobu kompozitních vzorků*

Pro výrobu vzorků bylo použito 180 g uhlíkové výztuže (uhlíkový roving, tkanina) a 300 g epoxidové pryskyřice s adekvátním množstvím tvrdidla.

Vzorky byly po dobu 24 hodin vytvrzovány při teplotě 22°C ± 2°C. Po vyjmutí z formy byly všechny vzorky následně dotvrzeny při teplotě 50°C po dobu 10 hodin. Při vytvrzování ani dotvrzování nebyl použit zvýšený tlak.

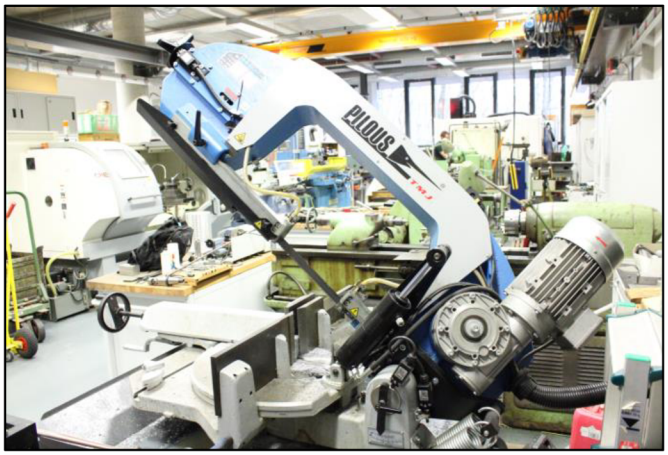
*Obrázek 16: Odlitky kompozitních materiálů*

## 3.2. Strojní zařízení

V následujících podkapitolách jsou uvedeny použitá strojní zařízení.

### 3.2.1. Pásová pila pilous

Pásová pila pilous byla použita k hrubému řezání polotovarů pro frézování.




*Obrázek 17: Pásová pila*

*Obrázek 18: Řezání vzorků*

### 3.2.2. Frézovací centrum

Všechna provedená měření byla provedena na číslicově řízeném stroji (CNC). Jedná se o tříosé frézovací centrum od německo-japonské firmy DMG MORI.

| **DMG MORI-Řada CMX V** | | |
|---|---|---|
| **Parametry** | Hodnota | Jednotka |
| **Polohovací přesnost** | ≤6 | μm |
| **Maximální otáčky** | 12 000 | ot/min |
| **Max pojezd v ose X** | 1 100 | mm |
| **Max pojezd v ose Y** | 560 | mm |
| **Max pojezd v ose Z** | 510 | mm |
| **Max. zatížení stolu** | 1 100 | kg |
| **Délka stolu** | 1 400 | mm |
| **Šířka stolu** | 560 | mm |

*Tabulka 1: Parametry CNC frézy*

*Obrázek 19: Frézovací centrum DMG MORI CMX V*

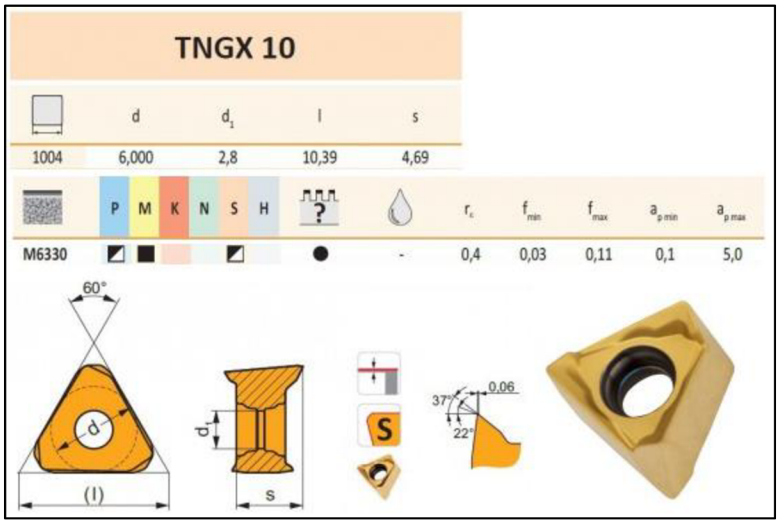
Frézovací centrum se vyznačuje vysokou tuhostí v ose Y, jak lze vidět na obrázku č.19. Program pro frézování byl napsán na panelu stroje, kde je instalován manual guide od firmy DMG MORI.

**Nástroj**

V případě této diplomové práce byl pro frézování použit nástroj od firmy DORMER PRAMET. Podle dělení nástrojů katalogu firmy PRAMET se jedná o frézy do rohu. Jedná se o nástroj s vyměnitelnými břitovými destičkami. Břitové destičky jsou vyrobeny ze slinutého karbidu a jsou povlakovány slitinou TiN. Tento povlak vydrží teploty kolem 600 °C a snižuje koeficient tření. Nástroj je vhodný na obrábění ocelí, nerezových ocelí a žáruvzdorných slitin. Fréza je upnuta pomocí kleštiny ER40 do upínače. Upínač je osazen kuželem SK40 a upnut ve stroji pomocí šroubu/čepu na konci upínače (šroub někdy bývá výrobci označován jako čep).

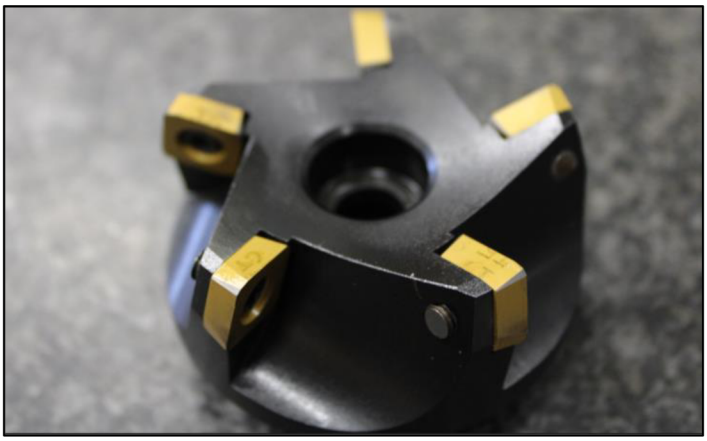
*Obrázek 20: Použité břitové destičky*

Na obrázku č.20 lze vidět doporučené řezné podmínky pro dané materiály udávané výrobcem.




*Obrázek 21: Geometrie břitové destičky* [19]

Na obrázku č.21 lze vidět geometrii a rozměry břitové destičky.



*Obrázek 22: Nástroj pro přípravu vzorků*

Nástroj na obrázku č. 22 byl použit pouze pro přípravu vzorků. Nástroj má větší průměr, než je šířka vzorku, takže je proto ideální. Tento nástroj je vhodný pro obrábění oceli a nerezové oceli.

*Obrázek 23: Nástroj pro provedení experimentu*

Na obrázku č. 23 lze vidět kompletní nástroj včetně upínače.

*Obrázek 24: Detail nástroje pro experiment*

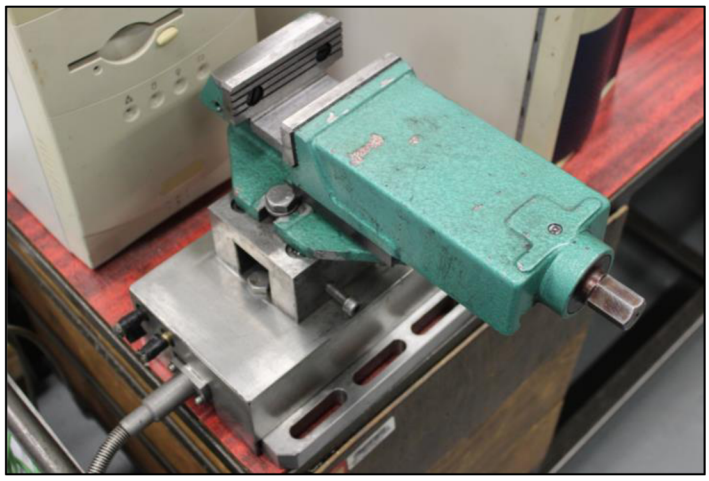
Obrázek č.24 ukazuje detail břitové destičky upnuté v nástroji. Pro jednoduchost a ekonomičnost bylo pro frézování použita pouze jedna upnutá břitová destička.

### 3.3. Měřicí aparatura

V následujících podkapitolách bude popsána měřicí aparatura.

#### 3.3.1. Měření sil

Pro měření sil při frézování byl použit třísložkový piezoelektrický dynamometr KISTLER. Piezoelektrické dynamometry patří k nejpoužívanějším dynamometrům a fungují na principu piezoelektrickém jevu, který je definován vznikem elektrického náboje na povrchu některých krystalů vlivem mechanického zatížení. Vlivem deformace krystalu dojde k posunutí těžiště kladných a záporných iontů, které se před deformací nacházejí ve stejném bodě a vznikne na povrchu krystalu elektrický náboj, který je přímo úměrný zatěžující síle. Tento jev zle pozorovat jen u krystalů, které nemají střed symetrie a lze ho aplikovat i opačně tak, že vlivem působení elektrického pole na krystal vznikne mechanické zatížení.

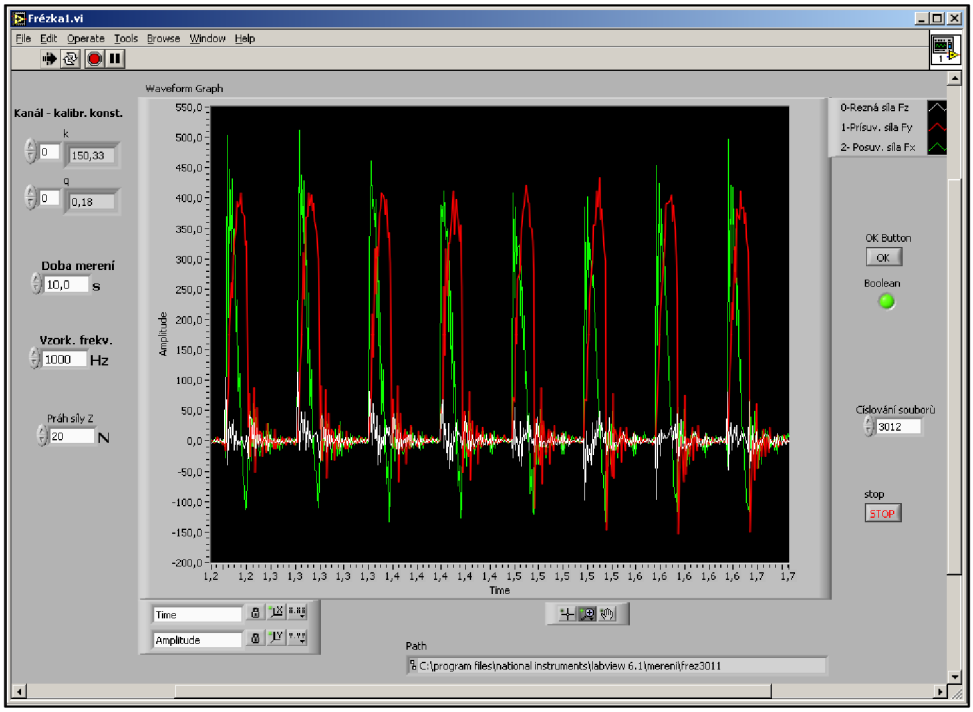


*Obrázek 25: Piezoelektrický dynamometr se strojním svěrákem*

Elektrický náboj, který vzniká na snímači dynamometru je velice malý, a proto musí být zesilován. K zesílení slouží připojený nábojový zesilovač (viz. obrázek č. 25), který je spojen s dynamometrem pomocí robustního kabelu chráněného kovovým obalem. Konektory kabelu jsou opatřeny krytkami proti vniknutí prachových nečistot, které vznikají při obrábění. Nábojový zesilovač je následně propojen pomocí datového kabelu s počítačem.

*Obrázek 26: Nábojový zesilovač*

Počítačový program LabVIEW zpracovává data a zobrazuje výsledky pomocí grafů. Z těchto grafů se vyseparují chybná měření a odečte se 5 hodnot sil, přičemž každá síla je průměrem z 5 amplitud sil. Toto měření se opakuje pro každé řezné podmínky pětkrát a vznikne tak 25 hodnot sil, které se poté statisticky zpracovávají v programu Excel. (Viz. příloha Excel)

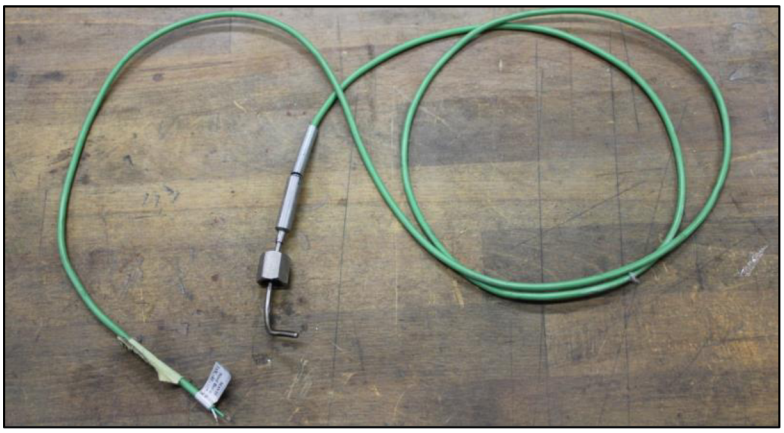



*Obrázek 27: Ukázka grafického výstupu z programu LabView*

Dynamometr se upne na stůl obráběcího centra pomocí šroubů a jeho poloha se ustaví pomocí úhelnice. Na dynamometr se připevní strojní svěrák opět pomocí šroubů. Poté se dynamometr zkalibruje siloměrem ve všech osách za použití různé síly a počítačový program LabVIEW si vypočítá kalibrační konstanty. Tímto je dynamometr připraven k použití.

### 3.3.2. Měření termodynamické teploty

Měření termodynamické teploty probíhalo za pomocí termočlánků typu K. První termočlánek je vyroben ze slitiny Ni-Cr (90 % Ni;10 %Cr) – Chromel. Chromel je slitina přímo určená k výrobě kladných vodičů termočlánků typu K a vydrží teploty do cca 1100 °C. Druhý termočlánek je vyroben ze slitiny Ni-Al-Mn-Si (95 % Ni;2 % Al; 2 % Mn;1 % Si) a tato slitina se nazývá alumel. Alumel je magnetický materiál a používá se k výrobě negativních vodičů termočlánků typu K a vydrží teploty do cca 1400°C. Výhoda těchto termočlánků je, že dají přivařit ke kovovým materiálům a tímto vznikne tepelný „most“.

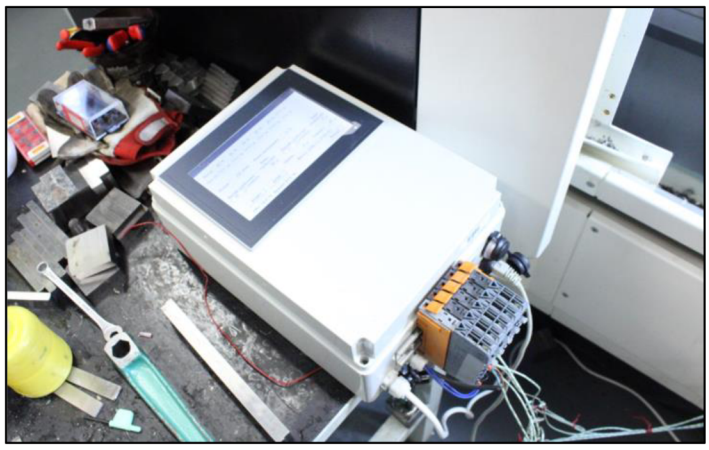


*Obrázek 28: Termočlánek typu K*

Termočlánky jsou přivařeny v otvoru vzorku pomocí kondenzátorové svářečky. Obrábění probíhá z druhé strany vzorku, než jsou otvory a probíhá těsně nad termočlánky. Je důležité dbát na to, aby nástroj neobráběl konce termočlánků, tím by došlo ke znehodnocení měření. V každém vzorku pro měření termodynamické teploty je vyhotoveno 5 otvorů v řadě.

Druhá strana termočlánků je připojena do patice-sběrnice, která se kalibruje podle typu použití termočlánků. Změnou termodynamické teploty na konci vodičů termočlánku se mění napětí ve vodičích. Tato změna napětí se pohybuje v řádech μV.

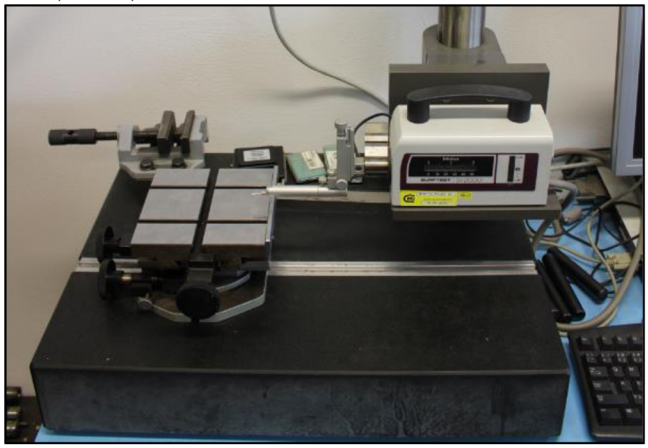
Sběrnice převádí změnu µV na termodynamickou teplotu. Aktuální teplotu termočlánků lze vidět na obrazovce řídící jednotky. Na řídíce jednotce je nastaveno počet měření za 1 sekundu a délka měření v sekundách. Řídící jednotka je pomocí datového kabelu spojena s počítačem. Řídící jednotka po skončení měření vygeneruje datový soubor s koncovkou *.csv. Tento typ souboru lze otevřít v programu Excel. Naměřená data z excelu se poté staticky zpracovávají. (viz. příloha Excel)



*Obrázek 29: Řídící jednotka pro měření termodynamické teploty*

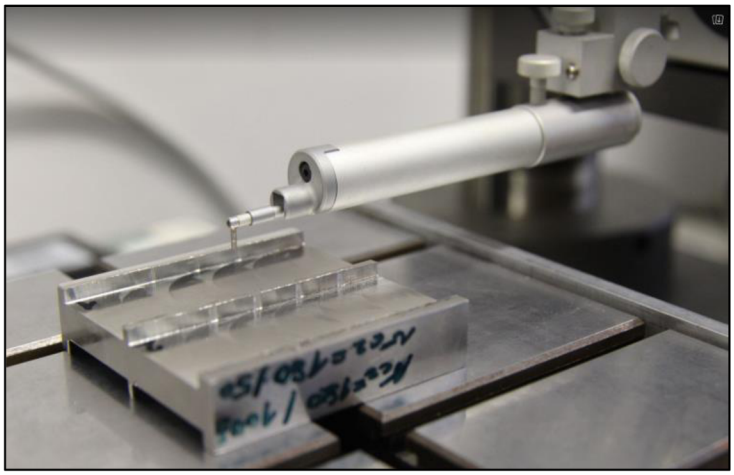
### 3.3.3. Měření drsnosti povrchu

Laboratorní měření drsnosti povrchu probíhalo na profilometru MITUTOYO SV-2000N2 SURFTEST. Jedná se o dotyková profilometr (viz obrázek č. 30), který pomocí diamantového hrotu přejíždí po povrchu měřeného vzorku. Tento vertikální pohyb se transformuje na elektrický signál a ten je pomocí datového kabelu odesílán do počítačového programu Surfpak. Program Surfpak umožňuje měřit 26 parametrů drsnosti podle norem ISO, DIN, ANSI A JIS.



*Obrázek 30: Profilometr*

V případě této diplomové práci se pracovalo s parametry drsnosti povrchu *Ra*, *Rz* a *Rt*. Pomocí vodících šroubů profilometru byl diamantový hrot vždy nastaven do správné polohy ofrézovaného místa. Na každém měřeném úseku vzorku byly vyhotoveny 3 měření drsnosti. Na každém vzorku bylo 5 úseků. Profil povrchu vzorku byl vyobrazen v programu Surfpak a průměry těchto hodnot byly zaznamenávány do programu Excel. Pro jednotlivé řezné podmínky tímto způsobem vzniklo 15 měření drsnosti povrchu.



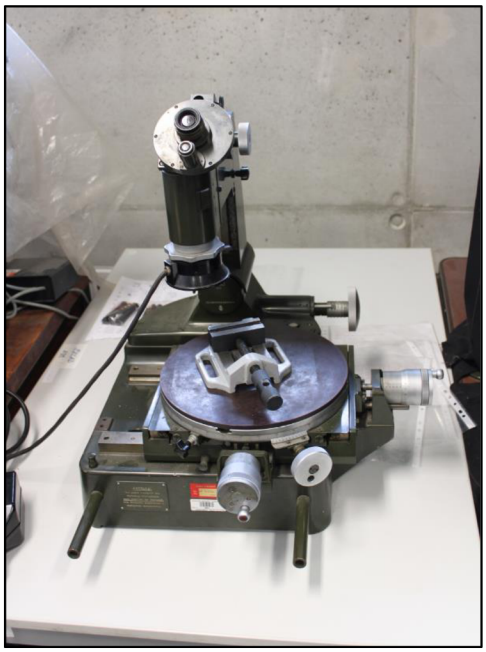
*Obrázek 31: Detail hrotu profilometru*

### 3.3.4. Měření rozměrové stability

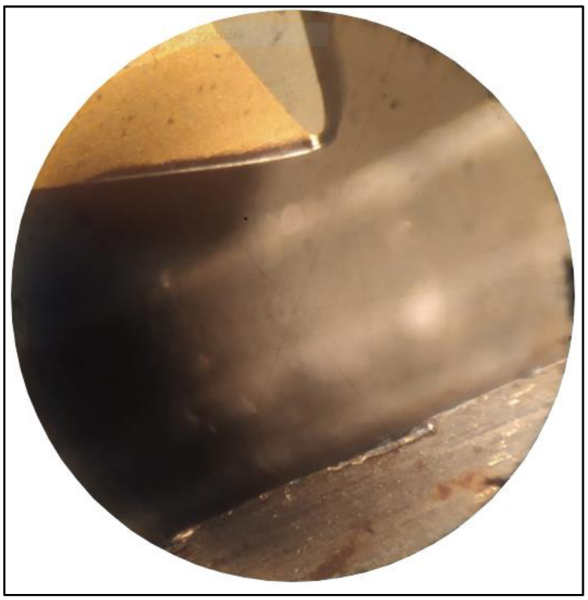
K měření rozměrové stability byl použit digitální třmenový mikrometr značky MITUTOYO, který dokáže měřit s přesností 1μm. Vzorek byl upnut do strojního svěráku a změřen na 8 výchozích místech. Následně se odebrala tříska strojně nastavena na 1 mm a vzorek se opět změřil na stejných 8 místech. S rozdílem naměřených hodnot se poté statisticky nakládalo. Celková odebraná tříska byla 4 mm a toto měření se opakovalo čtyřikrát.

### 3.3.5. Měření opotřebení nástroje

Opotřebení břitové destičky bylo měřeno na dílenském mikroskopu ZEISS. Mikroskop je opatřena příčným a podélným posuvem a rotací stolu, přičemž je vše ovládáno mechanicky. Přesnosti polohování je dosažena pomocí mikrometrických šroubů. Odečítání hodnot se provádí za pomocí mikrometrických hlavic s rozlišením 0,01 mm.



*Obrázek 32:Mikroskop ZEISS*



*Obrázek 33: Detail pohledu v mikroskopu*

Pro každé měření bylo použito jedné řezné hrany břitové destičky. Hloubka záběru byla nastavena na 1 milimetr a po každém ofrézování bylo měřeno opotřebení břitu. Délka vytvořené drážky v obrobku byla 55 mm a měření bylo pro 1 břit opakováno pětkrát. Celkem měřených břitů pro jednotlivé řezné podmínky byly 3.

Výpočet dráhy, kterou urazil břit při jednom měření (cca délka cykloidy nástroje).

| Parametr | Hodnota | Jednotka |
|---|---|---|
| **Řezná rychlost – $v_c$** | 80 | [m/min] |
| **Posuvová rychlost – f** | 50 | [mm/min] |
| **Hloubka záběru – $a_p$** | 1 | [mm] |
| **Délka drážky v obrobku – L** | 55 | [mm] |
| **Průměr nástroje – D** | 25 | [mm] |
| **Počet břitových destiček – n** | 1 | - |

*Tabulka 2:Vstupní hodnoty pro výpočet dráhy nástroje*

Obvod výseče

$$o = \pi * \frac{D}{2} = \pi * 0{,}025 = 0{,}0785\ m$$

$$n = \frac{v_c}{\pi * D} = \frac{80}{\pi * 0{,}025} = 1018.6\,\frac{ot}{min}$$

$$t = \frac{L}{f} = \frac{0{,}055}{0{,}050} = 1{,}1\ min$$

$$L_1 = n * t * o = 1018{,}6 * 1{,}1 * 0{,}0785 = 87{,}9\ m \sim 88\ m$$

$$L_c = L_1 * n_{drah} = 88 * 5 = 440\ m$$

Celková dráha, kterou urazil břit při jednom měření je 440 m.

Vyhodnocení opotřebení bylo dosaženo zaostřením obrazu mikroskopu a následně pomocí nitkového kříže a mikrometrických hlavic odečtena velikost opotřebení.

# 4 EXPERIMENT

Realizace experimentu byla rozdělena do 5 částí – měření řezných sil, rozměrové přesnosti, velikosti opotřebení nástroje, termodynamické teploty a drsnosti povrchu. V každé části experimentu jsou uvedeny tabulky s výsledky (tab. 3–23), v jejichž záhlavích je vždy uveden použitý materiál a řezné podmínky.

## 4.1 Měření sil při frézování

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledné průměrné hodnoty s chybou měření pro řezné síly v osách Y a Z u jednotlivých materiálů za daných řezných podmínek. Výsledky sil jsou uváděný v celých číslech.

| Materiál-Ocel 12 050 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | $F_y$ [N] | $F_y$ [N] |
| 3 | 80 | 50 | 417 ± 4 | 407 ± 12 |
| | 180 | 50 | 430 ± 24 | 291 ± 9 |
| | 80 | 100 | 642 ± 11 | 616 ± 4 |
| | 180 | 100 | 418 ± 8 | 406 ± 8 |
| 1 | 80 | 50 | 153 ± 4 | 137 ± 2 |
| | 180 | 50 | 115 ± 4 | 99 ± 1 |
| | 80 | 100 | 233 ± 3 | 217 ± 5 |
| | 180 | 100 | 155 ± 3 | 145 ± 1 |

*Tabulka 3: Výsledky řezných sil v ose Y u oceli*

Z tabulky č. 3 vyplývá, že největší naměřená řezná síla u oceli v ose Y byla naměřena za řezných podmínek $a_p = 3$ mm, $v_c = 80$ m/min a f = 100 mm/min bez použití procesní kapaliny a nejmenší řezná síla byla naměřena za řezných podmínek $a_p = 1$ mm, $v_c = 180$ m/min a f = 50 mm/min s použitím procesní kapaliny.

| Materiál-Dural 2030 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | $F_y$ [N] | $F_y$ [N] |
| 3 | 80 | 50 | 198 ± 4 | 194 ± 3 |
| | 180 | 50 | 131 ± 4 | 135 ± 3 |
| | 80 | 100 | 278 ± 5 | 298 ± 5 |
| | 180 | 100 | 186 ± 5 | 181 ± 3 |
| 1 | 80 | 50 | 76 ± 1 | 71 ± 2 |
| | 180 | 50 | 47 ± 1 | 48 ± 1 |
| | 80 | 100 | 101 ± 3 | 110 ± 2 |
| | 180 | 100 | 73 ± 2 | 66 ± 2 |

*Tabulka 4: Výsledky řezných sil v ose Y u slitiny hliníku*

Z tabulky č. 4 vyplývá, že největší naměřená řezná síla u slitiny hliníku v ose Y byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 100 mm/min za použití procesní kapaliny a nejmenší řezná síla byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 180 m/min a f = 50 mm/min bez použití procesní kapaliny.

| Materiál-Nerezová ocel 1.4301 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | $F_y$ [N] | $F_y$ [N] |
| 3 | 80 | 50 | 471 ± 6 | 477 ± 4 |
| | 180 | 50 | 297 ± 5 | 345 ± 8 |
| | 80 | 100 | 801 ± 22 | 763 ± 8 |
| | 180 | 100 | 427 ± 10 | 439 ± 11 |
| 1 | 80 | 50 | 152 ± 2 | 165 ± 2 |
| | 180 | 50 | 101 ± 2 | 119 ± 2 |
| | 80 | 100 | 258 ± 4 | 263 ± 3 |
| | 180 | 100 | 165 ± 6 | 151 ± 2 |

*Tabulka 5: Výsledky řezných sil v ose Y u nerezové oceli*

Z tabulky č. 5 vyplývá, že největší naměřená řezná síla u nerezové oceli v ose Y byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 100 mm/min bez použití procesní kapaliny a nejmenší řezná síla byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 180 m/min a f = 50 mm/min bez použití procesní kapaliny.

| Materiál-Epoxydová pryskyřice | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | $F_y$ [N] | $F_y$ [N] |
| 3 | 80 | 50 | 68 ± 1 | 66 ± 3 |
| | 40 | 50 | 96 ± 5 | 78 ± 5 |
| | 80 | 100 | 109 ± 4 | 86 ± 3 |
| | 40 | 100 | 101 ± 11 | 111 ± 6 |
| 1 | 80 | 50 | 36 ± 1 | 31 ± 2 |
| | 40 | 50 | 33 ± 2 | 39 ± 2 |
| | 80 | 100 | 41 ± 2 | 47 ± 3 |
| | 40 | 100 | 53 ± 4 | 52 ± 4 |

*Tabulka 6: Výsledky řezných sil v ose Y u epoxydové pryskyřice*

Z tabulky č.6 vyplývá, že největší naměřená řezná síla u epoxydové pryskyřice v ose Y byla naměřena za řezných podmínek $a_p = 3$ mm, $v_c = 40$ m/min a $f = 100$ mm/min za použití procesní kapaliny a nejmenší řezná síla byla naměřena za řezných podmínek $a_p = 1$ mm, $v_c = 80$ m/min a $f = 50$ mm/min za použití procesní kapaliny.

| Materiál-Uhlíková vlákna v EP | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | $F_y$ [N] | $F_y$ [N] |
| 3 | 80 | 50 | 64 ± 2 | 73 ± 2 |
| | 40 | 50 | 92 ± 6 | 97 ± 9 |
| | 80 | 100 | 89 ± 8 | 88 ± 5 |
| | 40 | 100 | 125 ± 8 | 135 ± 7 |
| 1 | 80 | 50 | 24 ± 1 | 29 ± 2 |
| | 40 | 50 | 49 ± 2 | 18 ± 1 |
| | 80 | 100 | 36 ± 2 | 33 ± 3 |
| | 40 | 100 | 69 ± 4 | 58 ± 4 |

*Tabulka 7: Výsledky řezných sil v ose Y u epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken*

Z tabulky č.7 vyplývá, že největší naměřená řezná síla u epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken v ose Y byla naměřena za řezných podmínek $a_p = 3$ mm, $v_c = 40$ m/min a $f = 100$ mm/min za použití procesní kapaliny a nejmenší řezná síla byla naměřena za řezných podmínek $a_p = 1$ mm, $v_c = 40$ m/min a $f = 50$ mm/min za použití procesní kapaliny.

| Materiál-Tkanina z uhlíkových vláken v EP | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | $F_y$ [N] | $F_y$ [N] |
| 3 | 80 | 50 | 129 ± 5 | 225 ± 15 |
| | 40 | 50 | 253 ± 9 | 218 ± 5 |
| | 80 | 100 | 204 ± 5 | 251 ± 22 |
| | 40 | 100 | 271 ± 12 | 318 ± 5 |
| 1 | 80 | 50 | 51 ± 3 | 78 ± 5 |
| | 40 | 50 | 79 ± 2 | 79 ± 4 |
| | 80 | 100 | 68 ± 2 | 92 ± 6 |
| | 40 | 100 | 108 ± 3 | 104 ± 3 |

*Tabulka 8: Výsledky řezných sil v ose Y u epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken*

Z tabulky č. 8 vyplývá, že největší naměřená řezná síla u epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken v ose Y byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 40 m/min a f = 100 mm/min za použití procesní kapaliny a nejmenší řezná síla byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 50 mm/min bez použití procesní kapaliny.

| Materiál-Ocel 12 050 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | $F_z$ [N] | $F_z$ [N] |
| 3 | 80 | 50 | 29 ± 9 | 64 ± 8 |
| | 180 | 50 | 83 ± 14 | 57 ± 11 |
| | 80 | 100 | 66 ± 15 | 26 ± 2 |
| | 180 | 100 | 100 ± 11 | 80 ± 13 |
| 1 | 80 | 50 | 43 ± 7 | 25 ± 1 |
| | 180 | 50 | 29 ± 3 | 31 ± 2 |
| | 80 | 100 | 35 ± 2 | 32 ± 1 |
| | 180 | 100 | 38 ± 6 | 32 ± 1 |

*Tabulka 9: Výsledky řezných sil v ose Z u oceli*

Z tabulky č.9 vyplývá, že největší naměřená řezná síla u oceli v ose Z byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 180 m/min a f = 100 mm/min bez použití procesní kapaliny a nejmenší řezná síla byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 50 mm/min za použití procesní kapaliny.

| Materiál-Dural 2030 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | $F_z$ [N] | $F_z$ [N] |
| 3 | 80 | 50 | 34 ± 5 | 36 ± 2 |
| | 180 | 50 | 26 ± 5 | 33 ± 4 |
| | 80 | 100 | 38 ± 6 | 46 ± 8 |
| | 180 | 100 | 41 ± 10 | 30 ± 2 |
| 1 | 80 | 50 | 22 ± 1 | 18 ± 1 |
| | 180 | 50 | 14 ± 1 | 20 ± 2 |
| | 80 | 100 | 34 ± 1 | 27 ± 1 |
| | 180 | 100 | 26 ± 2 | 18 ± 2 |

*Tabulka 10: Výsledky řezných sil v ose Z u slitiny hliníku*

Z tabulky č. 10 vyplývá, že největší naměřená řezná síla u slitiny hliníku v ose Z byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 100 mm/min za použití procesní kapaliny a nejmenší řezná síla byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 180 m/min a f = 50 mm/min bez použití procesní kapaliny.

| Materiál-Nerezová ocel 1.4301 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | $F_z$ [N] | $F_z$ [N] |
| 3 | 80 | 50 | 73 ± 12 | 83 ± 13 |
| | 180 | 50 | 68 ± 10 | 83 ± 13 |
| | 80 | 100 | 130 ± 15 | 93 ± 14 |
| | 180 | 100 | 70 ± 10 | 88 ± 18 |
| 1 | 80 | 50 | 42 ± 2 | 38 ± 1 |
| | 180 | 50 | 45 ± 3 | 33 ± 2 |
| | 80 | 100 | 50 ± 3 | 58 ± 2 |
| | 180 | 100 | 58 ± 10 | 42 ± 3 |

*Tabulka 11: Výsledky řezných sil v ose Z u nerezové oceli*

Z tabulky č. 11 vyplývá, že největší naměřená řezná síla u nerezové oceli v ose Z byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 100 mm/min bez použití procesní kapaliny a nejmenší řezná síla byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 180 m/min a f = 50 mm/min za použití procesní kapaliny.

| Materiál-Epoxydová pryskyřice | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | $F_z$ [N] | $F_z$ [N] |
| 3 | 80 | 50 | 26 ± 2 | 25 ± 2 |
| | 40 | 50 | 52 ± 3 | 31 ± 3 |
| | 80 | 100 | 58 ± 4 | 51 ± 4 |
| | 40 | 100 | 49 ± 5 | 52 ± 3 |
| 1 | 80 | 50 | 30 ± 1 | 21 ± 1 |
| | 40 | 50 | 18 ± 1 | 24 ± 2 |
| | 80 | 100 | 26 ± 1 | 30 ± 2 |
| | 40 | 100 | 33 ± 2 | 27 ± 2 |

*Tabulka 12: Výsledky řezných sil v ose Z u epoxydové pryskyřice*

Z tabulky č. 12 vyplývá, že největší naměřená řezná síla u epoxydové pryskyřice v ose Z byla naměřena za řezných podmínek $a_p = 3$ mm, $v_c = 80$ m/min a $f = 100$ mm/min bez použití procesní kapaliny a nejmenší řezná síla byla naměřena za řezných podmínek $a_p = 1$ mm, $v_c = 40$ m/min a $f = 50$ mm/min bez použití procesní kapaliny.

| Materiál-Uhlíková vlákna v EP | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | $F_z$ [N] | $F_z$ [N] |
| 3 | 80 | 50 | 48 ± 4 | 35 ± 2 |
| | 40 | 50 | 35 ± 3 | 30 ± 3 |
| | 80 | 100 | 52 ± 4 | 40 ± 4 |
| | 40 | 100 | 73 ± 5 | 45 ± 5 |
| 1 | 80 | 50 | 31 ± 1 | 25 ± 1 |
| | 40 | 50 | 29 ± 2 | 13 ± 0 |
| | 80 | 100 | 41 ± 2 | 31 ± 2 |
| | 40 | 100 | 51 ± 2 | 43 ± 2 |

*Tabulka 13: Výsledky řezných sil v ose Z u epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken*

Z tabulky č. 13 vyplývá, že největší naměřená řezná síla u epoxydové pryskyřice plněné uhlíkovými vlákny v ose Z byla naměřena za řezných podmínek $a_p = 3$ mm, $v_c = 40$ m/min a $f = 100$ mm/min bez použití procesní kapaliny a nejmenší řezná síla byla naměřena za řezných podmínek $a_p = 1$ mm, $v_c = 40$ m/min a $f = 50$ mm/min za použití procesní kapaliny.

| Materiál-Tkanina z uhlíkových vláken v EP | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | $F_z$ [N] | $F_z$ [N] |
| 3 | 80 | 50 | 23 ± 2 | 39 ± 6 |
| | 40 | 50 | 36 ± 3 | 24 ± 2 |
| | 80 | 100 | 37 ± 3 | 51 ± 5 |
| | 40 | 100 | 43 ± 4 | 51 ± 4 |
| 1 | 80 | 50 | 24 ± 2 | 34 ± 1 |
| | 40 | 50 | 42 ± 1 | 30 ± 2 |
| | 80 | 100 | 34 ± 2 | 43 ± 2 |
| | 40 | 100 | 53 ± 1 | 41 ± 3 |

*Tabulka 14: Výsledky řezných sil v ose Z u epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken*

Z tabulky č. 14 vyplývá, že největší naměřená řezná síla u epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken v ose Z byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 100 mm/min za použití procesní kapaliny a nejmenší řezná síla byla naměřena za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 50 mm/min bez použití procesní kapaliny.

### 4.2 Měření rozměrové přesnosti

V následující tabulce jsou uvedeny výsledné průměrné hodnoty s chybou měření pro měření rozměrové přesnosti u jednotlivých materiálů za daných řezných podmínek. Výsledky rozměrové přesnosti jsou uváděny v tisícinách milimetru.

| Rozměrová přesnost | | |
|---|---|---|
| Řezné podmínky | $v_c$=80 m/min; f=50 mm/min; $a_p$=1 mm | |
| Materiál | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | Rozměr [mm] | Rozměr [mm] |
| Ocel 12 050 | 1,001 ± 0,001 | 0,999 ± 0,000 |
| Dural 2030 | 1,000 ± 0,001 | 1,000 ± 0,001 |
| Nerezová ocel 1.4301 | 1,000 ± 0,001 | 0,999 ± 0,001 |
| Epoxydová pryskyřice | 0,991 ± 0,002 | 0,975 ± 0,002 |
| Uhlíková vlákna | 1,000 ± 0,001 | 0,992 ± 0,002 |
| Tkanina z uhlíkových vláken v EP | 0,997 ± 0,002 | 0,983 ± 0,003 |

*Tabulka 15: Výsledky rozměrové stability*

Z tabulky č. 15 lze vyčíst, že nejvyšší rozměrová přesnost při frézování byla dosažena u kovových materiálů zejména u slitiny hliníku. Nepřesného frézování bylo dosaženo u nekovových materiálů a nejméně přesného obrábění bylo dosaženo u nekovových materiálů s použitím procesní kapaliny.

### 4.3 Měření opotřebení břitové destičky

V následující tabulce jsou uvedeny výsledné průměrné hodnoty s chybou měření pro měření opotřebení břitové destičky u jednotlivých materiálů za daných řezných podmínek. Výsledky opotřebení jsou uváděny v setinách milimetru.

| **Opotřebení břitové destičky** | | |
|---|---|---|
| **Řezné podmínky** | **vc=80 m/min; f=50 mm/min; ap=1 mm** | |
| **Materiál** | **Bez procesní kapaliny Velikost opotřebení BD [mm]** | **S procesní kapalinou Velikost opotřebení BD [mm]** |
| **Ocel 12 050** | 0,04 ± 0,01 | 0,03 ± 0,01 |
| **Dural 2030** | 0,03 ± 0,01 | 0,02 ± 0,00 |
| **Nerezová ocel 1.4301** | 0,06 ± 0,01 | 0,04 ± 0,00 |
| **Epoxydová pryskyřice** | 0,05 ± 0,01 | 0,04 ± 0,00 |
| **Uhlíková vlákna** | 0,05 ± 0,00 | 0,03 ± 0,00 |
| **Tkanina z uhlíkových vláken v EP** | 0,08 ± 0,01 | 0,04 ± 0,00 |

*Tabulka 16: Opotřebení břitové destičky u jednotlivých materiálů*

Z tabulky č. 16 lze vidět, že nejvyšší opotřebení břitové destičky bylo dosaženo u frézování epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken bez použití procesní kapaliny. Dále nejvyšší opotřebení u kovového materiálu je u nerezové oceli bez použití procesní kapaliny. Naopak nejnižší opotřebení je u slitiny hliníku za použití procesní kapaliny.

### 4.4 Měření termodynamické teploty

V následující tabulce jsou uvedeny výsledné průměrné hodnoty s chybou měření pro měření termodynamické teploty u jednotlivých materiálů za daných řezných podmínek. Výsledky opotřebení jsou uváděny v celých číslech.

| Materiál | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Termodynamická teplota [°C] bez procesní kapaliny | Termodynamická teplota [°C] s procesní kapalinou |
|---|---|---|---|---|
| **Ocel 12 050** | 80 | 50 | 33 ± 1 | 24 ± 0 |
| | 180 | 50 | 38 ± 3 | 24 ± 0 |
| | 280 | 50 | 46 ± 5 | 24 ± 0 |
| **Dural 2030** | 80 | 50 | 27 ± 0 | 23 ± 0 |
| | 180 | 50 | 29 ± 1 | 23 ± 0 |
| | 280 | 50 | 30 ± 0 | 24 ± 0 |
| **Nerezová ocel 1.4301** | 80 | 50 | 44 ± 2 | 24 ± 0 |
| | 180 | 50 | 54 ± 5 | 25 ± 0 |
| | 280 | 50 | 70 ± 7 | 25 ± 0 |
| **Epoxydová pryskyřice** | 40 | 50 | 23 ± 0 | 22 ± 0 |
| | 80 | 50 | 25 ± 1 | 23 ± 0 |
| | 120 | 50 | 26 ± 1 | 23 ± 0 |
| **Uhlíková vlákna v EP** | 40 | 50 | 23 ± 0 | 24 ± 0 |
| | 80 | 50 | 23 ± 0 | 24 ± 0 |
| | 120 | 50 | 24 ± 0 | 25 ± 0 |
| **Tkanina z uhlíkových vláken v EP** | 40 | 50 | 27 ± 1 | 22 ± 0 |
| | 80 | 50 | 26 ± 0 | 22 ± 0 |
| | 120 | 50 | 30 ± 0 | 24 ± 0 |

*Tabulka 17:Výsledné termodynamické teploty u jednotlivých materiálů*

Z tabulky č. 17 je patrné, že nejvyšších teplot při frézování bylo dosaženo u nerezové oceli při řezných podmínkách $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 280 m/min a f = 50 mm/min bez použití procesní kapaliny. Nejnižších teplot bylo dosaženo u frézování epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken za řezných podmínek $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 40 m/min a f = 50 mm/min s použitím procesní kapaliny a u epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken za řezných podmínek $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 40/80 m/min a f = 50 mm/min s použitím procesní kapaliny.

### 4.5 Měření drsnosti povrchu

V následující tabulce a grafu jsou uvedeny výsledné průměrné hodnoty s chybou měření pro měření drsnosti povrchu u jednotlivých materiálů za daných řezných podmínek. Výsledky opotřebení jsou uváděny v mikrometrech.

| Materiál-Ocel 12 050 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Označení drsnosti | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | | Drsnost povrchu [µm] | Drsnost povrchu [µm] |
| 3 | 80 | 50 | Ra | 1,651 ± 0,077 | 1,299 ± 0,038 |
| | | | Rz | 9,350 ± 0,406 | 7,829 ± 0,389 |
| | | | Rt | 10,941 ± 0,441 | 9,653 ± 0,516 |
| 3 | 180 | 50 | Ra | 1,171 ± 0,101 | 0,123 ± 0,005 |
| | | | Rz | 7,023 ± 0,537 | 0,830 ± 0,138 |
| | | | Rt | 9,150 ± 0,759 | 1,108 ± 0,127 |
| 3 | 80 | 100 | Ra | 0,369 ± 0,009 | 0,168 ± 0,008 |
| | | | Rz | 2,789 ± 0,299 | 1,652 ± 0,191 |
| | | | Rt | 3,783 ± 0,620 | 2,632 ± 0,485 |
| 3 | 180 | 100 | Ra | 0,291 ± 0,053 | 0,100 ± 0,006 |
| | | | Rz | 2,037 ± 0,423 | 0,741 ± 0,077 |
| | | | Rt | 3,902 ± 1,066 | 0,953 ± 0,219 |
| 1 | 80 | 50 | Ra | 0,456 ± 0,076 | 0,255 ± 0,030 |
| | | | Rz | 3,837 ± 0,527 | 2,592 ± 0,306 |
| | | | Rt | 6,224 ± 1,148 | 3,717 ± 0,404 |
| 1 | 180 | 50 | Ra | 0,749 ± 0,134 | 0,111 ± 0,009 |
| | | | Rz | 5,100 ± 0,737 | 0,726 ± 0,133 |
| | | | Rt | 7,255 ± 1,044 | 1,096 ± 0,189 |
| 1 | 80 | 100 | Ra | 1,114 ± 0,081 | 0,316 ± 0,050 |
| | | | Rz | 6,656 ± 0,469 | 2,933 ± 0,439 |
| | | | Rt | 9,023 ± 0,858 | 3,853 ± 0,911 |
| 1 | 180 | 100 | Ra | 1,493 ± 0,078 | 0,148 ± 0,024 |
| | | | Rz | 8,287 ± 0,587 | 1,127 ± 0,332 |
| | | | Rt | 10,879 ± 0,905 | 1,724 ± 0,702 |

*Tabulka 18: Výsledné drsnosti povrchu u oceli*

Z tabulky č. 18 vyplývá, že nejlepší drsnosti povrchu při frézování oceli bylo dosaženo za řezných podmínek $a_p = 3$ mm, $v_c = 180$ m/min a $f = 100$ mm/min s použitím procesní kapaliny a nejhoršího výsledku bylo dosaženo za řezných podmínek $a_p = 3$ mm, $v_c = 80$ m/min a $f = 50$ mm/min bez použití procesní kapaliny.

| Materiál-Dural 2030 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Označení drsnosti | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | | Drsnost povrchu [µm] | Drsnost povrchu [µm] |
| 3 | 80 | 50 | Ra | 0,227 ± 0,010 | 0,157 ± 0,006 |
| | | | Rz | 2,002 ± 0,120 | 1,366 ± 0,068 |
| | | | Rt | 3,023 ± 0,437 | 1,944 ± 0,184 |
| 3 | 180 | 50 | Ra | 0,166 ± 0,021 | 0,083 ± 0,006 |
| | | | Rz | 1,464 ± 0,153 | 0,858 ± 0,129 |
| | | | Rt | 2,665 ± 0,759 | 1,095 ± 0,271 |
| 3 | 80 | 100 | Ra | 0,230 ± 0,025 | 0,205 ± 0,023 |
| | | | Rz | 1,946 ± 0,173 | 1,821 ± 0,235 |
| | | | Rt | 3,206 ± 0,318 | 2,811 ± 0,518 |
| 3 | 180 | 100 | Ra | 0,169 ± 0,036 | 0,159 ± 0,023 |
| | | | Rz | 1,783 ± 0,333 | 1,278 ± 0,249 |
| | | | Rt | 3,100 ± 1,303 | 1,915 ± 0,519 |
| 1 | 80 | 50 | Ra | 0,172 ± 0,014 | 0,130 ± 0,005 |
| | | | Rz | 1,688 ± 0,175 | 1,192 ± 0,114 |
| | | | Rt | 2,447 ± 0,379 | 1,678 ± 0,253 |
| 1 | 180 | 50 | Ra | 0,203 ± 0,018 | 0,076 ± 0,010 |
| | | | Rz | 2,054 ± 0,222 | 0,760 ± 0,151 |
| | | | Rt | 3,378 ± 0,891 | 1,446 ± 0,346 |
| 1 | 80 | 100 | Ra | 0,179 ± 0,018 | 0,201 ± 0,006 |
| | | | Rz | 1,798 ± 0,211 | 1,903 ± 0,081 |
| | | | Rt | 3,148 ± 0,574 | 2,649 ± 0,250 |
| 1 | 180 | 100 | Ra | 0,170 ± 0,032 | 0,114 ± 0,004 |
| | | | Rz | 1,680 ± 0,239 | 1,045 ± 0,081 |
| | | | Rt | 3,249 ± 0,744 | 1,680 ± 0,309 |

*Tabulka 19: Výsledné drsnosti povrchu u slitiny hliníku*

Z tabulky č. 19 lze vidět, že nejlepší drsnosti povrchu při frézování slitiny hliníku bylo dosaženo za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 180 m/min a f = 50 mm/min s použitím procesní kapaliny a nejhorší výsledku bylo dosaženo za řezných podmínek $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 180 m/min a f = 50 mm/min bez použití procesní kapaliny.

| Materiál-Nerezová ocel 1.4301 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Označení drsnosti | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | | Drsnost povrchu [µm] | Drsnost povrchu [µm] |
| 3 | 80 | 50 | Ra | 0,222 ± 0,019 | 0,176 ± 0,008 |
| | | | Rz | 1,836 ± 0,282 | 1,251 ± 0,087 |
| | | | Rt | 2,828 ± 0,755 | 1,518 ± 0,099 |
| 3 | 180 | 50 | Ra | 0,421 ± 0,059 | 0,283 ± 0,024 |
| | | | Rz | 3,195 ± 0,493 | 1,988 ± 0,097 |
| | | | Rt | 4,518 ± 1,094 | 2,364 ± 0,143 |
| 3 | 80 | 100 | Ra | 0,626 ± 0,035 | 0,270 ± 0,008 |
| | | | Rz | 4,047 ± 0,295 | 1,709 ± 0,066 |
| | | | Rt | 5,865 ± 0,688 | 2,024 ± 0,107 |
| 3 | 180 | 100 | Ra | 0,563 ± 0,060 | 0,347 ± 0,023 |
| | | | Rz | 3,978 ± 0,628 | 2,352 ± 0,225 |
| | | | Rt | 5,502 ± 0,985 | 3,507 ± 0,765 |
| 1 | 80 | 50 | Ra | 0,226 ± 0,034 | 0,186 ± 0,007 |
| | | | Rz | 1,655 ± 0,173 | 1,343 ± 0,100 |
| | | | Rt | 2,465 ± 0,421 | 1,990 ± 0,431 |
| 1 | 180 | 50 | Ra | 0,205 ± 0,027 | 0,251 ± 0,013 |
| | | | Rz | 1,654 ± 0,222 | 1,843 ± 0,169 |
| | | | Rt | 2,625 ± 0,569 | 2,678 ± 0,629 |
| 1 | 80 | 100 | Ra | 0,311 ± 0,131 | 0,257 ± 0,010 |
| | | | Rz | 1,674 ± 0,208 | 1,655 ± 0,067 |
| | | | Rt | 2,460 ± 0,673 | 1,912 ± 0,117 |
| 1 | 180 | 100 | Ra | 0,175 ± 0,030 | 0,294 ± 0,014 |
| | | | Rz | 1,231 ± 0,184 | 2,084 ± 0,105 |
| | | | Rt | 2,028 ± 0,699 | 2,672 ± 0,226 |

*Tabulka 20: Výsledné drsnosti povrchu u nerezové oceli*

Z tabulky č. 20 vyplývá, že nejlepší drsnosti povrchu při frézování nerezové oceli bylo dosaženo za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 50 mm/min s použitím procesní kapaliny a nejhorší výsledku bylo dosaženo za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 100 mm/min bez použití procesní kapaliny.

| Materiál-Epoxydová pryskyřice | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Označení drsnosti | Bez procesní kapaliny<br>Drsnost povrchu [µm] | S procesní kapalinou<br>Drsnost povrchu [µm] |
| 3 | 80 | 50 | Ra | 0,782 ± 0,591 | 0,608 ± 0,027 |
| | | | Rz | 4,511 ± 0,565 | 4,474 ± 0,314 |
| | | | Rt | 5,825 ± 0,556 | 5,825 ± 0,738 |
| 3 | 40 | 50 | Ra | 1,092 ± 0,073 | 0,869 ± 0,021 |
| | | | Rz | 7,606 ± 0,624 | 6,543 ± 0,456 |
| | | | Rt | 10,395 ± 1,289 | 8,643 ± 0,742 |
| 3 | 80 | 100 | Ra | 0,720 ± 0,596 | 0,702 ± 0,017 |
| | | | Rz | 3,523 ± 0,700 | 4,838 ± 0,213 |
| | | | Rt | 5,167 ± 0,822 | 7,128 ± 0,665 |
| 3 | 40 | 100 | Ra | 2,102 ± 0,257 | 1,085 ± 0,103 |
| | | | Rz | 15,308 ± 1,479 | 7,576 ± 0,694 |
| | | | Rt | 22,736 ± 3,180 | 10,667 ± 1,882 |
| 1 | 80 | 50 | Ra | 0,533 ± 0,066 | 0,527 ± 0,055 |
| | | | Rz | 4,117 ± 0,782 | 3,341 ± 0,330 |
| | | | Rt | 5,746 ± 1,270 | 4,266 ± 0,518 |
| 1 | 40 | 50 | Ra | 1,657 ± 0,123 | 0,634 ± 0,049 |
| | | | Rz | 16,270 ± 2,757 | 4,496 ± 0,826 |
| | | | Rt | 16,270 ± 2,757 | 7,802 ± 2,149 |
| 1 | 80 | 100 | Ra | 0,811 ± 0,021 | 0,656 ± 0,124 |
| | | | Rz | 5,542 ± 0,207 | 5,145 ± 0,302 |
| | | | Rt | 7,087 ± 0,477 | 7,060 ± 0,566 |
| 1 | 40 | 100 | Ra | 3,252 ± 0,531 | 1,225 ± 0,127 |
| | | | Rz | 20,032 ± 2,967 | 9,473 ± 1,241 |
| | | | Rt | 34,110 ± 7,617 | 15,889 ± 3,351 |

*Tabulka 21: Výsledné drsnosti povrchu u epoxydové pryskyřice*

Nejlepší drsnosti povrchu při frézování epoxydové pryskyřice bylo dosaženo za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 100 mm/min s použitím procesní kapaliny a nejhorší výsledku bylo dosaženo za řezných podmínek $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 40 m/min a f = 100 mm/min bez použití procesní kapaliny.

| Materiál-Uhlíková vlákna v EP | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Označení drsnosti | Bez procesní kapaliny<br>Drsnost povrchu [µm] | S procesní kapalinou<br>Drsnost povrchu [µm] |
| 3 | 80 | 50 | Ra | 1,244 ± 0,619 | 1,239 ± 0,136 |
| | | | Rz | 9,473 ± 3,498 | 10,356 ± 1,744 |
| | | | Rt | 15,759 ± 7,760 | 19,229 ± 4,429 |
| 3 | 40 | 50 | Ra | 1,581 ± 1,060 | 2,171 ± 1,237 |
| | | | Rz | 8,928 ± 1,901 | 14,103 ± 6,358 |
| | | | Rt | 19,350 ± 8,188 | 18,781 ± 5,968 |
| 3 | 80 | 100 | Ra | 1,906 ± 0,857 | 0,953 ± 0,062 |
| | | | Rz | 13,771 ± 6,654 | 7,598 ± 0,570 |
| | | | Rt | 25,781 ± 6,769 | 12,184 ± 2,108 |
| 3 | 40 | 100 | Ra | 0,962 ± 0,155 | 2,063 ± 1,268 |
| | | | Rz | 7,974 ± 0,477 | 11,509 ± 2,430 |
| | | | Rt | 12,655 ± 1,505 | 21,354 ± 6,603 |
| 1 | 80 | 50 | Ra | 0,750 ± 0,095 | 0,676 ± 0,078 |
| | | | Rz | 6,326 ± 0,758 | 5,192 ± 0,739 |
| | | | Rt | 9,778 ± 1,425 | 8,291 ± 2,583 |
| 1 | 40 | 50 | Ra | 0,869 ± 0,366 | 0,844 ± 0,029 |
| | | | Rz | 5,821 ± 0,797 | 6,119 ± 0,308 |
| | | | Rt | 8,328 ± 1,920 | 8,062 ± 0,644 |
| 1 | 80 | 100 | Ra | 0,952 ± 0,237 | 1,005 ± 0,127 |
| | | | Rz | 6,290 ± 1,075 | 8,147 ± 0,907 |
| | | | Rt | 9,876 ± 2,236 | 13,285 ± 2,696 |
| 1 | 40 | 100 | Ra | 1,269 ± 0,240 | 1,318 ± 0,249 |
| | | | Rz | 8,995 ± 1,721 | 10,094 ± 1,958 |
| | | | Rt | 15,907 ± 5,528 | 14,440 ± 3,334 |

*Tabulka 22: Výsledné drsnosti povrchu u epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken*

Nejlepší drsnosti povrchu při frézování epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken bylo dosaženo za řezných podmínek $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 40 m/min a f = 50 mm/min s použitím procesní kapaliny a nejhorší výsledku bylo dosaženo za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 100 mm/min bez použití procesní kapaliny.

| Materiál-Tkanina z uhlíkových vláken v EP | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Hloubka záběru [mm] | Řezná rychlost [m/min] | Posuv [mm/min] | Označení drsnosti | Bez procesní kapaliny | S procesní kapalinou |
| | | | | Drsnost povrchu [µm] | Drsnost povrchu [µm] |
| 3 | 80 | 50 | Ra | 0,886 ± 0,173 | 1,036 ± 0,215 |
| | | | Rz | 6,922 ± 1,176 | 6,480 ± 1,053 |
| | | | Rt | 10,578 ± 1,953 | 9,494 ± 1,491 |
| 3 | 40 | 50 | Ra | 0,875 ± 0,119 | 0,906 ± 0,151 |
| | | | Rz | 6,750 ± 0,953 | 6,276 ± 0,653 |
| | | | Rt | 10,496 ± 2,141 | 8,531 ± 0,702 |
| 3 | 80 | 100 | Ra | 1,355 ± 0,187 | 0,991 ± 0,120 |
| | | | Rz | 9,505 ± 0,975 | 6,655 ± 0,870 |
| | | | Rt | 13,348 ± 2,195 | 10,624 ± 2,531 |
| 3 | 40 | 100 | Ra | 1,363 ± 0,175 | 1,016 ± 0,216 |
| | | | Rz | 9,360 ± 1,331 | 7,125 ± 1,001 |
| | | | Rt | 12,793 ± 2,052 | 11,571 ± 2,325 |
| 1 | 80 | 50 | Ra | 0,889 ± 0,220 | 1,058 ± 0,173 |
| | | | Rz | 7,087 ± 0,710 | 6,502 ± 0,871 |
| | | | Rt | 10,558 ± 1,605 | 9,105 ± 1,144 |
| 1 | 40 | 50 | Ra | 0,774 ± 0,090 | 1,053 ± 0,272 |
| | | | Rz | 5,873 ± 0,383 | 7,599 ± 1,971 |
| | | | Rt | 9,017 ± 0,847 | 11,265 ± 4,078 |
| 1 | 80 | 100 | Ra | 1,419 ± 1,053 | 1,587 ± 1,311 |
| | | | Rz | 7,261 ± 1,613 | 7,082 ± 0,888 |
| | | | Rt | 11,623 ± 0,872 | 10,703 ± 1,806 |
| 1 | 40 | 100 | Ra | 1,026 ± 0,150 | 1,038 ± 0,103 |
| | | | Rz | 7,688 ± 1,172 | 6,367 ± 0,572 |
| | | | Rt | 11,111 ± 1,994 | 9,125 ± 0,924 |

*Tabulka 23: Výsledné drsnosti povrchu u epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken*

Nejlepší drsnosti povrchu při frézování epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken bylo dosaženo za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$= 40 m/min a f = 50 mm/min s použitím procesní kapaliny a nejhorší výsledku bylo dosaženo za řezných podmínek $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 100 mm/min bez použití procesní kapaliny.

# 5 DISKUZE

Hlavním cílem předkládané práce bylo zjistit opotřebení řezného nástroje při frézování kovových a kompozitních materiálů na CNC obráběcím centru v závislosti na silách, teplotách, drsnosti povrchu, rozměrové stability obráběného materiálu a celkové integrity obrobeného povrchu.

Shrnutí poznatků ohledně frézování vybraných materiálu jsou popsána v kapitole č. 2. Kapitola č. 3 se věnuje metodice experimentu tzn. podrobný postup prováděných experimentů a popis použitých laboratorních aparatur a strojního zařízení.

Realizaci experimentu se věnuje kapitola č. 4, kde jsou uvedeny tabulky s výsledky jednotlivých měření v 95 % intervalu spolehlivosti. V experimentu byly použity jako kovové vzorky ocel 1.1191 (ČSN 12 050), slitina hliníku EN AW 2030 a nerezová ocel 1.4301 (ČSN 17 240). Jako kompozitní vzorky byly použity epoxydová pryskyřice, epoxydová pryskyřice plněná prameny z uhlíkových vláken a epoxydová pryskyřice plněná tkaninou z uhlíkových vláken.

V následujících odstavcích budou porovnána jednotlivá měření mezi jednotlivými materiály a celkové vyhodnocení frézovaných vzorků.

**Řezné síly**

**Kovové vzorky**

Nejvyšších řezných sil v ose Y bylo dosahováno při frézování nerezové oceli, a to jak za použití procesní kapaliny, tak i bez ní. Nejvyšší naměřená řezná síla byla v rozmezí 779–823 N při řezných podmínkách $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 80 m/min a f = 100 mm/min bez použití procesní kapaliny. Nejvyšší řezná síla v ose Z byla naměřena také u nerezové oceli za stejných řezných podmínek jako v ose Y, a to v rozmezí 115–145 N.

Nejnižší řezné síly v ose Y byly naměřeny u slitiny hliníku v rozmezí 46-48 N za řezných podmínek $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 180 m/min a f = 50 mm/min bez použití procesní kapaliny. Nejnižší řezná síla v ose Z byla naměřena opět u slitiny hliníku za stejných řezných podmínek jako v ose Y v rozmezí 13–15 N.

**Kompozitní vzorky**

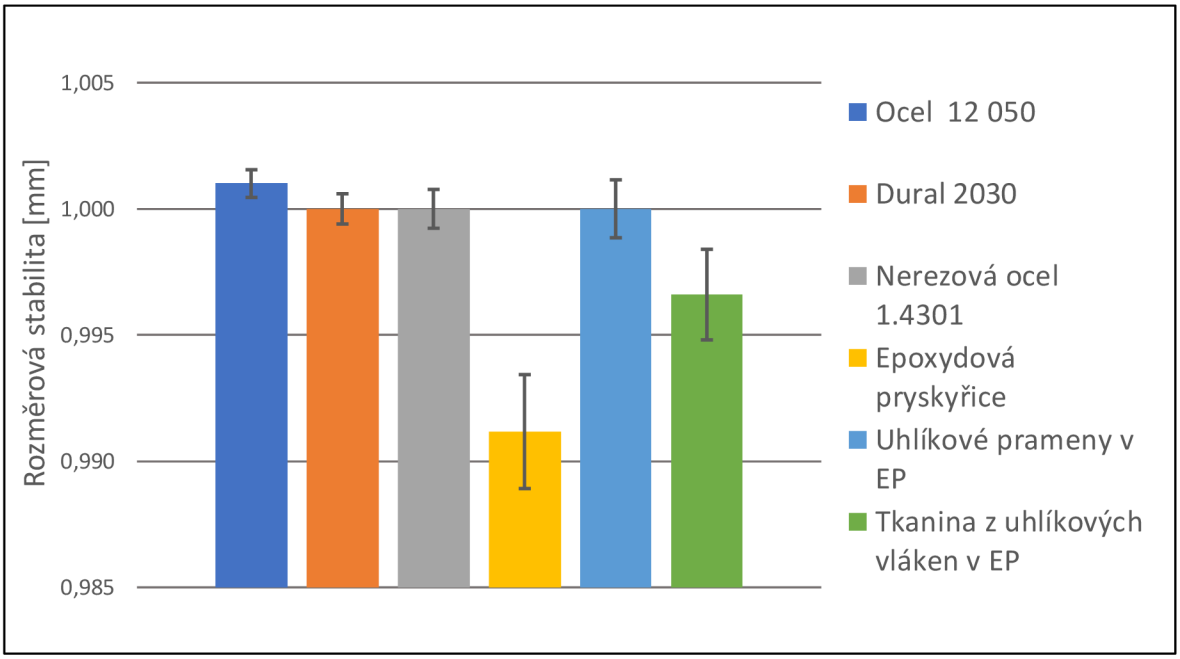
Nejvyšších řezných sil v ose Y bylo dosahováno při frézování epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken. Nejvyšší naměřená řezná síla byla v rozmezí 313–323 N při řezných podmínkách $a_p$ = 3 mm, $v_c$ = 40 m/min a f = 100 mm/min s použitím procesní kapaliny. Nejvyšší řezná síla v ose Z byla naměřena u epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken za stejných řezných podmínek jako v ose Y, ale bez použití procesní kapaliny, a to v rozmezí 68–78 N.

Nejnižší řezné síly v ose Y byly naměřeny u epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken v rozmezí 17–19 N za řezných podmínek $a_p$ = 1 mm, $v_c$ = 40 m/min a f = 50 mm/min s použitím procesní kapaliny. Nejnižší řezná síla v ose Z byla 13 N opět u epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken za stejných řezných podmínek jako v ose Y a také s použitím procesní kapaliny.

Vyšších řezných sil bylo dosahováno při frézování kovových vzorků. Největší řezné síly byly naměřeny při řezných podmínkách u kovových vzorků $v_c$ = 80 m/min, f = 100 mm/min a $v_c$ = 40 m/min, f = 100 mm/min u kompozitních, a to z důvodu největšího objemu odebrané třísky na 1 záběr. Za zvolených řezných podmínek u kovových materiálů nedocházelo k výraznějšímu snížení nebo zvýšení řezných sil při použití procesní kapaliny. Naopak u frézování kompozitních materiálů docházelo ke zvýšení řezných sil při použití procesní kapaliny. Výsledky řezných sil u epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken a epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken jsou ovlivněny při některých řezných podmínkách vytrháváním vláken z materiálu, a proto jsou výsledky někdy nekonzistentní (z důvodu vysoké heterogenity těchto materiálů).

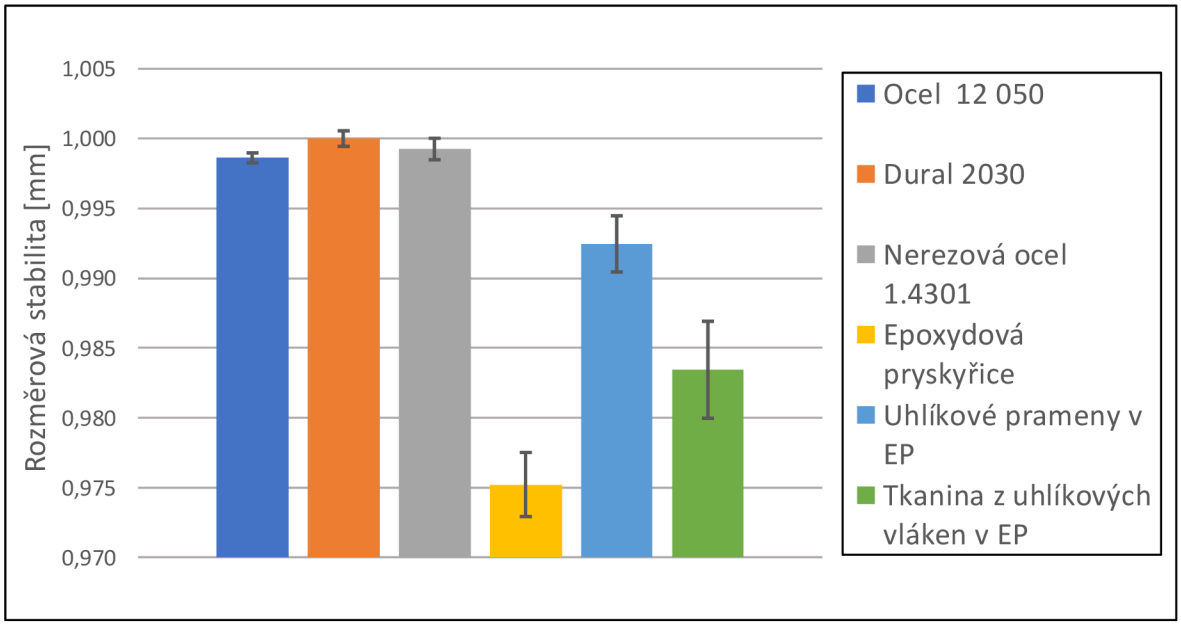
**Rozměrová přesnost**

V následujících grafech lze vidět porovnání rozměrových přesností jednotlivých materiálů za a bez použití procesní kapaliny.




*Graf 1: Rozměrová stabilita jednotlivých materiálů bez použití procesní kapaliny*

Na grafu č. 1 je patrné, že nejlepší rozměrové stability bylo dosahováno u slitiny hliníku, dále u nerezové oceli a epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken. Nejhorší výsledky byly pozorovány u neplněné epoxydové pryskyřice a epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken.



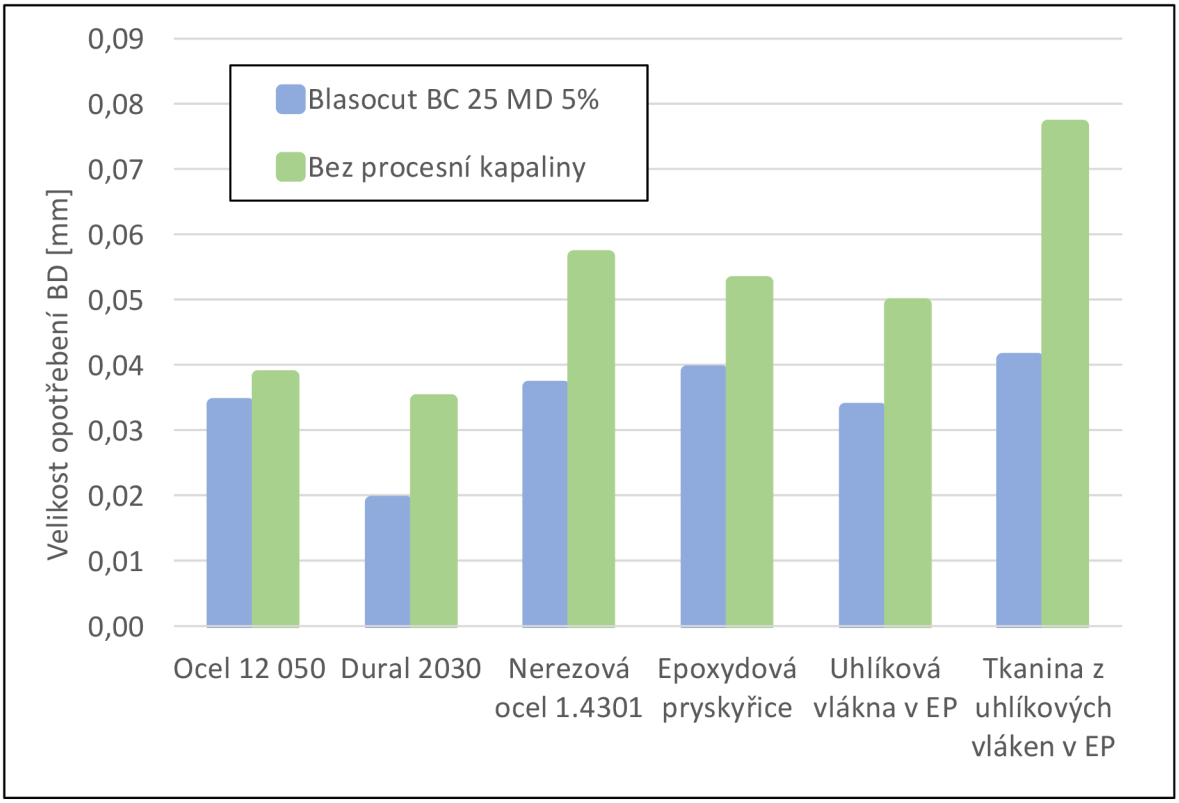

*Graf 2: Rozměrová stability jednotlivých materiálů s použitím procesní kapaliny*

Z grafu č. 2 vyplývá, že nejlepší rozměrové stability s procesní kapalinou bylo dosaženo při frézování slitiny hliníku. U kompozitních vzorků jsou výsledky poměrně nepřesné a vůbec nejhorší je výsledek u neplněné epoxydové pryskyřice jako v předchozím případě.

Všechny výsledky kromě oceli za sucha vyházejí méně než 1 tzn., že odebraná tříska je menší než strojně nastavená tříska. U kovových vzorků procesní kapalina nemá vliv na rozměrovou stabilitu. U kompozitních materiálů lze pozorovat, že výplň z uhlíkových pramenů má velice kladný vliv na rozměrovou stabilitu. Tkanina z uhlíkových vláken má také pozitivní vliv na rozměrovou stabilitu, ale dle mého názorů nedostačující. Použití procesní kapaliny u kompozitních vzorků má negativní vliv na rozměrovou stabilitu a u neplněné epoxydové pryskyřice to výsledek zhoršilo více jak dvakrát.

**Opotřebení řezného nástroje**

V grafu č. 3 je možné pozorovat výsledky opotřebení břitové destičky u jednotlivých materiálu s a bez použití procesní kapaliny.

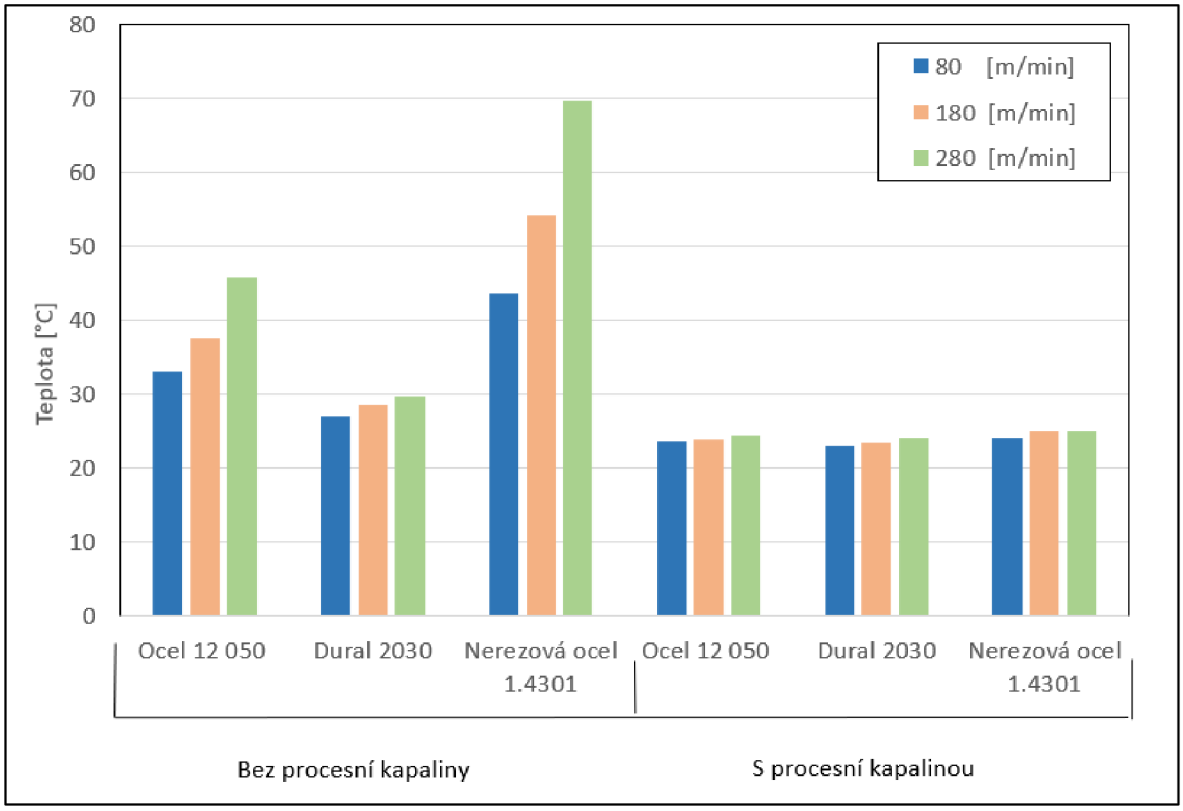



*Graf 3: Velikost opotřebení řezného nástroje u jednotlivých materiálů*

Nejnižší opotřebení bylo pozorováno u slitiny hliníku, i přestože použitý nástroj není nejvhodnější pro obrábění slitiny hliníku. Důvodem je, že se jedná o automatový materiál. Nejvyšší opotřebení lze vidět u nerezové oceli a epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken bez použití procesní kapaliny. Důvodem vysokého opotřebení u epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken je, že tento nástroj je nevhodný pro frézování tohoto materiálu a zároveň tento materiál je špatně obrobitelný a má poměrně vysoké mechanické vlastnosti. Procesní kapalina má velice kladný vliv na opotřebení řezného nástroje.

**Teploty při frézování**

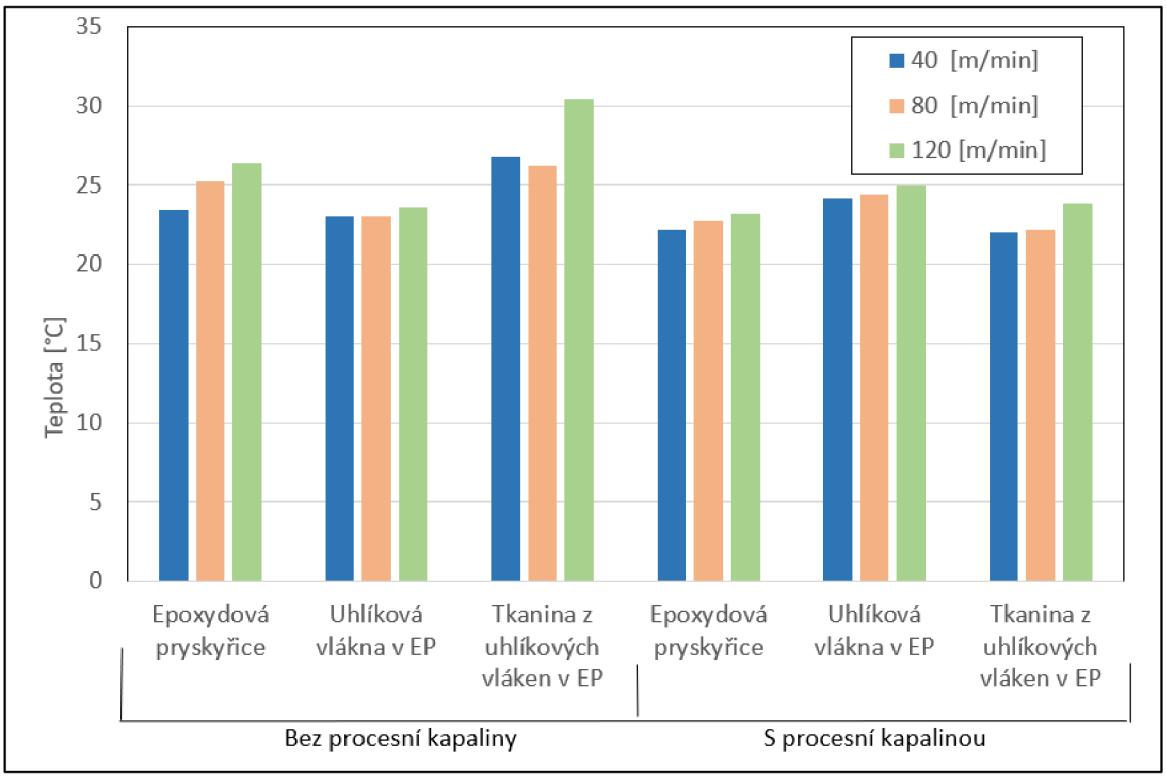
V grafu č. 4 a 5 jsou zobrazeny termodynamické teploty u kovových a kompozitních materiálů za různých řezných rychlostí, které jsou uvedeny v legendě grafu.




*Graf 4: Termodynamická teplota u kovových vzorků*

Z grafu vyplývá, že u kovových vzorků bez použití procesní kapaliny vzrůstá teplota při frézování. Tento jev je způsoben vyššími řeznými odpory proti střihu materiálu, vyšší tepelnou vodivostí materiálu a vyšší tepelnou vodivostí mezí materiálem a termočlánkem. Dále je možné pozorovat vzrůstání teploty při zvyšování

řezné rychlosti. Tento jev by mohl zapříčiněn tím, že vzniká více malých třísek a ty se poté mixují v prostoru odebírání třísky. Dalším důvodem by mohla být vyšší dynamičnost frézování.




*Graf 5: Termodynamická teplota u kompozitních vzorků*

Z grafu lze pozorovat, že teploty u kompozitních materiálů se téměř oproti laboratorní teplotě nemění. Pouze u epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken se teplota dostala nad 30 °C. Opět lze pozorovat tendenci růstu teploty s rostoucí řeznou rychlostí. Nízká teplota je nejspíše způsobena velice nízkou tepelnou vodivostí materiálu a nízkou tepelnou vodivostí lepeného spoje mezi materiálem a termočlánkem.

U frézování kovových i kompozitních vzorků lze pozorovat velice kladný vliv procesní kapaliny na teplotu při frézování.

### Měření drsnosti povrchu materiálu

#### Kovové vzorky

Nejlepších parametry drsnosti *Ra, Rz* a *Rt* bylo dosahováno při frézování slitiny hliníku za všech řezných podmínek. U nerezové oceli, až na některé řezné podmínky, byl výsledek taktéž velice pozitivní. U oceli je patrné, že vhodný výběr řezných podmínek má zásadní vliv na kvalitu obrobené plochy. Oproti slitině hliníku a nerezové oceli lze považovat výsledek za nepřívětivý až na některé řezné podmínky. Dále lze pozorovat, že procesní kapalina má velice kladný vliv na drsnost povrchu.

#### Kompozitní vzorky

U kompozitních vzorků lze porovnat velké výkyvy výsledků, hlavně u parametru *Rz* a *Rt.* Výsledky *Ra* by se mohly zdát, že jsou velice dobré, ale v případě tohoto měření jsou zavádějící z důvodu, že necharakterizují skutečný stav povrchu, ale pouze jeho průměr. Je důležité, aby všechny parametry *Ra, Rz* a *Rt* měly přívětivé hodnoty, a ne pouze některé z nich. Zajímavé je, že nejlepší i nejhorší výsledek byl pozorován u neplněné epoxydové pryskyřice. Dále u epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken lze vidět nejvíce konzistentní výsledky, a to za všech řezných podmínek.

Kompozitní vzorky oproti kovovým mají cca 2 – 5x horší výsledky drsnosti povrchu a největší vliv na drsnost povrchu má vhodný výběr řezných podmínek.

# 6 ZÁVĚR

Hlavním cílem předkládané diplomové práce bylo zjistit opotřebení řezného nástroje při frézování kovových a kompozitních materiálů na CNC obráběcím centru v závislosti na silách, teplotách, drsnosti povrchu, rozměrové stability obráběného materiálu a celkové integrity obrobeného povrchu.

První část diplomové práce popisuje problematiku frézování a informace ohledně obrobitelnosti vybraných kovových a kompozitních materiálů. Další část se věnuje detailnímu popisu provedení experimentu, strojního zařízení laboratoře třískového obrábění a měřicí aparatury. Ve čtvrté části je možné nahlédnout na tabulky s výsledky, které byly statisticky vyhodnoceny pomocí studentova t rozdělení v programu Excel, který je přílohou této práce. Diskuze byla věnována porovnávání materiálů mezi sebou při jednotlivých měření za daných řezných podmínek a možného zdůvodnění těchto výsledků.

Ze silového vyhodnocení vyplývá, že na velikost řezné síly má vliv pouze objem střiženého / odebraného materiálu na jednu třísku za podmínky, že dochází k dobrému úběru materiálu tzn. vhodné tvarování třísky při úběru, a to nelze změnit použitím procesní kapaliny.

Rozměrová stabilita kovových vzorků se pohybovala ve velice dobrých hodnotách, proto jsou tyto materiály vhodné k výrobě přesných výrobků. Kompozitní vzorky dosahovaly značně horších hodnot rozměrové stability, ale správnou výplní těchto materiálu je podle mého názoru možné dosáhnout dobrých výsledků. Neplněnou epoxydovou pryskyřici bych nedoporučoval používat jako konstrukční materiál pro přesné obrábění.

Opotřebení břitové destičky vycházelo dle předpokladů tzn. nejvyšší opotřebení bylo u nerezové oceli a epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken z důvodů vysokých mechanických vlastností. Z důvodu hospodárnosti výroby doporučuji využití procesní kapaliny pro frézování kovových vzorků. U kompozitních vzorků je nutno posoudit požadované výsledky výrobku a dle toho se musí technolog

výroby rozhodnout, jelikož procesní kapaliny mají sice pozitivní vliv na opotřebení nástroje, ale u ostatních parametrů už tomu tak není.

Výsledkem měření termodynamické teploty je, že řezná rychlost je přímo úměrná zvyšování teploty. V případě tohoto měření se potvrdilo, že procesní kapalina má opět velice pozitivní vliv na snížení teploty při obrábění, a proto doporučuji minimálně pro hrubování u kovových materiálů využití procesního média. U kompozitních vzorků je opět nutné, aby rozhodl technolog pro konkrétní případy.

U měření drsnosti povrchu je důležitým faktorem homogenita materiálu. Ve většině případů se u kovových vzorků výsledky pohybovaly v přijatelných hodnotách. Kompozitní vzorky jsou více závislé na správném výběru řezných podmínek a poté se dá také dosáhnout přívětivých výsledků, přičemž povrch materiálu nikdy nebude lesklý jako při odlití. Silná heterogenita kompozitních materiálů způsobuje vyšší hodnoty *Rz* a *Rt*. Využití procesního média u kovových vzorků zlepšuje výslednou drsnost povrchu, kdežto u kompozitních materiálů nelze říci, zda došlo ke zlepšení či zhoršení.

Jako technolog obrábění bych doporučil využití procesního média u většiny operací. Největší vliv na kvalitu výrobku má přesnost stroje s kombinací dobré obsluhy nebo dobrého technologa výroby. Třískové obrábění se obvykle využívá v kusové výrobě, a proto je třeba ke každému výrobku a každé operaci přistupovat jednotlivě a dle toho je nutné volit správné řezné parametry a postup operací. Dále bych doporučil řídit se doporučeními výrobců řezných nástrojů a používat spolehlivé nástroje. Třískové obrábění se používá stovky let, ale s příchodem moderních materiálů, které se často vyznačují vysokou heterogenitou, je stále potřeba se přizpůsobovat a objevovat nové metody obrábění.

# SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obrázek 1: Čelní frézován [2] ..... 15
Obrázek 2: Obvodové frézování [2] ..... 15
Obrázek 3: Sousledné frézování [2] ..... 16
Obrázek 4: Nesousledné frézování [2] ..... 17
Obrázek 5: Geometrie odebíraného materiálu [1] ..... 18
Obrázek 6: Rozklad sil při frézování [1] ..... 20
Obrázek 7: Vybrané nástroje pro obrábění kompozitních materiálů [6–9] ..... 23
Obrázek 8: Čelní fréza pro frézování velkých ploch [8] ..... 24
Obrázek 9: Natočení vláken kompozitu proti břitu nástroje [6] ..... 24
Obrázek 10: Monolitní frézy na obrábění konstrukční oceli [18] ..... 27
Obrázek 11:Stopková fréza s leštěnými břitovými destičkami pro obrábění slitin hliníku [16] ..... 28
Obrázek 12: Monolitní fréza k dokončovacím operacím pro frézování slitin hliníku [18] ..... 29
Obrázek 13: Nástroje pro frézování nerezové oceli [8, 20] ..... 30
Obrázek 14: Epoxidová pryskyřice a tvrdidlo ..... 33
Obrázek 15: Forma pro výrobu kompozitních vzorků ..... 33
Obrázek 16: Odlitky kompozitních materiálů ..... 34
Obrázek 17: Pásová pila ..... 34
Obrázek 18: Řezání vzorků ..... 35
Obrázek 19: Frézovací centrum DMG MORI CMX V ..... 36
Obrázek 20: Použité břitové destičky ..... 37
Obrázek 21: Geometrie břitové destičky [19] ..... 37
Obrázek 22: Nástroj pro přípravu vzorků ..... 38
Obrázek 23: Nástroj pro provedení experimentu ..... 38
Obrázek 24: Detail nástroje pro experiment ..... 38
Obrázek 25: Piezoelektrický dynamometr se strojním svěrákem ..... 39
Obrázek 26: Nábojový zesilovač ..... 40
Obrázek 27: Ukázka grafického výstupu z programu LabView ..... 40
Obrázek 28: Termočlánek typu K ..... 41
Obrázek 29: Řídící jednotka pro měření termodynamické teploty ..... 42

Obrázek 30: Profilometr ..... 42
Obrázek 31: Detail hrotu profilometru ..... 43
Obrázek 32:Mikroskop ZEISS ..... 44
Obrázek 33: Detail pohledu v mikroskopu ..... 44

# SEZNAM GRAFŮ:

Graf 1: Rozměrová stabilita jednotlivých materiálů bez použití procesní kapaliny 63
Graf 2: Rozměrová stability jednotlivých materiálů s použitím procesní kapaliny 63
Graf 3: Velikost opotřebení řezného nástroje u jednotlivých materiálů ..... 64
Graf 4: Termodynamická teplota u kovových vzorků ..... 65
Graf 5: Termodynamická teplota u kompozitních vzorků ..... 66

# SEZNAM TABULEK:

Tabulka 1: Parametry CNC frézy ..... 35
Tabulka 2:Vstupní hodnoty pro výpočet dráhy nástroje ..... 45
Tabulka 3: Výsledky řezných sil v ose Y u oceli ..... 46
Tabulka 4: Výsledky řezných sil v ose Y u slitiny hliníku ..... 47
Tabulka 5: Výsledky řezných sil v ose Y u nerezové oceli ..... 47
Tabulka 6: Výsledky řezných sil v ose Y u epoxydové pryskyřice ..... 48
Tabulka 7: Výsledky řezných sil v ose Y u epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken ..... 48
Tabulka 8: Výsledky řezných sil v ose Y u epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken ..... 49
Tabulka 9: Výsledky řezných sil v ose Z u oceli ..... 49
Tabulka 10: Výsledky řezných sil v ose Z u slitiny hliníku ..... 50
Tabulka 11: Výsledky řezných sil v ose Z u nerezové oceli ..... 50
Tabulka 12: Výsledky řezných sil v ose Z u epoxydové pryskyřice ..... 51
Tabulka 13: Výsledky řezných sil v ose Z u epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken ..... 51
Tabulka 14: Výsledky řezných sil v ose Z u epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken ..... 52
Tabulka 15: Výsledky rozměrové stability ..... 52
Tabulka 16: Opotřebení břitové destičky u jednotlivých materiálů ..... 53
Tabulka 17:Výsledné termodynamické teploty u jednotlivých materiálů ..... 54
Tabulka 18: Výsledné drsnosti povrchu u oceli ..... 55
Tabulka 19: Výsledné drsnosti povrchu u slitiny hliníku ..... 56
Tabulka 20: Výsledné drsnosti povrchu u nerezové oceli ..... 57
Tabulka 21: Výsledné drsnosti povrchu u epoxydové pryskyřice ..... 58
Tabulka 22: Výsledné drsnosti povrchu u epoxydové pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken ..... 59
Tabulka 23: Výsledné drsnosti povrchu u epoxydové pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken ..... 60

# SEZNAM LITERATURY


[1] ELUC. *Základní způsoby frézování* [online]. [vid. 2021-05-03]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1226

[2] JERSÁK, Jan. *Základní konvenční technologie obrábění - frézování* [online]. 2012 [vid. 2021-05-12]. Dostupné z: www.kvs.tul.cz/EduCom/Tentoprojektjefinancovánevropským sociálním fondem a státním rozpočtem ČR

[3] HOZA, Jiří. *Obrobitelnost materiálů (oceli třídy 11 - 19)* [online]. 1994 [vid. 2020-12-31]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/etr_technologicke_procesy/ETR_cviceni_03/Tabulky_obrobitelnosti.pdf

[4] MAŠEK, Petr. *Frézování kompozitních materiálů s termoplastickou matricí* [online]. B.m., 2019 [vid. 2020-12-14]. ČVUT. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82082/F2-D-2019-Masek-Petr-priloha-Teze_Masek.pdf?sequence=-1&isAllowed=y

[5] DANDEKAR, Chinmaya R. a Yung C. SHIN. *Modeling of machining of composite materials: A review* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 2012. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2012.01.006

[6] SECO. *JC899: Kompozity - ostrý roh - 4 zuby | Secotools.com* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/m_8756

[7] SECO. *DIACC: Rohové provedení - kompozity - 3-7 zubů | Secotools.com* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/m_7670

[8] SANDVIK COROMANT. *Speciální konstrukčně přizpůsobené stopkové frézyd Engineered end mills* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/advanced-engineered-end-mills.aspx

[9] HUFSCHMIED. *Graphit fräsen: Fräswerkzeuge für Graphitelektroden mie* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: https://www.hufschmied-tools.com/de/hufschmied-produkte/graphit-fraesen/

[10] TETI, R. Machining of composite materials. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 2002, **51**(2), 611–634. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)61703-X

[11] SEDLÁČEK, Jan. *Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů* [online]. B.m., 2010 [vid. 2020-12-15]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: http://dspace.lib.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/18346

[12] AHMAD, Jamal. *Machining of Polymer Composites* [online]. B.m.: Springer US, 2009. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-68619-6_1

[13] BELHÁČ, Jakub. *Srovnání vybraných mechanických vlastností slitin hliníku a konstrukčních ocelí* [online]. Brno, 2009 [vid. 2021-05-03]. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://core.ac.uk/download/pdf/30290926.pdf

[14] VLK, Šimon. *Obrábění hliníkové slitiny* [online]. Ostrava, 2015 [vid. 2021-05-03]. Technická univerzita Ostrava. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/109560/VLK0014_FS_N2301_2303T002_20_2015.pdf?sequence=1

[15] IMC SLOVAKIA. *Vlastnosti a normy slitin* [online]. 2020 [vid. 2021-05-03]. Dostupné z: http://www.hlinikbronz.cz/vlastnosti-a-normy-slitin/

[16] SECO. *Kopírovací frézy pro hliník – 2 řezné hrany, jednostranné destičky | Secotools.com* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/20877

[17] JANDA, Zdeněk. *Studie problematiky frézování feriticko-martenzitické oceli P91* [online]. B.m., 2012 [vid. 2020-12-31]. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/5395

[18] GRUMANT. *Nástroje pro frézování, frézy pro obrábění kovů - GRUMANT* [online]. [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: https://www.grumant.cz/produkty/nastroje-pro-obrabeni/frezovani

[19] NAKO. *Vyměnitelná břitová destička, PRAMET, TNGX 100404SR-F:M6330 | Nako katalog* [online]. [vid. 2021-05-12]. Dostupné z: http://katalog.nako-mb.cz/detail.php?id=101105

[20] GUHRING. *NEW LEVEL MILLING TOOLS* [online]. nedatováno [vid. 2021-05-26]. Dostupné z: https://guehring.com/wp-content/uploads/2018/dokumente/EN/milling-cutters/Katalog_Fraeswerkzeuge_EN_2017_lowres.pdf