



## **Bakalářská práce**

# **Prvotní studie opotřebení nástrojů při frézování kompozitů plněných skelnými vlákny**

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**Tadeáš Frýda**

*Vedoucí práce:*

Ing. Tomáš Knápek

Katedra obrábění a montáže

Liberec 2023



## Zadání bakalářské práce

# Prvotní studie opotřebení nástrojů při frézování kompozitů plněných skelnými vlákny

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Tadeáš Frýda</b>
<i>Osobní číslo:</i>	S22000300
<i>Studijní program:</i>	B0715A270008 Strojírenství
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra obrábění a montáže
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

### Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí poznatků o kompozitních materiálech plněných vláknovou výztuhou (zaměření na plnivo ze skelných vláken). Shrnutí poznatků o obrábění těchto materiálů. Shrnutí poznatků o technologii frézování
2. Volba vhodných nástrojů a řezných podmínek pro frézování kompozitů plněných skelnými vlákny.
3. Návrh metodiky experimentů: volba nástroje, volba řezných podmínek, metodika měření opotřebení nástroje, sil (popř. teploty), drnosti povrchu obrobku a zkoumání delaminace obrobku.
4. Realizace experimentů a vyhodnocení výsledků prováděných měření v rámci opotřebení nástroje, drnosti povrchu obrobku, řezných sil a teplot a vzniklé delaminace.
5. Shrnutí, zhodnocení výsledků a vyvození závěrů.

*Rozsah grafických prací:*

*Rozsah pracovní zprávy:*

*Forma zpracování práce:*

*Jazyk práce:*

tištěná/elektronická

Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

1. EHRENSTEIN, G. W. Polymerní kompozitní materiály, v ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
2. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. Jakost obráběných povrchů. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80-7044-539-4.
3. AHMAD, J. Machining of polymer composites. Boston, MA: Springer US, 2009. ISBN 978-0-387-68619-6.
4. KOČMAN, K., PROKOP, K. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
5. LIDAŘÍK, M. a kol. Epoxidové pryskyřice. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1983. 732 s.

*Vedoucí práce:*

Ing. Tomáš Knápek

Katedra obrábění a montáže

*Datum zadání práce:*

2. října 2022

*Předpokládaný termín odevzdání:* 2. dubna 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
děkan

doc. Ing. et Ing. Štěpánka  
Dvořáčková, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

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

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

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

Užiji-li bakalářskou 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 bakalářská 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.



## Anotace

Náplní této bakalářské práce je prvotní studie opotřebení nástrojů při frézování kompozitů plněných skleněnými vlákny.

Teoretická část bakalářské práce shrnuje aktuálního poznání v oblasti související se zadáním bakalářské práce. Jmenovitě se bude jednat o frézování, základní rozdělení a vlastnosti kompozitních materiálů a podrobnější popis kompozitních materiálů plněných skleněnými vlákny. Dále bude provedena teoretická rešerše na téma obrábění kompozitních materiálů. Důležitým teoretickým bodem budou i metody používané k vyhodnocování daných operací.

V praktické části práce bude stanovena metodika, která bude použita k provedení experimentu a jeho následnému vyhodnocení. Takto získané parametry budou následně zpracovány do přehledné podoby a na jejich základě proběhne diskuse a bude stanoven závěr.

Tato práce si klade za cíl na podkladu teoretické rešerše navrhnout experiment, na jehož základě bude moci proběhnout posouzení v něm použitých nástrojů z několika různých hledisek.

**Klíčová slova:** Kompozitní materiály, obrábění kompozitních materiálů, skleněná vlákna, řezné podmínky, GFRP

## Annotation

The aim of this bachelor thesis is a primary study of tool wear during milling of GFRP.

The theoretical part summarizes current knowledge of milling in terms of assignment of the bachelor thesis. Particularly it deals with milling, basic dividing, characteristics of GFRP and a detailed description of GFRP. Furthermore, there will be a research of milling of GFRP. The other essential theoretical part will be methods used for evaluating and measuring the milling process.

The practical part will define methodology, which will be used for an experiment and its following evaluation. All gathered data will be presented in an understandable form which will become basis for further discussion. The final part will state a conclusion.

This bachelor thesis aims to make an experiment on the basis of the theoretical research. Thus, it will be possible to evaluate tool wear from different perspectives.

**Key words:** Composite materials, machining of GFRP, glass fibres, cutting conditions

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Tomáši Knápkovi za odborné vedení, cenné rady a čas, který mi věnoval. Moje poděkování také patří panu Bc. Martinu Váňovi za jeho odborné rady a pomoc, kterou mi poskytl při provádění experimentu. Též bych rád poděkoval své rodině za vytrvalou podporu při studiu.

# Obsah

1	Úvod .....	11
2	Teoretická část .....	12
2.1	Frézování.....	12
2.1.1	Řezné podmínky.....	13
2.1.2	Způsoby měření řezných sil.....	14
2.1.3	Mechanismus poškození nástroje .....	15
2.1.4	Průběh opotřebení nástroje .....	17
2.1.5	Drsnost obrobeného povrchu .....	17
2.2	Kompozitní materiály .....	20
2.2.1	Matrice .....	21
2.2.2	Typy plastových matic .....	21
2.2.3	Disperse.....	22
2.2.4	Skleněná vlákna .....	23
2.3	Obrábění kompozitních materiálů .....	24
2.3.1	Materiály nástrojů .....	25
2.3.2	Typy nástrojů .....	26
2.3.3	Delaminace.....	28
2.3.4	Řezné podmínky pro kompozitní materiály .....	29
3	Metodika experimentů .....	31
3.1	Obráběný materiál.....	31
3.2	Použitý obráběcí stroj.....	32
3.3	Nástroje .....	33
3.4	Řezné podmínky a strategie obrábění .....	34
3.4.1	Délky řezných drah .....	37
3.5	Měřené a vyhodnocované parametry.....	38
3.5.1	Měření řezných sil .....	38
3.5.2	Měření drsností obrobených povrchů .....	40

3.5.3	Měření opotřebení nástrojů .....	40
4	Realizace experimentu .....	42
4.1	Řezné síly .....	42
4.1.1	Řezné síly na nástroji TrimCut F6130 .....	42
4.1.2	Řezné síly na nástroji Razor F6120 .....	43
4.1.3	Grafy naměřených sil.....	44
4.2	Drsnosti na obrobeném povrchu .....	46
4.2.1	Drsnost povrchu obrobeným nástrojem TrimCut F6130 .....	47
4.2.2	Drsnosti povrchu obrobeným nástrojem Razor F6120 .....	48
4.2.3	Grafy průběhů drsností povrchů.....	49
4.3	Opotřebení nástrojů.....	51
4.4	Delaminace.....	53
5	Diskuse.....	55
6	Závěr.....	59
7	Seznam použitých zdrojů .....	61

## Seznam použitých zkratk a symbolů

CMC		Ceramic matrix composites
DLC		Diamond like carbon
GFRP		Glass fiber reinforced polymers
MMC		Metal matrix composites
PCD		Polycrystalline diamond
PMC		Plastic matrix composites
$a_p$	[mm]	Hloubka záběru
$f_o$	[mm]	Posuv na otáčku
$f_z$	[mm]	Posuv na zub
$n$	[-]	Počet otáček v záběru
$o$	[mm]	Délka opásané části
$s$	[mm]	Řezná dráha břitu pro N průjezdů
$s_1$	[mm]	Řezná dráha břitu pro jeden průjezd
$v_c$	[m/min]	Řezná rychlost
$v_f$	[mm/min]	Posuvová rychlost
$z$	[-]	Počet zubů nástroje
$D_1$	[-]	Průměr řezné části nástroje
$D_2$	[-]	Průměr upínací části nástroje
$F_x$	[N]	Síla ve směru posuvu
$F_y$	[N]	Síla ve směru přísuvu
$F_z$	[N]	Řezná síla
$P_{ef}$	[W]	Efektivní výkon
$L_1$	[mm]	Délka řezné části nástroje

L2	[mm]	Délka celého nástroje
Ra	[ $\mu\text{m}$ ]	Střední aritmetická odchylka drsností
Rmr	[ $\mu\text{m}$ ]	Materiálový poměr
Rt	[ $\mu\text{m}$ ]	Největší rozdíl výšek na profilu
Rz	[ $\mu\text{m}$ ]	Průměrná hodnota hloubky z pěti úseků měření
$\beta$	[°]	Úhel opásání nástroje
$\pi$	[-]	Ludolfovo číslo

# 1 Úvod

Kompozity jsou bezesporu velmi zajímavým a z technického hlediska perspektivním materiálem. Zejména pro některé specifické kombinace vlastností, které jiné materiály nemají, a ani mít nemohou. Kompozitních materiálů existuje velké množství, které je možné dělit podle celé řady vlastností na různé kategorie. Pro účely této práce bude kladen důraz pouze na specifickou kategorii, totiž na kompozitní materiály s matricí v podobě epoxidové pryskyřice a výztuhou v podobě skleněných vláken. Tyto materiály také běžně označujeme zkratkou GFRP (**G**lass **F**iber **R**einforced **P**olymers).

Tento materiál se vyznačuje celou řadou specifických vlastností, jako je například výhodný poměr malé měrné hustoty ku vysoké pevnosti, odolnost proti vnějším vlivům a vysoká lomová houževnatost.

Z tohoto důvodu nacházejí GFRP využití v celé řadě různých aplikací a oborů. Historicky se tyto kompozitní materiály využívaly zejména v leteckém a vojenském průmyslu. Nicméně dnes jsou využívány v širokém spektru průmyslových aplikací. Zejména se jedná o automobilový a stavební průmysl.

Kompozitní materiály mají celou řadu vysoce ceněných vlastností, které získávají díky unikátní a netradiční vnitřní struktuře. Ta je odlišná od většiny materiálů běžně používaných v technické praxi. Ale zároveň je jejich vnitřní struktura, vedle již zmíněných pozitivních vlastností, příčinou i vlastností negativních. Jedena z těchto negativních vlastností je obtížná obrobiteľnosť kompozitních materiálů.

Vzhledem k rozšíření GFRP v průmyslu je potřeba provádět nezbytné obráběcí operace efektivně a kvalitně, aby nedocházelo k znehodnocování materiálu zbytečným plýtváním.

Cílem této práce je zjištění stavu současného poznání o obrábění kompozitních materiálů a následně navržení metodiky pro experiment, který blíže určí hodnoty opotřebení použitých nástrojů a případně dokáže vyhodnotit obráběcí proces i z hlediska jiných parametrů.

Bakalářská práce se skládá ze tří částí – teoretické, experimentální a závěrečné.

V rámci teoretické části budou shrnuty poznatky o frézování, kompozitních materiálech, obrábění kompozitních materiálů a metod k vyhodnocování obrábění z různých hledisek. Dále bude podle teorie stanovena metodika experimentu.

Experimentální část bude obsahovat naměřené a zpracované hodnoty, grafy a vzájemné porovnání.

V závěru proběhne zhodnocení a porovnání všech teoretických a praktických poznatků v rámci této bakalářské práce.

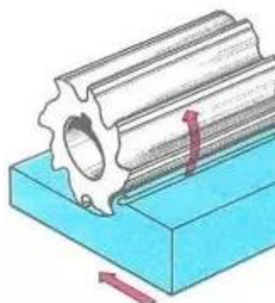
## 2 Teoretická část

V teoretické části budou zpracovány současné informace a poznatky z oblastí technologie třískového obrábění a kompozitních materiálů. Konkrétně bude důraz kladen na obrábění kompozitních materiálů vyztuženými skelnými vlákny. Cílem bude shrnutí poznatků této problematiky do ucelené podoby, ze které bude vycházet volba konkrétních nástrojů a řezných podmínek pro experimentální část.

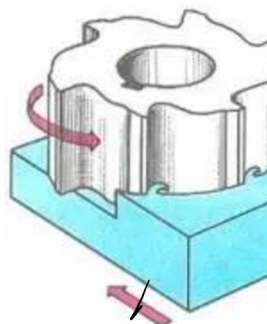
### 2.1 Frézování

Frézování se řadí mezi technologické procesy třískového obrábění, kdy dochází k úběru materiálu břity nástroje, které jsou zasazeny do nástroje rotujícího kolem své osy. Hlavní řezný pohyb je rotační a je vždy vykonáván nástrojem. Vedlejší pohyby vykonává buď obrobek nebo nástroj, záleží na konkrétním uspořádání obráběcího stroje. Vedlejší řezné pohyby jsou nejčastěji lineární, ale mohou být i vedeny po obecných křivkách. Toho lze využít k obrábění obecných tvarů a kontur. Hlavní i vedlejší řezný pohyb jsou vykonávány současně, kdy se jednotlivé řezné klíny přerušované zařezávají do materiálu a tím vznikají třísky nekonstantní tloušťky. [1] [2]

Z pohledu kinematiky obrábění má smysl rozdělit technologii frézování do několika kategorií. Podle vzájemné pozice nástroje a obrobku lze rozlišit frézování čelní a frézování obvodové viz. obr. 1 a 2.



[Obr. 1] - Princip obvodového frézování [2]



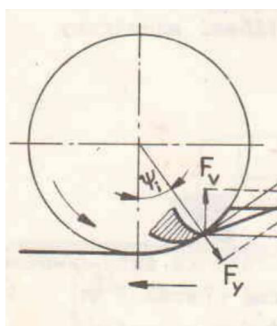
[Obr. 2] - Princip čelního frézování [2]

Další rozdělení lze provést na základě relativních pohybů nástroje a obrobku vůči sobě navzájem, kdy se rozeznává frézování sousledné a nesousledné.

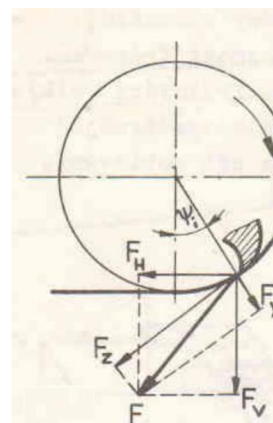
Při *nesousledném obrábění* (viz obr. 3) je smysl rotace nástroje protichůdný směru posuvu obrobku. Tříška se začíná tvořit v momentě vniknutí břitu do materiálu a postupně roste na své tloušťce, dokud nedojde k jejímu oddělení vyvolaným skluzem zubu po materiálu obrobku. Síly při tomto stylu frézování působí směrem vzhůru a mají tendenci k odtahování obrobku z upnutí. Právě tyto síly mají pak za následek zvýšené opotřebení řezných břitů a mohou zapříčinit zvlnění obráběného povrchu. Vzhledem k charakteristice obrábění nemá znečištění povrchu obrobku (okuje, nerovnosti, ...) vliv na životnost nástroje. [3]



Při *sousledném frézování* (viz obr.4) je smysl rotace nástroje shodný se směrem pohybu obrobku. Tříska je nejtlustší v místě vniknutí zubu do materiálu. Obecně lze říct, že sousledné obrábění má spoustu užitečných vlastností jako například: zvýšení trvanlivosti břitů, což umožňuje obrábět za vyšších řezných rychlostí. Výslednice řezné síly působí směrem dolů, což vyústí k přitlačení obrobku ke stolu a tím se zjednodušuje upínání. Navíc dochází k redukci chvění a celkovému zlepšení kvality obrobenej plochy a celkově potřebný řezný výkon je menší než u sousledného obrábění.[1] [3]



[Obr. 3] Nesousledné frézování [3]



[Obr. 4] - Sousledné frézování [3]

### 2.1.1 Řezné podmínky

Pro technologii frézování lze definovat dvě hlavní řezné podmínky, které vychází přímo z podstaty hlavního a vedlejšího řezného pohybu.

Řezná rychlost je veličina měřená na vnějším obvodu rotující frézy. Značí se  $v_c$  a je dána vztahem:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m \cdot \text{min}^{-1}]$$

Kde značí:        D průměr frézy [mm]  
                       n otáčky frézy [ $\text{min}^{-1}$ ]

Rychlost, kterou se pohybuje stůl s obrobkem vůči nástroji, se označuje za rychlost posuvu  $v_f$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]. Z rychlosti posuvu a velikosti otáček vřetene lze určit velikost posuvu připadajícího na jednu otáčku vřetena.

$$f_0 = \frac{v_f}{n} [mm]$$

Kde značí:         $v_f$  rychlost posuvu [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]  
                       n otáčky frézy [ $\text{min}^{-1}$ ]

Posuv za jednu otáčku nástroje  $f_0$  je hodnota, kterou urazí stůl s obrobkem během jedné otáčky nástroje. Z této hodnoty vydělením počtem zubů nástroje lze určit velikost posuvu na zub  $f_z$

$$f_z = \frac{f_0}{z} [mm]$$

Hodnoty řezných podmínek jsou odlišné pro různé řezné operace, požadované kvality obrobených ploch, použitých nástrojů a obráběných materiálů.

Mezi další důležité řezné podmínky náleží hloubka záběru nástroje  $a_p$ . Jedná se o rozdíl mezi obrobenou a neobrobenou plochu. Její velikost je do velké míry závislá na celkové tuhosti soustavy stroj – obrobek – nástroj a výkonu obráběcího stroje.

### 2.1.2 Způsoby měření řezných sil

Existují dva základní přístupy k určování řezných sil při frézování.

1. Nepřímé měření sil
2. Přímé měření sil

#### Nepřímé měření řezných sil

Při nepřímé metodě se sleduje příkon nebo kroutící moment na vřetení obráběcího stroje a ze znalosti tohoto údaje jsme schopni řeznou sílu dopočítat. [4]

Efektivní výkon lze zjistit rozdíl výkonu stroje naprázdno a při zatížení. A při zanedbání rychlosti posuvu a přísuvu lze použít vztah pro určení řezné síly z efektivního výkonu:

$$F_c = \frac{P_{ef}}{v_c} [N]$$

Kde značí:  $P_{ef}$  efektivní výkon [W]  
 $v_c$  řezná rychlost [ $s^{-1}$ ]

Nevýhodou nepřímých měření je, že je obvykle možné stanovit pouze jednu složku sil, protože pro zjednodušení výpočtu se obvykle ostatní zanedbávají. Výhodou je, že se jedná o jednoduchou metodu, které nepotřebuje drahé a složité vybavení.

#### Přímé měření síly

Základem metody nepřímého měření řezných sil je dynamometr. Principem tohoto zařízení je pružný člen, které se vlivem silových zatížení při obrábění deformuje a z deformace toho pružného členu je možné určit velikost řezné síly. [4]

Dynamometry lze rozdělit podle typu veličiny, na kterou je převáděna deformace pružného členu.

- Mechanické
- Hydraulické

- Pneumatické
- Elektrické

### Elektrické

Jedná se o nejobvyklejší princip. Obvykle se velikost řezné síly určuje z velikosti náboje, který je způsobený deformací piezoelektrického členu a je přímo úměrný síle, která deformaci vyvolala.

Samotný náboj vygenerovaný piezoelektrickým krystalem by k měření nestačil, a proto musí být k dynamometru připojen ještě nábojový zesilovač a vyhodnocovací zařízení.

### **2.1.3 Mechanismus poškození nástroje**

Poškození řezného nástroje je dáno primárně dvěma pohyby. Pohyb řezného nástroje vůči obráběnému materiálu a pohyb oddělené třísky vůči danému nástroji. Poškození samotného nástroje vzniká jako důsledek mechanického, tepelného a chemického namáhání nástroje. Z výše zmíněného plyne, že se jedná o nedílnou součást jakéhokoli třískového obrábění, nicméně se jedná o složitě popsitelný a velmi komplexní děj.

Lze rozlišit několik základních mechanismů:

#### **Abrazivní otěr**

Jedná se o nejčastější a nejlépe odhadnutelný mechanismus poškození řezného nástroje. Abrazivní poškození je vyvoláno brusným otěrem tvrdých částic o řezný nástroj. [5]

#### **Adhezní otěr**

Toto opotřebení se projevuje jako tlakové navařování třísky na břít nástroje, obvykle k tomuto jevu dochází lokálně. K tomuto typu poškození dochází častěji při nízkých řezných rychlostech nebo při obrábění materiálů, které mají tendenci k ulpívání na řezném břitu. Typickým příkladem těchto materiálů jsou nízkouhlíkové oceli a slitiny hliníku. [5]

#### **Chemický otěr**

Tento mechanismus se projevuje vznikem žlábků na čelní ploše řezného nástroje. Je způsoben chemickou reakcí mezi odcházející třískou a materiálem nástroje. Působení tohoto mechanismu se zvyšuje s rostoucí teplotou, potažmo s rostoucí řeznou rychlostí. [5]

#### **Difúzní otěr**

Dochází k němu v případech, kdy teplota v místě řezu překročí kritickou mez a dojde k uvolnění vazeb ve struktuře kovů a následné migraci atomů mezi nástrojem a obrobkem. Takto migrující atomy difundují do opačných krystalových mřížek, kde vytváří nové chemické sloučeniny. Vlivem těchto změn dochází v průběhu řezu ke změně mechanických vlastností nástroje i obráběného materiálu. [5, 6]

### Plastická deformace bříty

Tento mechanismus se vyskytuje zejména při obrábění materiálů se špatnou tepelnou vodivostí, kdy se většina tepla, vzniklého obráběním, indukuje v nástroji. To spolu v kombinaci s mechanickým namáháním nástroje vyvolá plastické deformace v nástroji. V případě extrémního zatížení může dojít k postupnému, lavinovému přemístování plastické deformace skrz velké části bříty. [5, 7]

### Křehký lom

Křehký lom je typický mechanismus poškození pro břitové destičky ze slinutých karbidů nebo řezné keramiky. Může se projevovat jako postupné vylamování bříty nebo jako lom celkový. Obvykle je způsoben přetížením nástroje a střídavým záběrem. Může k němu také dojít i na základě mikrotrhlin, které v nástroji vznikly jako důsledek předešlého broušení. [6]

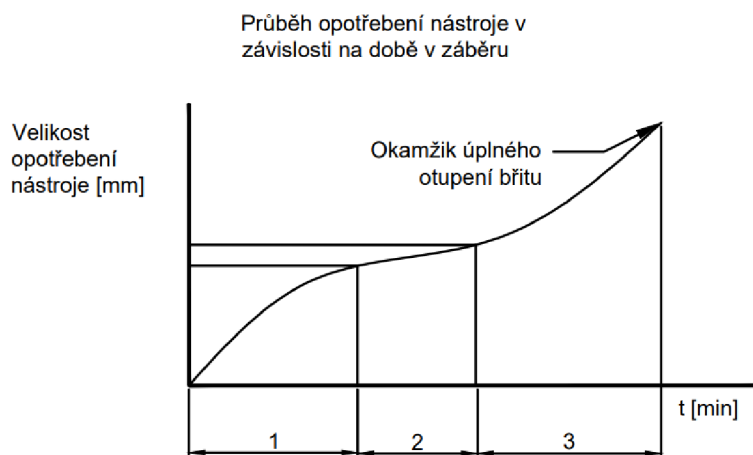
Schématické ukázky zmíněných opotřebení a způsob jakým se projevují je možné vidět na obrázku 5.



[Obr. 5] – Poškození břitových destiček [7]

## 2.1.4 Průběh opotřebení nástroje

Jedná se o empiricky získanou závislost poškození nástroje v závislosti na době v záběru.



[Obr. 6] – Typický průběh opotřebení řezného nástroje

V rámci obrázku 6 je zobrazen průběh opotřebení nástroje, kde lze rozlišit několik fází:

- 1 – Úsek zrychleného záběrového opotřebení – Důvodem zrychleného opotřebování nástroje při záběhu jsou nerovnosti na vrcholku nástroje, které na sebe váží většinu zatížení
- 2 – Úsek lineárního opotřebení – lineární závislost mezi dobou v záběru a poškozením
- 3 – Úsek zrychleného konečného opotřebení – Obvykle spojeno s dosažením kritické teploty, které má za následek pokles pevnosti nástroje. Může docházet k lavinovitému poškození.

## 2.1.5 Drsnost obrobeného povrchu

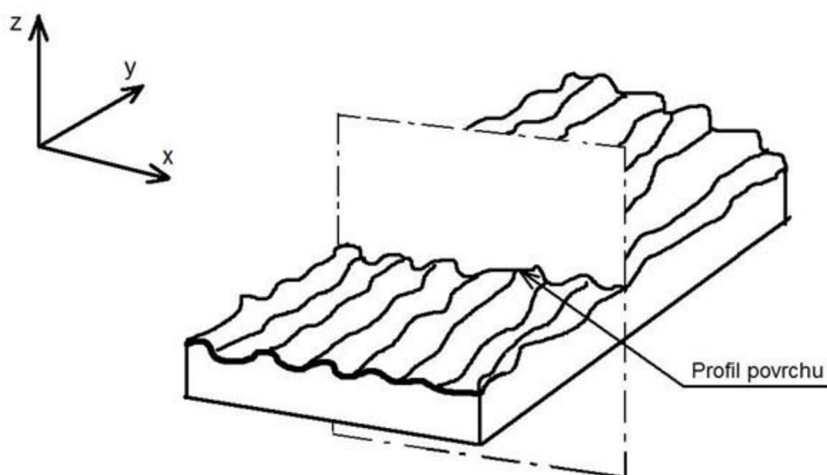
Drsností povrchu se myslí výškové odchylky povrchu součásti, které se odchylojí od určené ideální hodnoty. Vznikají jako důsledek technologie třískového obrábění. Podle odlišné struktury lze rozlišit dva druhy odchylek:

- a) Makrostruktura – Zaznamenává odchylky celých ploch na obrobené součásti. Zejména odchylky geometrie a polohy dané plochy. Typickým příkladem je zvlnění povrchu.
- b) Mikrostruktura – Zaznamenává zvlnění a drsnosti konkrétní plochy. Vzniká jako stopy zanechané řezným nástrojem

Z hlediska výroby je důležité umět vyhodnotit změny ve struktuře povrchu. Struktura se může měnit vlivem různých technologických operací, popřípadě se může měnit v rámci jedné dané technologie vlivem postupné degradace nástroje, změnou řezných podmínek, špatným upnutím obrobku atd.

Pro jednoznačnost popisu struktury povrchu se používá hodnota drsnosti povrchu. Tuto hodnotu lze získat měřením profilu nerovností na daném úseku zkoumané plochy a následným

vyhodnocením získaných dat. Celý proces měření a vyhodnocování drsností povrchu je normalizován dle normy ČSN EN ISO 4287. [8, 9]



[Obr. 7] – Ukázka mikrostruktury obrobenej plochy [9]

Z výše přiloženého obrázku 7 je dobře patrné, jak je definován profil povrchu součásti. Profil je uvažován na rovině kolmé k nerovnostem skutečného povrchu. Z takto naměřeného profilu se následně provádí další vyhodnocování. Důležité je, že podle normy ČSN EN ISO 4287 se dané nerovnosti musí nacházet na relativně malém úseku měřené plochy a do měření drsnosti nelze zahrnout vady obrobenejho materiálu, jako jsou například trhliny, místa, kde došlo k vylomení části materiálu, místa poškozená dopadem těžkého předmětu, atd. [9]

Existují dva odlišné přístupy k měření drsnosti povrchu. Obvykle se označují jako subjektivní a objektivní metoda, ale správné značení metod podle normy je kvalitativní a kvantitativní. [8, 9]

**Kvalitativní (subjektivní) metoda** spočívá v hmatovém porovnání dané plochy se vzorkovníkem, který obsahuje sadu povrchů známých drsností. Jedná se o metodu, kdy výsledek je silně závislý na citlivosti osoby provádějící porovnání. Jedná se o poměrně zastaralou metodu, ale může být použita k předběžnému určení drsnosti povrchu, než dojde ke kvantitativnímu vyhodnocení. Její nespornou výhodou je její rychlost.

**Kvantitativní metoda** k vyhodnocení drsnosti povrchu využívá přesné měřicí přístroje. Podle konkrétní konstrukce lze rozdělit na přístroje měřicí ve 2D (profiloměry, někdy též drsnoměry) nebo přístroje měřicí ve 3D (topografie obrobenejho povrchu). Rozdíly mezi metodami lze pojmut jako metodu dotykovou a metodu bezdotykovou.

Principem kontaktních měřicích přístrojů je měřicí hrot umístěný na pohyblivém ramenu, kdy elektromotor pohybuje celým ramenem předem zadanou rychlostí a měřicí hrot je v kontaktu s měřeným povrchem. Jak se hrot dotýká drsného povrchu, vyvolá to jeho pohyb, který je přes rameno přenesen až ke elektrické soustavě a převeden na signál, který je následně vyhodnocen. [9, 10]

Výhodou kontaktních měřicích metod je jejich robustnost a odolnost vůči rušivým vlivům, které způsobuje znečištění povrchu. Případné drobné nečistoty nebo tenká olejová vrstva na povrchu nebude pro měřicí hrot značnou překážkou. Z toho důvodu je ve strojírenské praxi dotyková metoda mnohem častější než bezdotyková metoda, které vyžaduje velmi čistý povrch. Bezdotyková metoda se naopak častěji využívá v laboratorních podmínkách. [9–11]



[Obr. 8] – Příklad naměřeného profilu a vyhodnocení  $R_a$  [11]

#### Vyhodnocované parametry

Parametry na zjištěném profilu lze rozdělit do tří základních skupin: výškové, délkové a hybridní hodnoty. Pro praktické aplikace je nejčastěji využíván právě výškový parametr.

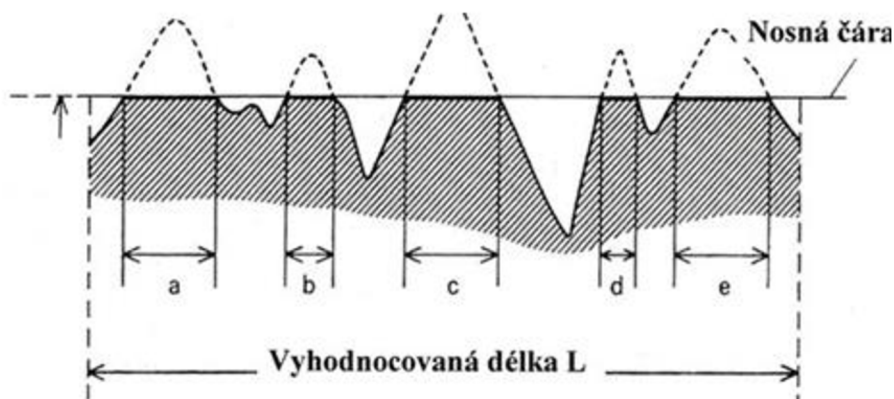
Parametr P – nejmenší možná vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými mezními přímkami na měřené délce

Parametr R – svislá vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem rýhy měřeného profilu drsnosti na měřené délce

Parametr W – svislá vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem profilu vlnitosti (drsnost je odfiltrována)

### Charakteristické veličiny pro měření drsnosti povrchu

Norma DIN EN ISO 4287 definuje několik parametrů, které lze použít k měření a vyhodnocování drsnosti povrchu, mezi jedny z nejpoužívanějších patří:



[Obr. 9] – Nákres materiálového poměru [11]

$R_a$  – Obecně používaný parametr pro popis drsnosti povrchu. Je definován jako střední aritmetická odchylka drsností, tj. průměr absolutních hodnot drsností z referenční délky. Ukázka grafického vyhodnocení  $R_a$  je vidět na obrázku 8.

$R_z$  – Největší výška profilu, která se určí z rozdílu největší a nejmenší hloubky jednotlivých pěti úseků měření.

$R_t$  – Výškový rozdíl nejvyššího a nejnižšího bodu na získaném drsnostním profilu v dané délce.

$R_{mr}$  – Materiálový poměr – jedná se o hybridní veličinu, které se získá poměrem nosné délky plochy vůči celkové délce profilu. Podle obrázku 9 by se jednalo o součet délek (a+b+c+d+e) ku celkové vyhodnocovací délce L

## 2.2 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou heterogenní materiály, které jsou obvykle tvořeny ze dvou rozdílných fází. Důležité je, že tyto fáze mají od sebe odlišné mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Některé materiály, které se vyskytují ve volné přírodě, mají takové složení a chování podobné našim kompozitům. A z historického hlediska nejsou kompozitní materiály také ničím novým. Kompozitní strukturu měly krátké luky, používané mongolskými nájezdníky, a damažská ocel už ve 13. století. [12]

V této práci se budu pouze zabývat kompozitními materiály, které se používají v současné technické praxi.



Důležité pro definici kompozitních materiálů je, že vznikají mechanickým skládáním jednotlivých fází, tím se odlišují od slitin, které jsou také heterogenní materiály. Další znakem kompozitních materiálů je synergismus, což je efekt, kdy výsledná sledovaná vlastnost kompozitu je vyšší, než by byl pouhý součet sledovaných vlastností daných fází.

Většina materiálů používaných v technické praxi se chová izotropně, tj. že jejich vlastnosti nejsou závislé vzájemné orientaci materiálu a zatížení. V porovnání u řady kompozitních materiálů je časté silné anizotropní chování. Při zatížení kompozitu s plastovou matricí a uspořádanými vlákny bude záležet, zda bude ono zatížení zaváděno kolmo nebo souběžně s orientací vláken. [12]

### 2.2.1 Matrice

Jedná se o výchozí materiál, který tvoří základ daného kompozitního systému. Jejím úkolem je zachovávat geometrický tvar, zajistit dostatečné spojení s vyztužující disperzí (adhezí), přenos zatížení z matrice na disperse a ochrana disperse před vnějšími vlivy. [13]

Dělení podle typu použité matrice je jedna z nejčastějších možností k dělení kompozitních materiálů. [12]

- Plastová matrice (**P**lastic **M**atrix **C**omposites – PMC)
- Kovová matrice (**M**etal **M**atrix **C**omposites – MMC)
- Keramické matrice (**C**eramic **M**atrix **C**omposites – CMC)

V případě kompozitních materiálů je velká možnost vzájemných kombinací, tudíž ne všechny materiály zapadají do tohoto rozdělení. Existují i matrice na bázi skla, kovové pěny a dalších materiálů. Nicméně tato práce se bude primárně zaměřovat na obrábění kompozitních materiálů s plastovou matricí plněných skelnými vlákny.

### 2.2.2 Typy plastových matric

Materiál polymerních matric lze rozdělit na reaktoplasty (termosety) a termoplasty. Nejpoužívanějším materiálem na matrice jsou vyztužené nenasycené polyesterové a epoxidové pryskyřice. Jejich výhodou je, že jsou tekuté i za standardních pokojových teplot a tlaků. A i v případě, že se s nimi musí pracovat ve stavu taveniny, mají značně nižší viskozitu a pracovní tlaky než termoplasty. [13]

Reaktivní pryskyřice jsou nejčastější skupinou termosetů používaných v kombinaci se skelnými vlákny k tvorbě kompozitních materiálů. K spuštění mechanismu vytvrzení dohází vlivem aktivace skrze tvrdidla (iniciátorů). Podle normy ČSN 64 2001 je důležité, aby při procesu polymerace nebo polyadice nedocházelo k odštěpování těkavých složek. [13]

Nenasycené polyesterové pryskyřice jsou velmi častý materiál pro matrice kompozitních materiálů. Až 70% veškeré produkce těchto pryskyřic je využito právě v podobě kompozitních materiálů. Za jejich značným rozšířením stojí jejich nízká cena a univerzálnost aplikací. Existuje velké množství pryskyřic tohoto typu (kyselina maleinová, anhydridy kyseliny ftalové, dicyklopentadien, ...), což v kombinaci v množství možných plniv (křída, kaolin, plniva proti zahoření, ...) vytváří

velkou škálu kombinací pro široké spektrum aplikací. Také se vyznačují obecnou odolností proti atmosférickým vlivům. Za nevýhodu může být považováno smrštění o 6–9% a značná zátěž pro životní prostředí.[13]

Epoxidové pryskyřice mají velmi dobré mechanické vlastnosti, rozměrovou stálost a dobrou přilnavost k podkladové vrstvě. Nevýhodou je nutnost přesného dávkování pro míchání a tří až čtyřnásobná cena oproti polyesterovým pryskyřicím. To je důvod, proč se přibližně 8% veškeré produkce epoxidových pryskyřic používá pro výrobu kompozitních materiálů. Další nevýhodou je, že se může projevit alergické podráždění vlivem práce s epoxidovými pryskyřicemi. [13]

### 2.2.3 Disperse

Disperse se nazývá nespojitá fáze rozptýlená v matrici za účelem zlepšení jejich vlastností. Disperse lze rozdělit podle jejich tvaru na vlákna, částice a desky.

**Vlákna**, u kterých je dominantní délkový rozměr (nemají žádnou odolnost vůči namáhání na ohyb), samotná vlákna mohou být uvnitř matrice nepřerušovaná, taková se nazývají spojitá. Další možnosti jsou dlouhá vlákna, která se při překročení kritické délky v případě lomu poruší, a vlákna krátká, která se v případě lomu začnou vytahovat z matrice. Nejčastěji se používají vlákna skleněná, méně časté jsou aplikace vláken z materiálů na přírodní bázi, kevlaru a uhlíku.[12] [13]

Obecně vlákna přispívají ke značným anizotropním vlastnostem materiálu, a to zejména zvýšením mechanických vlastností ve směru vláken, kdy dojde ke značnému zvýšení pevnosti v tahu a tuhosti. V příčném směru bude docházet ke snížení pevnosti kompozitu. Dále vlákna snižují viskoelastické chování matrice při osovém zatížení, ale pro zatížení příčné nebo smykem je viskoelastické chování nezměněno.[12]

Vlákna orientovaná pouze v jednom směru se obvykle nepoužívají právě z důvodu výrazné anizotropie. Řešením je, že vlákna jsou aplikována ve formě pásů, rohoží, přízí, tkanin a úpletů. Ty mohou mít různé složení a různou orientaci vláken v různých vrstvách. Úplety se realizují v různých geometrických tvarech a za pomoci řasených a tvarovaných úpletů se dají tvořit trojrozměrné útvary.[12] [13]

**Částice** mohou být uloženy v kompozitním materiálu náhodně nebo orientovaně. Používají se zejména ke zlepšení nemechanických vlastností (vodivost, izolační vlastnosti, tlumení vibrací, zvýšení odolnosti, ...). V omezené míře se dají použít ke zvýšení modulu pružnosti, ale následkem bývá snížení meze pevnosti. Velmi časté částicové plnivo se užívá ve formě plných nebo dutých skleněných kuliček

**Desky** jsou zvláštní případ disperze. V jejich případě je výsledný kompozit složen ze vzájemně navrstvených desek a je prakticky nemožné rozlišit mezi matricí a disperzí. Nelze aplikovat poučku o spojitě matrici.

## 2.2.4 Skleněná vlákna

Protože se bakalářská práce soustředí na obrábění kompozitních materiálů vyztužených skelnými vlákny, bude kladen důraz zejména na popis skelných vláken.

Využití samotných skelných vláken jako konstrukčního materiálu je velmi ojedinělé. Nicméně skleněná vlákna jsou velmi častou disperzí v kompozitních materiálech.

### Vlastnosti

Mezi obecné vlastnosti skleněných vláken patří, že vykazují izotropní charakteristiku při zatížení. Modul pevnosti v tahu se udává  $E \cong 75 \text{ GPa}$ , což odpovídá přibližně velikosti modulu pružnosti čistého hliníku, a zároveň odpovídá asi třetině modulu pružnosti uhlíkové oceli. [13]

Pevnost v tahu je silně závislá na konkrétním typu skleněného vlákna a také je odlišná pro vlákna během procesu tažení a již zpracovaná vlákna. Pro běžná skleněná vlákna platí, že pevnost v tahu pro tažené vlákna se pohybuje kolem hodnoty 3 – 3,5 GPa a pro zpracovaná vlákna klesá na 1,5 GPa. Nicméně existují i speciální vlákna pro vysokopevnostní využití, kde dosahuje pevnost v tahu až 5 GPa. Obecně lze konstatovat, že pevnost v tahu pro skleněná vlákna je vyšší než u většiny ostatních typů vláken a zároveň výrazně vyšší než u oceli. Vzhledem k velmi malé hustotě skleněných vláken ( $2 - 3 \text{ g/cm}^3$ ) vychází poměr pevnosti k hustotě velmi příznivě. [13–15]

### Typy výztuží

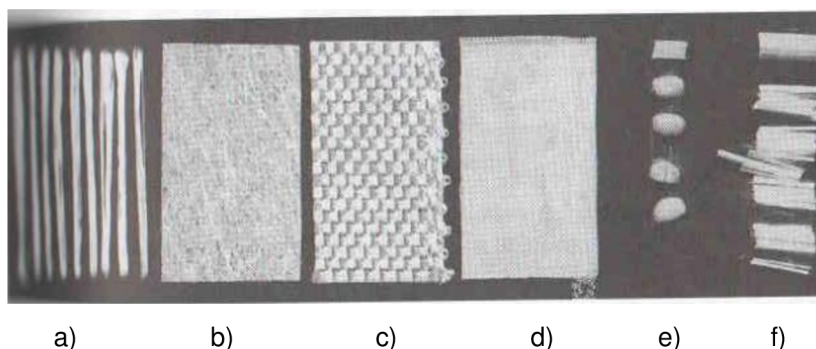
Používání samotných skleněných vláken není praktické. Proto je třeba skleněná vlákna textilně zpracovat do podoby, ve které mohou být použita. Zde konkrétně k výrobě kompozitních materiálů. Na obrázku 10 jsou vidět různé základní textilní produkty ze skleněných vláken. [13]

Pro vyztužování reaktivní pryskyřice se používají:

- Pramenec
- Rohož
- Tkanina z pramenců
- Tkanina z vláken

Pro vyztužování termoplastů se využívají:

- Krátká vlákna (délka v řádech desetin milimetrů)
- Dlouhá vlákna (délka v řádech několika milimetrů)



[Obr. 10] – Typy výztuží [13]

Pro výrobu kompozitních materiálů mají největší význam až výsledné textilní výrobky. V nich mohou mít vlákna mezi sebou různé vazby. Jmenovitě se jedná o vazbu plátňovou, keprovou a atlasovou.

Ze strojařského hlediska je důležité vědět, že vazba plátňová je nejpevnější, ale také nejhůře tvarovatelná. Poněkud lepší ohebnost má vazba keprová, to ovšem pouze za předpokladu, že dojde k využití speciálně měkčených vláken.

Nejméně pevnou vazbou z textilního pohledu je vazba atlasová. Tato tkanina vykazuje výbornou tvarovatelnost a ohebnost. Při použití k vytužení kompozitu se dosáhne mnohem vyšších výsledných pevností a tuhostí, než když dojde k využití tkanin s výše zmíněnými vazbami. Důvodem je velká objemová hustota vláken. [13, 14]

Obvykle se k výrobě textilií používají počítačem řízené textilní stroje. Výsledné produkty mohou být jednosměrné pásy nebo úplety. Rozdíl spočívá v tom, že v případě pásů dochází ke spojování vláken pomocí podkladové lepicí rohože nebo za pomoci příčných vláken, zatímco úplety vznikají splétáním vláken dohromady. Úplet může být tvořen jedním nebo i vícery druhy vláken. Tímto postupem lze vyrábět téměř libovolné plošné útvary. [13]

Další kategorií jsou prostorové tkaniny. Ty vznikají na speciálních horizontálních pletacích zařízeních využívající počítačové řízení pohybu jednotlivých cívek pro dosažení požadovaných prostorových tvarů. Většina 3D tvarů vzniká kombinací háčkování a pletení, popřípadě díky úhlově vázaným konstrukcím. [13, 14]

### **2.3 Obrábění kompozitních materiálů**

Obrábění kompozitních materiálů je obecně považováno za náročnou disciplínu a je doporučováno, aby byly obráběcí operace na dílech z kompozitních materiálů omezeny na nezbytně nutný počet. Ovšem operace jako je odstraňování roztržených okrajů, výroba děr a otvorů pro následnou montáž, dělba materiálu a vytváření kontur se jmenovitými rozměry nelze realizovat jinak než obráběním. V některých případech se lze rozhodovat mezi obráběním třískovým nebo obráběním za použití nekonvenčních technologií (obrábění laserovým nebo vodním paprskem).[16]

Důvodů, proč je obrábění kompozitních materiálů komplikované, je několik. Samotným vnikáním řezného klínu do heterogenního materiálu bude docházet k jeho rozlamování na dělicích plochách. Dále bude docházet k poškození zpevňujících vláken, která mohou být vytrhávána z matrice, také nemusí docházet k jejich úplnému odříznutí. To povede ke snížení pevnosti daného dílu. Obtížným pracovním podmínkám bude podroben i řezný nástroj. Ten při vnikání do heterogenního materiálu bude vystaven abrazivnímu efektu tvrdé disperze, což povede k jeho postupnému poškození.[17]

Další faktor negativně ovlivňující obrobiteľnost kompozitních materiálů je nemožnost použít ke chlazení během obrábění řeznou emulzi nebo olej z důvodu nasákavosti kompozitních materiálů. To způsobuje špatný odvod tepla z místa řezu. Jediná možnost chlazení místa řezu je pouze foukáním tlakového vzduchu. Špatný odvod tepla z místa řezu je též umocněn špatnou tepelnou vodivostí skleněných i uhlíkových vláken. [13, 16, 18]

Další faktor ovlivňující výsledek obrábění je materiál matrice. Matrice ve formě reaktoplastů (podle starší literatury termosetů) jsou velmi křehké a při jejich obrábění nevznikají klasické třísky, ale odebraný materiál se drolí ve formě prachu. To vyžaduje jeho neprodlené vysávání z místa řezu, nebo nutnost filtrace vzduchu v místnosti, kde k obrábění dochází. Výhodou je, že matrice z reaktoplastů nemění výrazně své vlastnosti v závislosti na teplotě. [18, 19]

Naopak u matic z termoplastů odchází tříška podobná jako u obrábění houževnatých kovových materiálů. Nevýhodou je nutnost sledovat teplotu v místě řezu, protože právě teplota má výrazný vliv na vlastnosti termoplastu. V případě překročení hranice skelnatění začne docházet k postupnému měknutí a ztráta mechanických vlastností bude ještě výraznější. V případě dalšího zvyšování teploty může dojít až k přetvoření termoplastové matrice na taveninu. Další náležitost, na kterou má materiál matrice vliv, je tepelná roztažnost, která je výrazně vyšší u kompozitních materiálů s pryskyřicovou maticí než u kovových materiálů. To se zejména projevuje značnou změnou rozměrů dílců v průběhu obráběcích operací. Ovšem není výjimkou, že bude docházet k rozměrovým změnám i po skončení obrábění v důsledku postupného ochlazování materiálu. Tyto jevy jsou zejména evidentní při obrábění hmotných a rozměrných dílců. [18, 19]

Z výše uvedeného je zřejmé, že obrábění kompozitních materiálů není snadná záležitost a je nutné věnovat zvýšenou pozornost volbě vhodných režných podmínek a volbě nástroje, který dokáže odolat velmi silnému opotřebení způsobeného abrazivním efektem disperze v podobě skleněných nebo uhlíkových vláken. A také je třeba dbát na jakousi šetrnost vůči obráběnému materiálu.

### 2.3.1 Materiály nástrojů

Pro obrábění kompozitních materiálů se v současné době výhradně používají nástroje ze slynutých karbidů s povlakem nebo se používají monolitní nástroje s břity tvořeným syntetickým polykrystalickým diamantem PCD (**P**oly**C**rystalline **D**iamond). Jedná se většinou o válcové frézy, které se používají ke konturovému obrábění nebo k odstraňování okrajů dílu (zarovnávání na finální rozměr). V případě břitových destiček se nejčastěji používá povlak DLC (**D**iamond-**L**ike **C**arbon). Principem těchto povlaků je metastabilní amorfní stav uhlíku, který má mnoho shodných vlastností s diamantem. Řezné nástroje, na které byl aplikován tento povlak, získávají tolik potřebnou tvrdost a velmi vysokou odolnost vůči abrazivnímu namáhání. Dále tento povlak snižuje koeficient tření, což má pozitivní vliv na řezné vlastnosti a zmenšení vzniku tepla vlivem tření nástroje o obrobek. [20, 21]

Povlakované nástroje ze slynutých karbidů vykazují několika násobně menší životnost břitu než nástroje z polykrystalického diamantu. Zdroje se obecně shodují na několika násobném rozdílu, nicméně v konkrétních číslech se znatelně rozcházejí. Velmi častým údajem je udávání desetinasobného rozdílu v životnosti, nicméně lze najít zdroje, které uvádí rozdíl až stonásobný. Ovšem i přes velký rozdíl v životnosti je pořizovací cena nástrojů z PCD natolik značná, že se vyplatí v mnohých aplikacích pořídit nástroje z povlakovaných břitových destiček. [18, 19]

Při porovnání výsledné kvality obrobeneho povrchu dosahují nástroje osazené povlakovanými břitovými destičkami lepších výsledků než nástroje z PCD. Důvodem je vyšší počet břitů nástrojů osazenými břitovými destičkami. [18, 19]

Nástroje z DLC, jak bylo zmíněno dříve, mají vysokou odolnost proti abrazivnímu poškození způsobeného heterogenním uspořádáním kompozitních materiálů. Proto jsou nástroje s břitý z polykrystalického diamantu častým řešením. Nicméně díky malému počtu břitů a špatné geometrii nástroje (dané technologií výroby nástroje) dochází k většímu poškození obráběného materiálu než v případě nástrojů s břitovými destičkami. Mezi nežádoucí jevy patří lámání vláken disperze (místo odříznutí), popřípadě špatné odřezávání, delaminace, nárůst tepelného ovlivnění obrobku v důsledku nárůstu řezných sil. Celkově vykazují horší kvalitu obrobeného povrchu. [18]

Většina těchto nechtěných projevů nástrojů z PCD nejsou závadami, ale vlastnosti danými technologií výroby těchto nástrojů. Z fyzikální podstaty polykrystalického diamantu nelze vyrábět jiné než přímé ostří. Následkem je nekonstantní průřezová charakteristika břítu a limit možného konečného počtu břitů na nástroji.

To celkově vede k nižší produktivitě obrábění. Možným řešením je upravení řezných podmínek. Nicméně při jejich zvyšování se bude zvyšovat intenzita negativních jevů typických pro PCD nástroje.

Při zvyšování řezné rychlosti bude růst tepelné ovlivnění místa řezu, a jak bylo napsáno výše, negativně to působí na kvalitu obráběné plochy a při překročení kritických teplot to může vést až k tvorbě spálenin v místě řezu.

Navýšení posuvu na zub bude způsobovat častější delaminace a špatné odřezávání vláken, která budou spíše lámána a vytrhávána než řezána. Dalším negativním důsledkem zvýšení posuvu na zub je nárůst drsnosti obrobených ploch.

Tyto negativní jevy způsobené použitím nástrojů z PCD lze zmenšit, když se použijí nástroje s geometrií, která byla vytvořena pomocí laseru. Ovšem tato technologická úprava je velmi drahá a už tak vysokou cenu nástrojů z PCD zdvojnásobí. [18, 19]

### 2.3.2 Typy nástrojů

V současnosti se zejména vyrábí nástroje pro vrtání, soustružení a frézování kompozitních materiálů. V případě frézování je důležité pro efektivní práci mít přístup k nástrojům různých geometrií a různých nástrojových tříd, protože různé obráběcí operace mnohdy vyžadují velmi rozdílné nástroje. Nejčastější provedení nástrojů na frézování je v podobě monolitů nebo frézovacích hlav s vyměnitelnými břitovými destičkami. [19]

Monolitní frézy jsou zejména používány pro obrábění okrajů výrobku na finální rozměr a odstraňování otřepů. Jsou obvykle dodávány v menších průměrech, tj. od 5 do 12 mm. Některé frézy mají malý počet břitů (existuje provedení s jedním břitem). Obvykle mají malý úhel šroubovice, ten způsobí, že obráběná plocha je zatěžována výhradně tlakovými silami, což má pozitivní dopad na výslednou kvalitu povrchu.

Pro operace, kdy je potřeba zanoření do materiálu po obou stranách (frézování kapes, nejčastěji jedním průchodem), se doporučují takzvaně dvojí „kompresní nástroje“, ty se vyznačují dvěma protiběžnými šroubovicemi. Jejich výhodou je snížení sklonu k delaminaci materiálu, ale jejich jinak nepříliš vhodná geometrie zvyšuje pravděpodobnost tvorby jiných vad, zejména na povrchu obráběné plochy. Ukázka monolitních nástrojů je na obrázku 11. [18, 19, 22]



[Obr. 11] – Ukázka monolitních fréz na obrábění kompozitů [14]

Frézovací hlavy osazené řeznými destičkami se obecně používají pro obrábění velkých ploch. Od toho se odvíjí i jejich rozměry, které jsou větší než u monolitních nástrojů. Obvykle je tělo frézovací hlavy vyrobeno z oceli nebo hliníkových slitin a díky přesně vyrobeným lůžkům pro řezné bříty se dosahuje vysokých přesností ve výrobě. Na obrázku číslo 12 jsou ukázky frézovacích hlav od firmy Sandvik. [22]



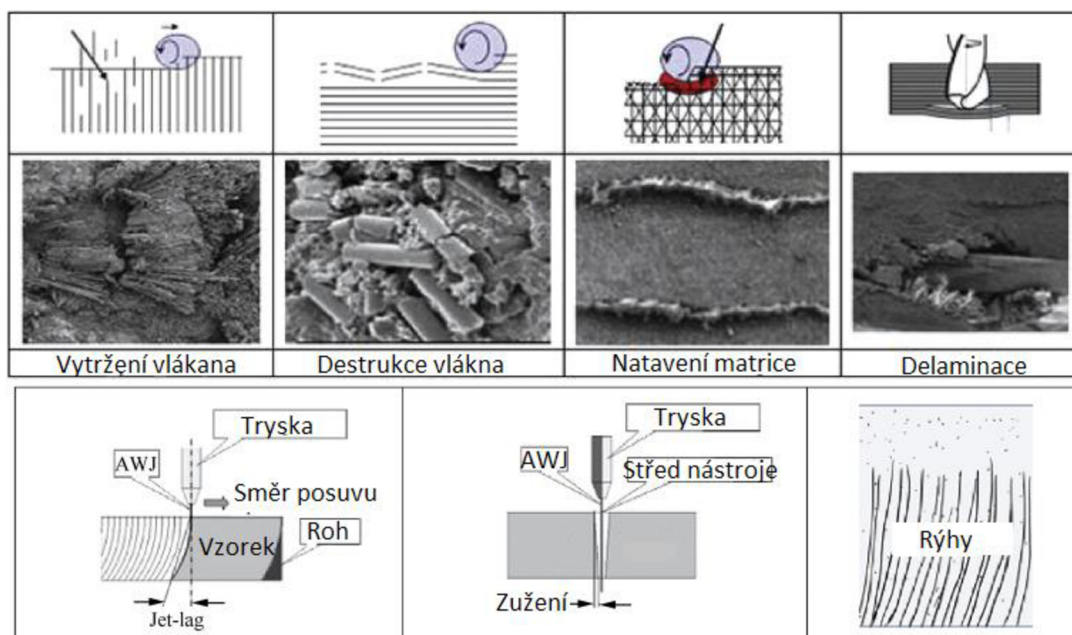
[Obr. 12] – Frézovací hlavy [14]



### 2.3.3 Delaminace

Delaminace je negativní jev, který je typický pro obrábění kompozitních materiálů. Podle hodnocení experimentů ve vědeckém článku [23] tvoří delaminace 60% veškerých komplikací, které se vyskytnou při obrábění kompozitních materiálů. Z toho důvodu je důležité se zaměřit na co možná největší eliminaci tohoto jevu, protože v případě snížení výskytu delaminace dochází k výraznému snížení zmetkovitosti a tím pádem k se zvyšuje celková efektivita výroby. Kromě delaminace může při obrábění kompozitních materiálů dojít k dalším poruchám, jako jsou například: vytrhaná vlákna z výztuže, poničení vláken a natavení matrice. Ukázky poruch jsou vidět na obrázku číslo 13.

Samotná delaminace je proces, při kterém dochází vlivem obecně působící síly na kompozitní materiál k rovinnému oddělení jedné nebo více vrstev od sebe. Obecně delaminace může být důsledkem špatné technologie výroby daného kompozitu (například přítomnost vzduchových kapes, zvýšené tepelné působení na jedno místo, špatně umístěná výztuž, ...) nebo může dojít k delaminaci vlivem působení vnějších sil kolmo na jednotlivé vrstvy (dopad těžkého předmětu, síly vyvozené při obrábění). Na místech jako jsou volné okraje, otvory, místa vniknutí nástroje do materiálu nebo přechody různých tloušťek daného kompozitu je riziko vzniku delaminace výrazně vyšší. [14, 23]



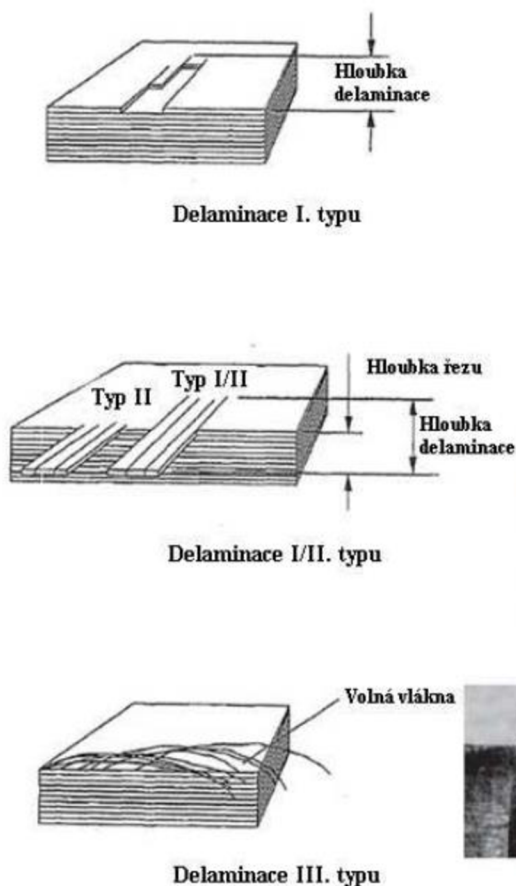
[Obr. 13] – Různé možnosti poškození kompozitního materiálu vlivem obrábění [23]

Samotný jev delaminace kompozitního materiálu lze rozdělit do dvou fází. První fáze začíná v okamžiku, kdy břit příčné ostří začne působit na neobrobenou část materiálu. Jím vyvozená síla začne stoupat a po dosažení kritické hodnoty břit vnikne do materiálu. Tím dochází k iniciaci delaminace. Delaminace nejdříve vzniká poblíž místa vniknutí břitu. V druhé fázi dochází k šíření delaminace vlivem posuvové síly od nástroje. Delaminace obvykle dosáhne konečného stavu v momentě, kdy příčné ostří opustí materiál. [24] V případě frézování kompozitních materiálů lze rozlišit několik druhů delaminací. Delaminace prvního typu nastává v případě, kdy nástroj vytrhne svrchní vrstvy obráběného materiálu. Delaminace druhého typu je selháním nástroje v odříznutí

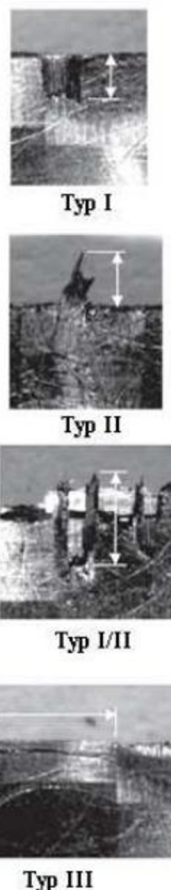


materiálu. Obvykle se delaminace prvního a druhého typu vyskytují společně. Delaminace třetího typu má podobu částečně volných vláken výztuže vytažených podélně s dráhou nástroje. Jednotlivé typy delaminací lze vidět na obrázku 14. [25]

#### Frézování kompozitních materiálů s termoplastickou maticí



#### Frézování FRP materiálů



[Obr. 14] – Typy delaminací při frézování kompozitních materiálů [25]

#### 2.3.4 Řezné podmínky pro kompozitní materiály

Vlastnosti povrchu obrobenej součásti jsou z velké míry ovlivněny tvorbou třísky při procesu obrábění. Průběh procesu tvorby třísky může ovlivnit i samotnou výslednou celistvost obrobenej plochy. Důvodů k poškození obrábenej plochy může být několik. Může se jednat o špatně zvolené řezné podmínky, špatně zvolený typ nástroje (nevhodnou geometrii) nebo o špatný odvod tepla z místa řezu. Nejčastějším negativním jevem je popraskání obrábenej povrchu, uvolňování velkých smotků skleněných vláken a materiálu matrice.

Změny v řezných podmínkách jsou velmi důležitým faktorem pro odstraňování (minimalizaci) delaminace a omezování dalších negativních jevů, které se objevují při obrábění kompozitních

materiálů. Zejména v případě třískového obrábění kompozitních materiálů bylo experimentálně zjištěno, že zvýšení řezné rychlosti vede ke snížení rizika delaminace. V případě zvýšení řezné rychlosti a snížení posuvu byly výsledky ještě příznivější. [23]

V případě měření drsností povrchu bylo zjištěno, že se zvyšující se řeznou rychlostí drsnost nepatrně klesá. V případě zvyšující se velikosti posuvu začíná drsnost povrchu velmi rychle narůstat. Nejdůležitějším parametrem se s ohledem na výslednou drsnost dosaženého povrchu ukázal počet břitů nástroje. Mezi další parametry, které ovlivňovaly drsnost obrobeného povrchu, byla řezná rychlost, hloubka řezu a orientace výztuže v kompozitním materiálu. [23]

Výzkum [23] bohužel nespécifikoval, jaký konkrétní typ nástrojů používali, pouze to, že se jednalo o monolitní frézy z PCD s různou geometrií. Mezi jejich závěry patří, že dosáhli nejnižší průměrné drsnosti povrchu ( $R_a = 2,14 \mu\text{m}$ ) pro nástroj s čtyřmi břity za řezné rychlosti 60 m/min a posuvu 0,08 mm/ot při tloušťce frézovaného materiálu 6 mm. Obráběný materiál byl unidirektní kompozitní materiál s epoxidovou matricí a výztuhou v podobě skleněných vláken.

### 3 Metodika experimentů

V této části budou rozebrány principy a postupy, které byly použity pro provedení experimentu a získání hodnot, na jejichž základě bylo možné provést zhodnocení celého experimentu.

Tato práce se věnuje prvotní studii opotřebení nástrojů při frézování kompozitních materiálů plněných skleněnými vlákny. V této kapitole bude postupně rozebráno, jaký materiál bude obráběn, jaké nástroje budou použity, typ frézy a měřidla, která byla použita pro vyhodnocování experimentu.

#### 3.1 Obráběný materiál

Jako vzorek pro obrábění bude vybrána sklotextilová deska o tloušťce 3 mm. Jako matrice tohoto materiálu je použita epoxidová pryskyřice. Disperze je v tomto případě tvořena tkaninou ze skleněných vláken s plátňovou vazbou. Na tloušťce 3 mm je v rovnoměrných rozestupech umístěno 12 vrstev této textilní výztuhy. Hodnoty některých vybraných fyzikálních vlastností budou uvedeny v tabulce 2. [27]

tab. 1 Vlastnosti obráběného materiálu [26]

Typ pryskyřice	Epoxid
Typ vláken	Skleněná
Typ vazby	Plátňová
Počet vrstev výztuhy	12
Tloušťka vzorku	3 mm
Hustota	1 800 kg/m <sup>3</sup>
Absorpce vody	0,1 %
Tvrdość (HRC)	110
Pevnost v tahu při destrukci	262 MPa
Pevnost v ohybu	448 MPa
Modul pružnosti v ohybu	16,5 Gpa
Pevnost v tlaku	448 MPa
Max. pracovní teplota	140°C

Výrobce ovšem dodává desky dané tloušťky pouze ve formě tabulí o rozměrech 610 × 340 mm. Proto bude potřeba dané desky upravit dělením na rozměry, které umožňují umístění materiálu do prostorů obráběcího stroje a jeho bezpečné upnutí. Z praktických důvodů budou desky děleny způsobem, který zaručí, že jeden rozměr desky bude vždy shodný s délkou hrany, která má být obráběna. V mém případě je tato délka obráběné hrany  $L = 200$  mm. Takto z jedné desky vzniklo několik vzorků o stejné šířce obráběné hrany (200 mm), ale proměnlivé délce.

### 3.2 Použitý obráběcí stroj

K obrábění bude použito vertikální frézovací centrum CMX 600V od výrobce DMG MORI, tento stroj lze vidět na obrázku 15

tab. 2 Parametry CNC frézky [27]

Max pojezd v ose x	600 mm
Max pojezd v ose y	560 mm
Max pojezd v ose z	510 mm
Max. délka obrobku	900 mm
Max. šířka obrobku	560 mm
Max. výška obrobku	630 mm
Max. hmotnost obrobku	600 kg
Max. otáčky vřetena	12 000 ot/min
Výkon pohonu [40/100 % zátěž.]	13/9 kW
Kroutící moment [40/100 % zátěž.]	83/57 Nm
Typ nástrojového kužele	SK 40



[Obr. 15] –Fotka CNC vertikální frézky [27]

### 3.3 Nástroje

Pro experiment jsou zvoleny dva nástroje podle katalogu firmy UNICUT. Konkrétně se jedná o nástroje TrimCut F6130 a Razor F6120. Průměr obou fréz je 6 mm.

Frézovací strategie pro obě frézy spočívá zejména v ořezávání deskových polotovarů a dokončování stěn (bez frézování dna). Dále je v katalogu popsána geometrie daného nástroje, řezné podmínky pro různé typy kompozitních materiálů a odpad podle materiálových skupin (odpad z kompozitních materiálů je v rámci katalogů UNICUT značen A,B a C)

#### Razor F6120

Jedná se o nepovlakovanou monolitní frézu se čtyřmi zuby, kde jsou jednotlivé břity rozloženy na dvou střídavých šroubovicích. Právě střídavá šroubovice má za následek snížení rizika vzniku delaminace během obrábění. Podle katalogu výrobce se jedná o vhodný nástroj na obrábění kompozitních materiálů s epoxidovou matricí a disperzí ve formě vláken. Schéma nástroje se základní geometrií je na obrázku 16 a na obrázku 17 je vidět detailní pohled na řeznou část nástroje. [28]



[Obr. 16] –Razor F6120 [28]



[Obr. 17] –Razor F6120 [28]

tab.3 Rozměry Razor F6120

D1	6 mm
D2	6 mm
L1	57 mm
L2	16 mm
z	4 zubů

tab. 4 Doporučené řezné podmínky

$v_c$ [m/min]	120
$A_p$ [mm]	9
$f_z$ [mm]	0,4

Ze znalosti rozměrů nástroje a obráběného materiálu lze z katalogu určit výrobcem stanovené ideální řezné podmínky a předpokládanou formu třísky. Pro obrábění GFRP bude odcházet tříska ve formě prachu.

#### TrimCut F6130

Jedná se o monolitní frézu bez povlaku s šesti zuby, na nichž jsou přímé břity. Je to jednodušší nástroj než Razor F6120. Specifikem je větší zubová mezera z důvodu menší drobnosti třísky. Nejčastější aplikace těchto nástrojů je obrábění dílů pro letecký průmysl, a to zejména kompozitních materiálů s termoplastickými matricí a disperzí ve formě vláken z uhlíku nebo kevlaru.

Nástroj není primárně určen pro obrábění GFRP s epoxidovou matricí, proto uvádím řezné podmínky pro obrábění CRFP. Nicméně tabulka přiřazení materiálových skupin zahrnuje GRFP, pro ten bude tříška odcházet ve formě prachu. Schéma nástroje se základní geometrií je na obrázku 18 a na obrázku 19 je vidět detailní pohled na řeznou část nástroje



[Obr. 18] –TrimCut F6130 [28]



[Obr. 19] –TrimCut F6130 [28]

tab.5 Rozměry TrimCut F6130

D1	6 mm
D2	6 mm
L1	81 mm
L2	18 mm
Z	6

tab. 6 Doporučené řezné podmínky

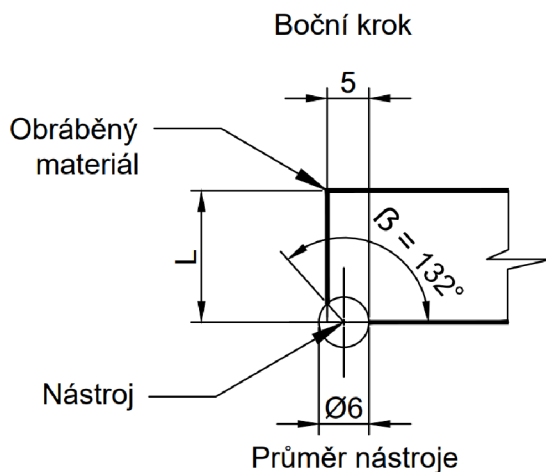
vc [m/min]	130
Ap [mm]	6
fz [mm]	0,08

### 3.4 Řezné podmínky a strategie obrábění

Pro potřeby experimentu bude zvoleno nesousledné obrábění z důvodu menší náchylnosti ke vzniku delaminace a menšího namáhání obráběného kompozitního materiálu. Dále volím boční krok o velikosti 5 mm. Velký boční krok spolu s malým posuvem způsobí, že nástroj urazí požadovanou řeznou vzdálenost, a zároveň bude obrábění ekonomicky šetrné k množství spotřebovaného materiálu.

Pro provedení experimentu jsou zvoleny následující řezné podmínky: Oba nástroje budou obrábět testovací vzorek o délce hrany 200 mm. Podstata experimentu spočívá ve vyhodnocování různých parametrů v závislosti na rozdílných řezných rychlostech. Proto nejdříve budou oba nástroje obrábět s maximální dosažitelnou řeznou rychlostí na daném obráběcím stroji  $v_c = 226 \text{ m/min}$  a následně se bude obrábět s řeznou rychlostí doporučenou výrobcem  $v_c = 180 \text{ m/min}$ . Rozdílnými řeznými rychlostmi dojde k pomyslnému rozdělení experimentu na dvě části. Každá část bude mít dva různé nástroje za stejné řezné rychlosti. Popřípadě dva stejné nástroje za rozdílných řezných rychlostí.

Nástroje, které porovnávám, mají rozdílný počet zubů. To znamená, že pro stejný posuv na zub urazí rozdílnou vzdálenost. Ovšem pro účely porovnání nástrojů je nutné, aby jednotlivé břity urazily v záběru stejnou vzdálenost. Toho bude dosaženo tím, že nástroje budou absolvovat různý počet obráběcích cyklů na vzorku o stejné délce. Vždy, když se bude ujetá dráha břitů rovnat, bude provedeno měření zkoumaných veličin a následné porovnání získaných dat.



[Obr. 20] –Schéma záběru nástroje v materiálu  
 $\beta$  – úhel opásání; L – délka obráběné hrany

Pro výpočet řezné dráhy břitu v záběru je nutné určit úhel opásání nástroje obráběným materiálem. K tomu jsem vytvořil nákres v aplikaci AutoCad, který lze vidět na obrázku 20. Protože oba nástroje mají stejný průměr, lze vycházet ze stejného obrázku a konstatovat, že úhel opásání je roven 132°. Výsledky výpočtů řezných podmínek a mezi výpočtů jsou uvedeny v tabulkách 7 a 8.

Následně vypočtu délku opásané části o:

$$o = \frac{\pi}{180} \cdot \beta \cdot \frac{D}{2} = \frac{\pi}{180} \cdot 132 \cdot \frac{3}{2} = 6,9115 \text{ mm}$$

Kde značí:  $\beta$  úhel opásání [°]  
D průměr frézy [mm]

Následně se zvolí velikost posuvu na zub. Po odborné konzultaci byla zvolena velikost posuvu na zub  $f_z = 0,02 \text{ mm}$

Ze znalosti posuvu na zub a počtu zubů lze určit velikost posuvu na otáčku.

$$f_0 = z \cdot f_z \text{ [mm]}$$

Kde značí: z počet zubů nástroje [-]  
 $f_z$  posuv na zub [mm]

Z velikosti obráběné hrany ( $L = 200 \text{ mm}$ ) a velikosti posuvu na otáčku určit počet otáček  $n$ , které nástroj učiní v záběru při jednom průjezdu obráběným materiálem.

$$n = \frac{L}{f_{ot}} \text{ [-]}$$

Kde značí:  $\beta$  úhel opásání [°]  
 $D$  průměr frézy [mm]

Velikost řezné dráhy, kterou nástroj ujede v jednom cyklu  $s_1$ , lze získat z počtu otáček v řezu a velikosti opásání nástroje materiálem vzorku.

$$s_1 = o \cdot n \text{ [-]}$$

Kde značí:  $o$  délka opásání [mm]  
 $n$  počet otáček v řezu [mm]

Aby mohly být nástroje porovnány, musí být velikost jejich řezné dráhy velmi podobná, ne-li stejná. Zároveň je třeba obrobit určité množství materiálu, aby bylo možné sledovat průběžné poškození nástroje. Proto volím počet cyklů  $N$ , po kterých bude následovat měření sledovaných veličin následovně:

**Pro nástroj TrimCut F6130 volím počet cyklů 8 a pro nástroj Razor F6120 volím počet cyklů 6.** Celková řezná dráha nástroje se vypočte z velikosti řezné dráhy jednoho průjezdu a počtu cyklů.

$$s = s_1 \cdot N \text{ [mm]}$$

Kde značí:  $s_1$  délka řezné dráhy jednoho průjezdu [mm]  
 $N$  počet průjezdů nástroje materiálem [-]

tab. 7 Výpočet posuvů a řezných drah

Nástroj	z [-]	$f_z$ [mm]	$f_o$ [mm]	n [-]	$s_1$ [mm]	N [-]	s [mm]	s [m]
TrimCut F6130	6	0,02	0,12	1666,667	11519,17	8	92153,33	92,15333
Razor F6120	4	0,02	0,08	2500	17278,75	6	103672,5	103,6725



Rozdíl mezi řeznými dráhami obou nástrojů je víc jak 10 metrů. Tento rozdíl je možné výrazně zmenšit díky změně posuvu na zub. Obráběcí stroj umožňuje operativně regulovat posuv na zub pomocí potenciometru. Jedná se o změny v řádu jednotek až desítek % oproti posuvu na zub, který má stroj zadáný v programu.

Proto v případě nástroje Razor F6120 dojde k navýšení posuvu na zub o 12%. Pro změněný posuv dojde k přepočítání hodnot z tabulky 7.

tab. 8 Upravený výpočet posuvů a řezných drah

Nástroj	z [-]	f <sub>z</sub> [mm]	f <sub>o</sub> [mm]	n [-]	s1 [mm]	N [-]	s [mm]	s [m]
TrimCut F6130	6	0,02	0,12	1666,667	11519,17	8	92153,33	92,15
Razor F6120	4	0,0224	0,0896	2232,143	15427,46	6	92564,73	92,56

Tímto operativním zásahem došlo ke zmenšení rozdílu mezi řeznými dráhami břitů na 0,4 metru pro jeden měřicí cyklus.

### 3.4.1 Délky řezných drah

Měření opotřebení nástrojů a vyhodnocování drsnosti obrobených povrchů bude probíhat vždy po určité řezné vzdálenosti, kterou nástroj urazí v materiálu. Čísla měření a k tomu odpovídající řezná dráha jsou uvedeny v následující tabulce č. 9

tab.9 Tabulka počtu měření a délek řezných drah

Číslo měření	Délka řezné dráhy [m]	
	TrimCut F6130	RazorF6120
1	92,15	92,56
2	184,30	185,13
3	276,45	277,69
4	368,60	370,26
5	460,75	462,82
6	552,90	555,39
7	645,05	647,95
8	737,20	740,52
9	829,35	833,08
10	921,50	925,65

### 3.5 Měřené a vyhodnocované parametry

V rámci experimentu budou měřeny a vyhodnocovány následující parametry:

- Řezné síly
- Drsnost obrobeneho povrchu
- Opotřebenění na nástroji

Naměřené hodnoty budou následně vyhodnoceny, pro měření s více hodnotami bude zpracován test spolehlivosti (95 %). Následně budou vyhotoveny grafy závislosti: řezné síly v jednotlivých časových úsecích experimentu, závislost opotřebenění nástroje na počtu obráběcích cyklů, závislost drsnosti obrobeneho plochy na počtu ořezávacích cyklů.

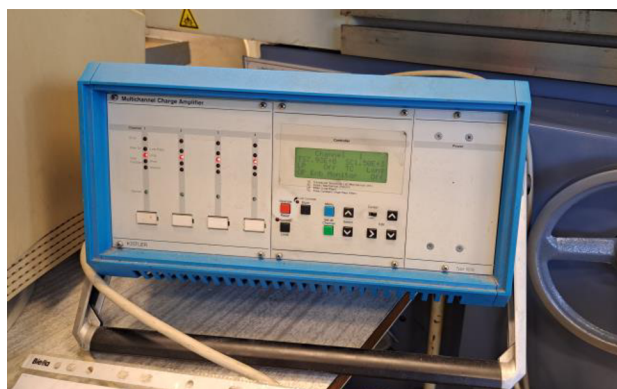
#### 3.5.1 Měření řezných sil



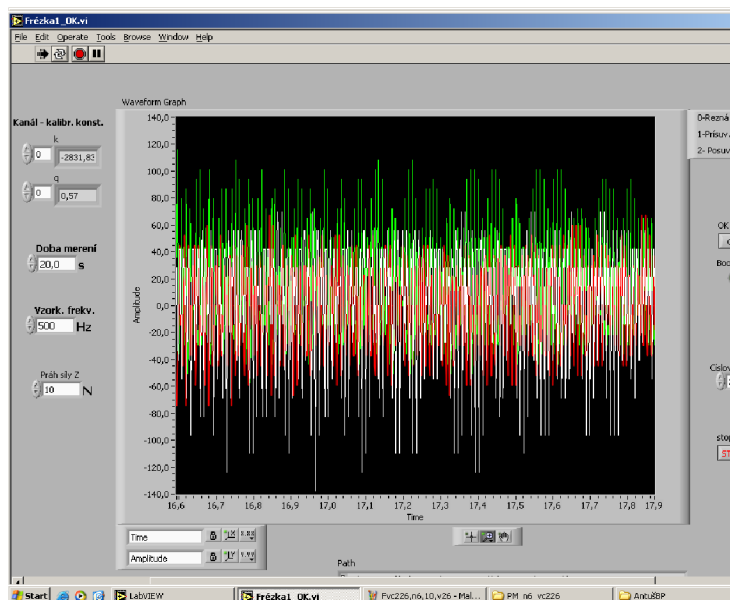
[Obr. 21] – Dynamometr se svěrákem

Získání velikostí řezných sil bude docíleno metodou přímého měření. Konkrétně bude použit dynamometr KISTLER, který měří silové působení ve všech třech složkách. Tento dynamometr funguje na principu deformace piezoelektrického členu. Ten generuje elektrický náboj lineárně úměrný velikosti silového zatížení. Dynamometr se svěrákem a upnutým materiálem a přípravkem na odsávání třísek je vidět na obrázku 21.

Vygenerovaný elektrický náboj musí být přiveden do nábojového zesilovače (viz obr. 22). Zesilovač zpracuje náboj na digitální signál, který je převeden do připojeného PC a v programu LabVIEW je vizualizován.



[Obr. 22] –Nábojový zesilovač



[Obr. 23] –Výstup z měření řezných sil

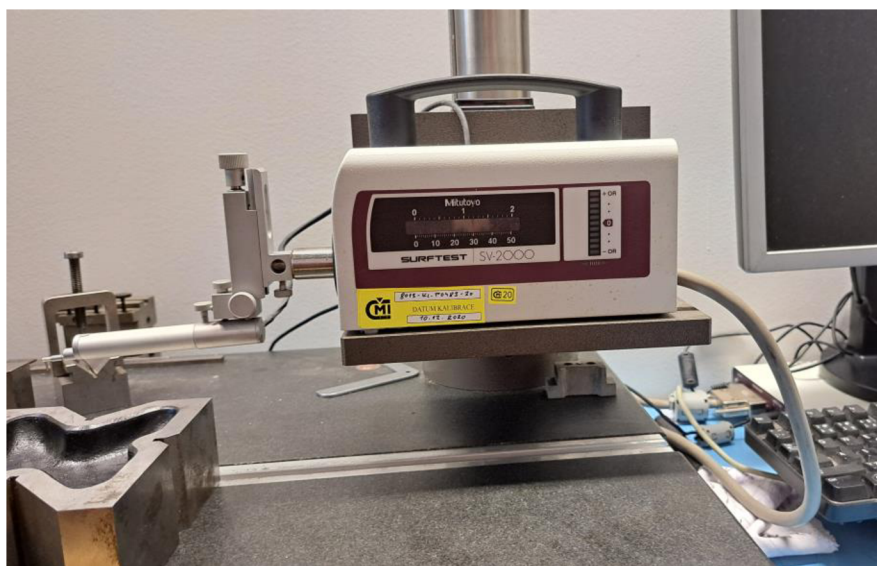
Dříve než začne experiment, bude muset být dynamometr přesně ustaven na stole obráběcího stroje. Následně bude provedena kalibrace ve směru všech třech os za pomoci digitálního siloměru, kdy se daným siloměrem zatlačí na každou z os a software dynamometru provede její kalibraci.

Samotné měření bude probíhat následovně: vždy při druhém průchodu nástroje materiálem bude aktivován dynamometr pomocí počítačového rozhraní a zároveň s ním bude aktivován nábojový zesilovač. Tím se spustí 15-ti vteřinová sekvence, během které dynamometr bude snímat všechny tři složky síly. Po uplynutí dané časové sekvence dojde v připojeném softwaru k vizualizaci naměřených sil v podobě grafu. V tomto grafu byly časové průběhy všech silových složek, které dynamometr snímal. Ukázka takového výstupu je na obrázku 23.

### 3.5.2 Měření drsností obrobených povrchů

Zjišťování drsnosti povrchu bude soustředěno na parametr R. Konkrétně budou zjišťovány parametry  $R_a$ ,  $R_z$  a  $R_t$ . K tomuto účelu bude využit kontaktní profiloměr SV-2000N2 SURFEST od výrobce MITUTOYO. Výstupem tohoto profiloměru je elektrický signál, který je přiveden do připojeného PC, kde se následně v programu Surfpack vyhodnocuje.

Přípravek k měření drsnosti obrobeného povrchu se skládá ze dvou částí. První částí je profiloměr umístěný na stojanu, který umožňuje výškové nastavení pomocí závitového zvedáku. Druhou část přípravku tvoří přesná kameninová deska, na které je umístěný malý svěrák na zafixování polohy měřeného materiálu. Fotografie profiloměru je vidět na obr. 24.



[Obr. 24] – Profiloměr SV-2000N2

Průběh měření drsnosti probíhá následovně: nejdříve je měřený vzorek umístěn do svěráku tak, aby obrobená plocha směřovala vzhůru. Následně je pomocí zvedáku umístěn profiloměr do polohy, aby se jehla výkyvného ramene dotýkala obrobeného povrchu. Přesné nastavení zvedáku lze kontrolovat podle digitální rysky na profiloměru nebo přímo v softwaru. Nejpřesnějších výsledků se dosahuje, když je ryska ustanovená přesně uprostřed. To dává výkyvnému ramenu možnost stejně velkého pohybu jak nahoru, tak dolů.

Následovně se spustí automatická měřicí sekvence, kdy se výkyvné rameno s hrotem posunou po materiálu o přesně definovanou vzdálenost. Po skončení měřicí sekvence je nutné profiloměr zvednout, aby nebyla jehla v kontaktu s materiálem, a spustit návratovou sekvenci ramene. Naměřené hodnoty se pro daný průjezd profiloměru automaticky vyhodnotily v rámci připojeného softwaru.

### 3.5.3 Měření opotřebení nástrojů

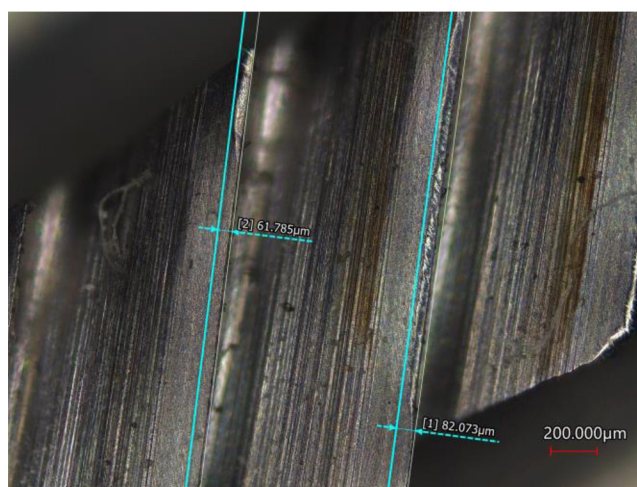
K měření opotřebení nástrojů bude použit konfokální mikroskop ze série VK-X3000 od výrobce Keyence. K měření lze použít interferometrii bílého světla, změnu přiblížení a metody založené na

konfokálním laserovém skenování. S metodou trojitého skenování lze dosáhnout přesnosti rozlišení 0,01 nanometru. Metody lze zvolit podle potřeb daného měření. Celý mikroskop je vybaven pracovním stolem, který je ovládán před počítačové rozhraní a umožňuje provádět měření přes plochu o velikosti 50×50 mm.

Pro měření opotřebenosti nástroje, bude nejdříve nutné nástroj vyjmout ze vřetene, očistit za pomoci vaty a technického líhu. Následně umístit nástroj na stůl mikroskopu a za pomoci počítačového rozhraní přiblížit pohled na břit nástroje se známkami poškození. Posléze provést sken pro ideální ostrost obrazu a pro vyhodnocení velikosti opotřebenosti budou využity digitální měřidla a editační prvky, které rozhraní nabízí. Foto mikroskopu s připojeným počítačem, který se využívá v laboratoři k vyhodnocování, je vidět na obr. 25. Foto s ukázkou pokročilého poškození nástroje je vidět na obrázku 26.



[Obr. 25] –  
Konfokální mikroskop



[Obr. 26] – Měření opotřebenosti nástroje

## 4 Realizace experimentu

V této kapitole budou popisy jednotlivých měření a zpracované dosažené výsledky. Měření se týkalo velikosti řezné síly, drsnosti obrobeného povrchu a velikost opotřebení nástrojů. Během celého experimentu nebyla použita procesní kapalina. Chlazení probíhalo pouze pasivně.

Třísky ve formě prachu byly z pracovního prostoru stroje vysávány za pomoci speciálního přípravku, který byl zkonstruován na katedře pro tyto účely a následně vytisknut na 3D tiskárně. Viz obr. 21.

### 4.1 Řezné síly

Měření probíhalo dle postupu, který je popsán v kapitole 3.5.1. Byly měřeny hodnoty řezných sil pro nástroje TrimCut F6130 a Razor F6120 pro řezné rychlosti  $v_c = 226$  m/min a  $v_c = 180$  m/min. Velikosti posuvů se řídily postupem nastíněným v kapitole 3.4. Naměřené hodnoty byly následovně statisticky zpracovány.

Důležité je poznamenat, že síla  $F_x$  odpovídá síle ve směru posuvu, síla  $F_y$  odpovídá síle ve směru přísuvu a síla ve směru osy Z  $F_z$  odpovídá řezné síle.

#### 4.1.1 Řezné síly na nástroji TrimCut F6130

tab 10. Řezné síly na nástroji TrimCut F6130, řezná rychlost 226 m/min

měření	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
1	113,5 ± 8,8	106,5 ± 8,5	137,1 ± 11,7
2	119,5 ± 5,2	129,5 ± 3,0	106,0 ± 9,9
3	140,5 ± 7,9	185,8 ± 8,0	98,3 ± 10,4
4	95,5 ± 7,0	145,0 ± 6,8	121,8 ± 4,2
5	135,8 ± 10,1	155,0 ± 3,4	157,9 ± 7,1
6	120,0 ± 3,6	139,5 ± 4,4	107,3 ± 9,3
7	124,5 ± 4,5	141,3 ± 3,7	123,5 ± 3,7
8	107,2 ± 4,5	101,7 ± 3,4	108,5 ± 10,8
9	99,5 ± 6,2	101,5 ± 5,9	96,0 ± 9,0
10	114,5 ± 3,7	74,0 ± 2,9	128,5 ± 5,2

V tabulce 10 jsou uvedeny síly, které byly vyhodnoceny z měření provedených při obrábění nástrojem TrimCut F6130 při řezné rychlosti 226 m/min. Nejvyšší dosažené hodnoty naměřených sil jsou: v ose X 140,5 N, v ose Y se jedná o hodnotu 185,75 N a v ose Z je nejvyšší hodnotou 157,9 N.

tab. 11 Řezné síly na nástroji TrimCut F6130, řezná rychlost 180 m/min

měření	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
1	$47,4 \pm 2,1$	$49,3 \pm 3,8$	$50,5 \pm 4,2$
2	$49,0 \pm 1,9$	$42,2 \pm 2,3$	$45,3 \pm 3,3$
3	$27,5 \pm 3,7$	$22,5 \pm 1,2$	$27,2 \pm 0,3$
4	$25,8 \pm 4,2$	$22,0 \pm 2,2$	$27,8 \pm 1,1$
5	$32,4 \pm 2,7$	$19,8 \pm 1,2$	$29,1 \pm 1,2$
6	$35,3 \pm 1,7$	$32,1 \pm 2,6$	$35,6 \pm 2,3$
7	$50,4 \pm 4,7$	$28,1 \pm 2,6$	$38,4 \pm 3,1$
8	$58,3 \pm 2,8$	$52,5 \pm 1,7$	$41,3 \pm 5,6$
9	$43,0 \pm 2,6$	$31,8 \pm 1,8$	$39,3 \pm 2,5$
10	$35,5 \pm 3,0$	$32,8 \pm 2,6$	$44,0 \pm 1,6$

V tabulce 11 jsou uvedeny síly, které byly vyhodnoceny z měření provedených při obrábění nástrojem TrimCut F6130 při řezné rychlosti 180 m/min. Nejvyšší dosažené hodnoty naměřených sil jsou: v ose X 58,25 N, v ose Y se jedná o hodnotu 52,5 N a v ose Z je nejvyšší hodnotou 50,5 N.

#### 4.1.2 Řezné síly na nástroji Razor F6120

tab. 12 Řezné síly na nástroji Razor F6120, řezná rychlost 226 m/min

měření	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
1	$116,0 \pm 9,7$	$74,2 \pm 2,6$	$128,8 \pm 9,6$
2	$128,3 \pm 12,4$	$113,5 \pm 2,7$	$156,8 \pm 4,4$
3	$97,0 \pm 8,3$	$161,5 \pm 2,9$	$125,5 \pm 8,6$
4	$146,8 \pm 6,7$	$116,0 \pm 3,7$	$127,0 \pm 4,1$
5	$130,8 \pm 3,1$	$119,5 \pm 3,6$	$111,8 \pm 4,8$
6	$129,0 \pm 3,7$	$112,8 \pm 3,3$	$123,8 \pm 1,3$
7	$158,0 \pm 2,1$	$127,3 \pm 4,2$	$156,0 \pm 7,8$
8	$134,5 \pm 4,1$	$135,5 \pm 5,7$	$133,8 \pm 7,0$
9	$133,5 \pm 5,6$	$165,5 \pm 16,9$	$134,5 \pm 3,3$
10	$100,3 \pm 9,9$	$111,2 \pm 4,8$	$132,0 \pm 5,0$

V tabulce 12 jsou uvedeny síly, které byly vyhodnoceny z měření provedených při obrábění nástrojem Razor F6120 při řezné rychlosti 226 m/min. Nejvyšší dosažené hodnoty naměřených sil jsou: v ose X 158 N, v ose Y se jedná o hodnotu 165,5 N a v ose Z je nejvyšší hodnotou 156 N

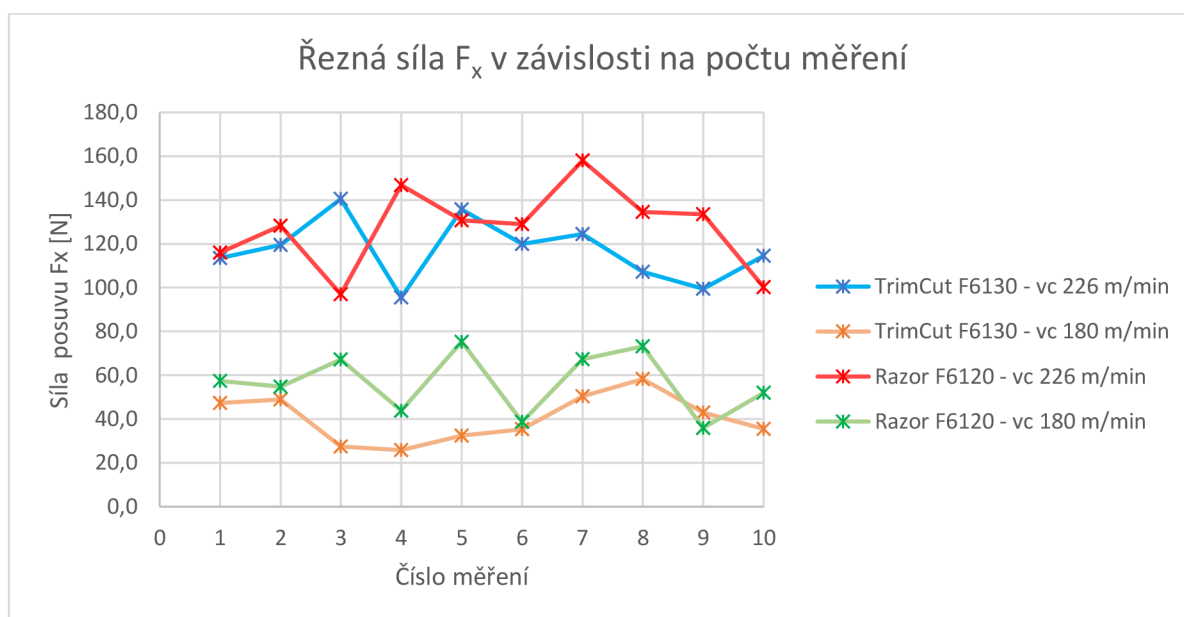


tab. 13 Řezné síly na nástroji Razor F6120, řezná rychlost 180 m/min

měření	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
1	$57,5 \pm 3,7$	$98,1 \pm 4,3$	$58,5 \pm 4,7$
2	$54,8 \pm 2,9$	$124,4 \pm 4,3$	$40,2 \pm 2,2$
3	$67,2 \pm 2,2$	$114,7 \pm 3,4$	$44,2 \pm 4,4$
4	$43,8 \pm 2,6$	$97,1 \pm 7,2$	$75,8 \pm 4,6$
5	$75,3 \pm 3,9$	$140,5 \pm 3,8$	$45,1 \pm 4,2$
6	$38,7 \pm 3,9$	$63,5 \pm 3,0$	$69,2 \pm 3,0$
7	$67,3 \pm 2,9$	$186,2 \pm 3,5$	$123,5 \pm 1,6$
8	$73,2 \pm 2,4$	$91,3 \pm 5,2$	$54,6 \pm 2,7$
9	$36,0 \pm 2,7$	$141,0 \pm 10,1$	$64,6 \pm 3,3$
10	$51,9 \pm 1,8$	$96,8 \pm 3,8$	$63,5 \pm 5,2$

V tabulce 13 jsou uvedeny síly, které byly vyhodnoceny z měření provedených při obrábění nástrojem Razor F6120 při řezné rychlosti 180 m/min. Nejvyšší dosažené hodnoty naměřených sil jsou: v ose X 75,3 N, v ose Y se jedná o hodnotu 186,2 N a v ose Z je nejvyšší hodnotou 123,5 N.

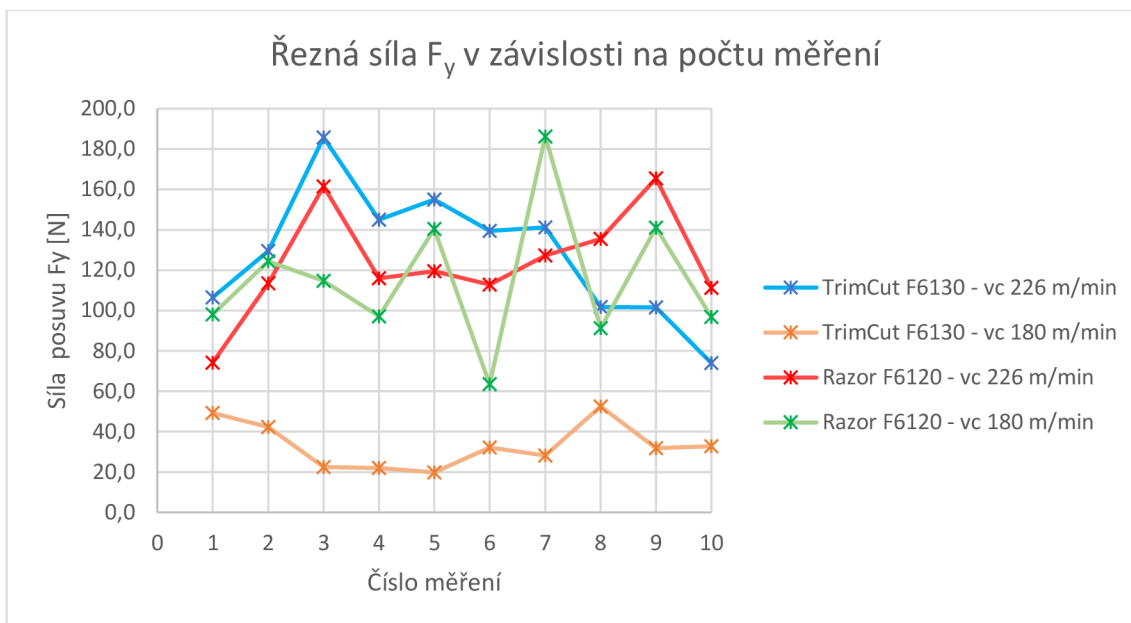
#### 4.1.3 Grafy naměřených sil



Graf 1 – Síla  $F_x$  v závislosti na počtu měřicích cyklů

Z grafu 1 je patrné, že síla posuvu  $F_x$  je závislá na řezné rychlosti. Hodnoty naměřené pro nástroje TrimCut F6130 a Razor F6120 se relativně shodují v rámci dané řezné rychlosti. Dále je patrné, že řezná rychlost má zásadní vliv na velikost dané síly, kdy pro změnu řezné rychlosti z 226 na 180 m/min dojde ke změně řezné síly ve směru posuvu na polovinu.

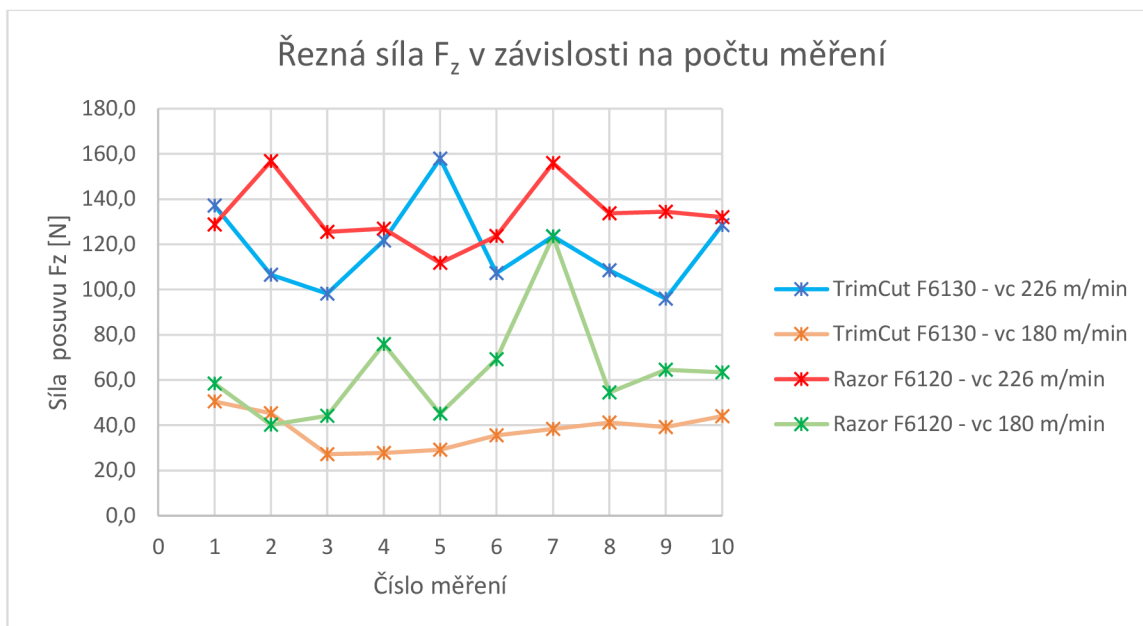




Graf 2 – Síla  $F_y$  v závislosti na počtu měřicích cyklů

V grafu 2 je vyjádřena závislost síly ve směru Y. Nejpatrnější rozdíl je zde vidět na nástroji TrimCut F6130, kdy obě měřené řezné rychlosti dosáhly velmi rozdílné hodnoty.

Naopak pro nástroj Razor F6120 je rozdíl sil pro různé řezné rychlosti minimální. Dokonce v případě měření číslo 8 vyšla síla  $F_y$  vyšší pro nižší řeznou rychlost. Oba jevy, menší rozdíly v silovém zatížení a vyšší síly při nižší řezné rychlosti, mohou být vysvětleny geometrií břitu daného nástroje, která je dána dvojicí protiběžných, dělených šroubovic. Na takto komplikované geometrii bude probíhat složitý rozpad silových účinků od obrábění.



**Graf 3 – Řezná síla  $F_z$  v závislosti na počtu měřících cyklů**

V případě grafu 3 je opět přítomný trend z grafu 1, kdy se řezné síly obou nástrojů mezi sebou relativně shodují pro danou řeznou rychlost. Nejvyšších hodnot dosáhly nástroje TrimCut F 6130 a Razor F6120, konkrétně 157,900 N a 156,750 N při řezné rychlosti 226 m/min. Naopak nejnižších hodnot řezných sil dosahoval nástroj TrimCut F6130 pro řeznou rychlost 180 m/min.

I v tomto měření došlo k výraznému skoku v případě 7. měření u nástroje Razor F6120 při řezné rychlosti 180 m/min. Jak již bylo napsáno, tato odchylka může být způsobena geometrií nástroje, chybou měřicího přístroje. Další možnou příčinou tohoto jevu je výskyt místa s vyšším měrným odporem v rámci obráběného vzorku.

## **4.2 Drsnosti na obrobeném povrchu**

Zde uvedené hodnoty byly naměřeny podle postupu uvedeného v kapitole 3.5.2. Následně došlo k jejich zpracování a vyhodnocení. Měření se opět dělí na obrábění dvojicí nástrojů TrimCut F6130 a Razor F6120. Oba nástroje byly postupně použity pro obrábění při řezných rychlostech 226 m/min a 180 m/min.

#### 4.2.1 Drsnost povrchu obroběným nástrojem TrimCut F6130

tab. 13 Drsnosti povrchu, TrimCut F6130,  $v_c = 226$  m/min

měření	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	$1,174 \pm 0,201$	$7,442 \pm 1,732$	$10,106 \pm 3,884$
2	$1,670 \pm 0,412$	$9,148 \pm 1,364$	$11,151 \pm 2,079$
3	$1,739 \pm 0,194$	$9,631 \pm 0,843$	$12,187 \pm 2,229$
4	$1,531 \pm 0,425$	$9,122 \pm 1,506$	$11,775 \pm 2,299$
5	$1,220 \pm 0,158$	$7,685 \pm 0,419$	$10,318 \pm 0,962$
6	$1,114 \pm 0,167$	$7,906 \pm 2,023$	$11,351 \pm 6,487$
7	$1,139 \pm 0,156$	$7,214 \pm 1,142$	$9,929 \pm 2,991$
8	$1,177 \pm 0,186$	$7,914 \pm 1,405$	$10,134 \pm 1,820$
9	$1,104 \pm 0,098$	$7,595 \pm 1,108$	$10,209 \pm 1,632$
10	$1,116 \pm 0,158$	$7,921 \pm 1,158$	$10,633 \pm 2,625$

V tabulce 13 jsou uvedeny drsnosti povrchů, které byly vyhodnoceny z měření povrchu vzorků obroběných nástrojem TrimCut F6130 při řezné rychlosti 226 m/min. Nejvyšší dosažené hodnoty naměřených drsností jsou:  $R_a = 1,739 \mu\text{m}$ ,  $R_z = 9,631 \mu\text{m}$  a  $R_t = 12,187 \mu\text{m}$ . Nejnižších hodnot bylo dosahováno na počátku a na konci experimentu, tomuto jevu se budu podrobněji věnovat později. Jedná se o hodnoty  $R_a = 1,104 \mu\text{m}$ ,  $R_z = 7,214 \mu\text{m}$  a  $R_t = 9,929 \mu\text{m}$ .

tab. 14 Drsnosti povrchu, TrimCut F6130,  $v_c = 180$  m/min

měření	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	$1,239 \pm 0,102$	$6,309 \pm 0,347$	$7,289 \pm 0,633$
2	$0,787 \pm 0,326$	$4,927 \pm 1,684$	$6,949 \pm 2,668$
3	$0,893 \pm 0,232$	$6,750 \pm 1,904$	$10,412 \pm 3,489$
4	$0,945 \pm 0,149$	$6,725 \pm 1,085$	$8,712 \pm 1,797$
5	$1,008 \pm 0,194$	$6,933 \pm 1,262$	$10,281 \pm 1,601$
6	$1,066 \pm 0,256$	$7,790 \pm 1,955$	$12,097 \pm 4,421$
7	$1,151 \pm 0,234$	$7,555 \pm 1,297$	$9,985 \pm 1,655$
8	$1,054 \pm 0,137$	$7,446 \pm 0,721$	$10,794 \pm 0,270$
9	$1,186 \pm 0,271$	$8,398 \pm 0,754$	$11,589 \pm 2,004$
10	$1,200 \pm 0,151$	$9,036 \pm 1,816$	$11,004 \pm 4,060$

V tabulce 14 jsou uvedeny drsnosti povrchů, které byly vyhodnoceny z měření povrchu vzorků obroběných nástrojem TrimCut F6130 při řezné rychlosti 180 m/min. Nejvyšší dosažené hodnoty naměřených drsností jsou:  $R_a = 1,239 \mu\text{m}$ ,  $R_z = 9,036 \mu\text{m}$  a  $R_t = 12,097 \mu\text{m}$ . Nejnižší dosažené hodnoty naměřených drsností povrchů jsou:  $R_a = 0,787 \mu\text{m}$ ,  $R_z = 4,927 \mu\text{m}$  a  $R_t = 6,949 \mu\text{m}$ .

#### 4.2.2 Drsnosti povrchu obrobeným nástrojem Razor F6120

tab. 15 Drsnosti povrchu, Razor F6120,  $v_c$  226 m/min

měření	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	$0,626 \pm 0,157$	$5,366 \pm 1,721$	$8,785 \pm 1,896$
2	$0,711 \pm 0,186$	$4,976 \pm 1,477$	$7,550 \pm 2,000$
3	$0,726 \pm 0,069$	$5,693 \pm 0,893$	$9,285 \pm 1,981$
4	$0,821 \pm 0,151$	$5,650 \pm 0,852$	$8,832 \pm 1,966$
5	$0,620 \pm 0,126$	$4,312 \pm 1,103$	$6,050 \pm 1,937$
6	$0,745 \pm 0,217$	$6,017 \pm 2,409$	$9,241 \pm 3,341$
7	$0,872 \pm 0,240$	$6,031 \pm 2,414$	$8,645 \pm 2,479$
8	$0,835 \pm 0,262$	$5,613 \pm 0,577$	$7,452 \pm 0,953$
9	$0,889 \pm 0,230$	$6,044 \pm 0,976$	$9,339 \pm 0,962$
10	$0,961 \pm 0,189$	$6,419 \pm 1,300$	$9,595 \pm 2,774$

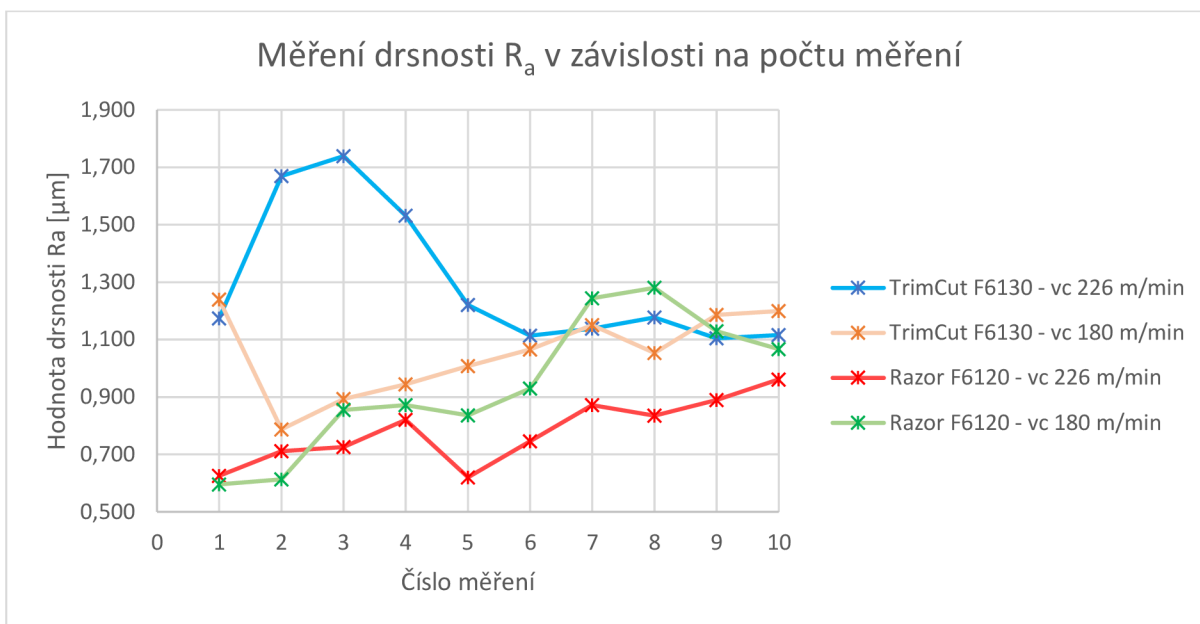
V tabulce 15 jsou uvedeny drsnosti povrchů, které byly vyhodnoceny z měření povrchu vzorků obrobených nástrojem Razor F6120 při řezné rychlosti 226 m/min. Nejvyšší dosažené hodnoty naměřených drsností jsou:  $R_a = 0,961 \mu\text{m}$ ,  $R_z = 6,419 \mu\text{m}$  a  $R_t = 9,595 \mu\text{m}$ . Nejnižší dosažené hodnoty naměřených drsností povrchů jsou:  $R_a = 0,620 \mu\text{m}$ ,  $R_z = 4,312 \mu\text{m}$  a  $R_t = 6,050 \mu\text{m}$

tab. 16 Drsnosti povrchu, Razor F6120,  $v_c$  180 m/min

měření	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	$0,596 \pm 0,250$	$4,241 \pm 1,499$	$7,203 \pm 2,689$
2	$0,614 \pm 0,146$	$4,570 \pm 1,066$	$6,361 \pm 2,247$
3	$0,855 \pm 0,306$	$5,961 \pm 1,040$	$8,426 \pm 1,520$
4	$0,872 \pm 0,272$	$6,115 \pm 1,639$	$9,078 \pm 1,981$
5	$0,836 \pm 0,080$	$6,328 \pm 1,196$	$10,557 \pm 4,017$
6	$0,930 \pm 0,127$	$7,026 \pm 0,462$	$10,244 \pm 2,735$
7	$1,244 \pm 0,576$	$9,733 \pm 1,912$	$12,529 \pm 4,242$
8	$1,280 \pm 0,403$	$8,760 \pm 1,251$	$13,821 \pm 0,427$
9	$1,129 \pm 0,170$	$7,315 \pm 1,425$	$11,176 \pm 2,755$
10	$1,067 \pm 0,240$	$7,349 \pm 1,430$	$10,223 \pm 3,503$

V tabulce 16 jsou uvedeny drsnosti povrchů, které byly vyhodnoceny z měření povrchu vzorků obrobených nástrojem Razor F6120 při řezné rychlosti 180 m/min. Nejvyšší dosažené hodnoty naměřených drsností jsou:  $R_a = 1,280 \mu\text{m}$ ,  $R_z = 9,733 \mu\text{m}$  a  $R_t = 13,821 \mu\text{m}$ . Nejnižší dosažené hodnoty naměřených drsností povrchů jsou:  $R_a = 0,596 \mu\text{m}$ ,  $R_z = 4,241 \mu\text{m}$  a  $R_t = 6,361 \mu\text{m}$ .

### 4.2.3 Grafy průběhů drsností povrchů

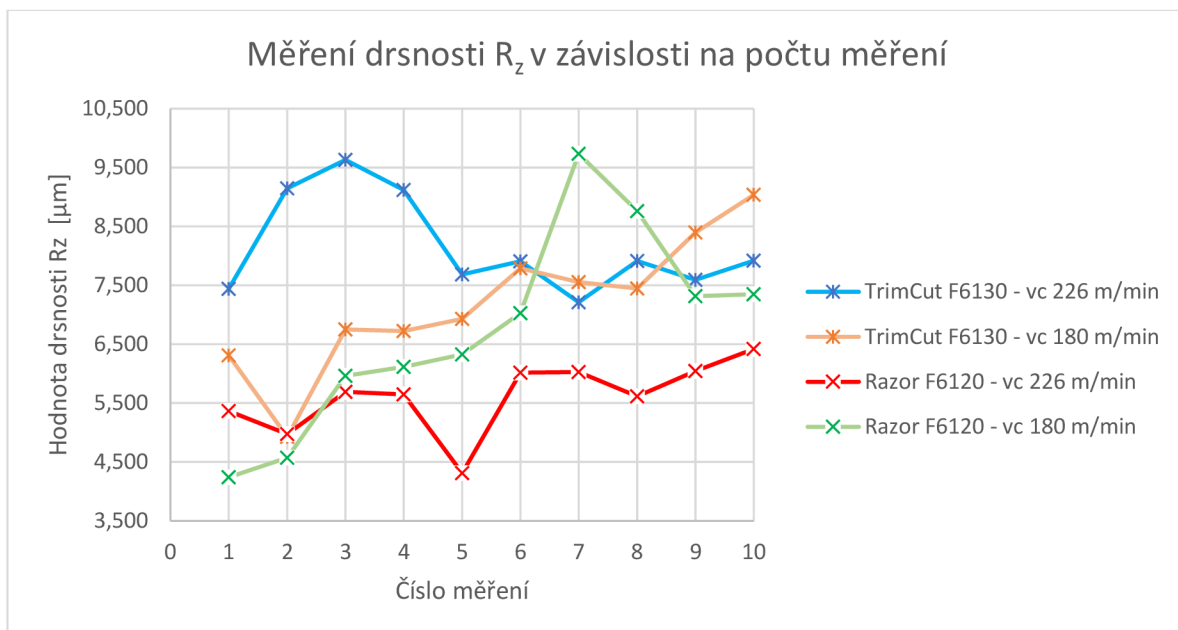


Graf 4 – Hodnota drsnosti  $R_a$  v závislosti na počtu měření

V případě nástroje TrimCut F6130 při řezné rychlosti 226 m/min dochází k zajímavému jevu pro všechny tři sledované složky drsnosti. Hodnoty drsnosti jsou stejné na začátku a na konci experimentu. V průběhu měření nastal růst a následný pokles všech tří složek. Tento jev odporuje obecné zkušenosti, že čím je břit ostřejší, tím se dosahuje menších hodnot drsnosti obrobeneých povrchů. Tento jev si lze vysvětlit tím, že po prvotních měřicích cyklech se nástroj takzvaně „zapracoval“. Zejména v kontrastu s faktem, že ten samý nástroj při řezné rychlosti 180 m/min se chová, až na první měření, naprosto standardně, tj. že s rostoucím počtem měření dochází k růstu drsnosti obrobeneé plochy. Dalším možným vysvětlením je, že řezná rychlost 226 m/min byla výrazně vyšší než doporučoval výrobce, a proto se nástroj začal chovat anomálně.

Dalším zajímavým jevem je, že pro nástroj TrimCut F6130 a řeznou rychlost  $v_c$  226 m/min se dosahuje jedněch z nejvyšších drsností, zatímco pro nástroj Razor F6120 a řezné rychlosti 226 m/min se dosahuje jedněch z nejmenších dosažených drsností obrobeneého povrchu. Tudíž spíše než velikost řezné rychlosti má na výslednou drsnost povrchu vliv volba nástroje.

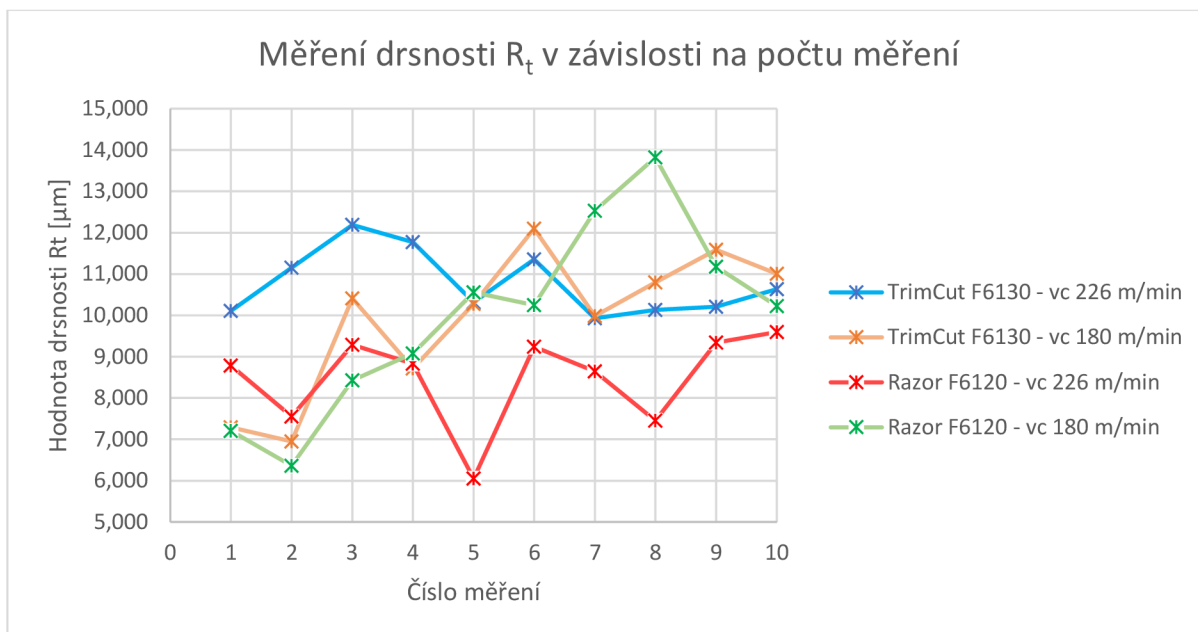
Taktéž stojí za povšimnutí, že ke konci experimentu mají průběhy drsností tendenci konvergovat k úzkému pásmu hodnot.



Graf 5 – Hodnota drsnosti  $R_z$  v závislosti na počtu měření

Podle hodnot naměřených pro  $R_z$  (Graf 5) je vidět jasná podobnost s měřením drsnosti  $R_a$ . Průběhy drsností jsou si mezi jednotlivými grafy velmi podobné. Jedinou hodnotou, která nezapadá, je 7. a 8. měření pro nástroj Razor F6120 při řezné rychlosti 180 m/min. V případě měření drsností  $R_a$  nebyl skok natolik patrný, ale v případě  $R_t$  a  $R_z$  se jedná o významné narušení trendu.

Nadále se po větší řezné dráze (pozdějších číslech měření) začne projevovat trend, kdy nejnižších hodnot drsností obrobeneho povrchu dosahuje nástroj Razor F6120 při řezné rychlosti 226 m/min. Hodnoty drsností jsou v relativní shodě při použití nástroje Razor F6120 při řezné rychlosti 180 m/min a nástroje TrimCut F6130 při řezné rychlosti 226 m/min. Nejvyšších hodnot drsností povrchu  $R_z$  dosahuje nástroj TrimCut F6130 nejdříve pro řeznou rychlost 226 m/min hned v počátku měření a za řezné rychlosti 180 m/min dosahuje vysokých hodnot ke konci měření.



Graf 6 – Hodnota drsnosti  $R_t$  v závislosti na počtu měření

Graf 6 zobrazuje závislost vyhodnocované veličiny drsnosti povrchu  $R_t$  v závislosti na řezné dráze (počtu měření). Jako u grafu 5 se zde nachází výrazný skok pro nástroj Razor F6120 při řezné rychlosti 180 m/min. Konkrétně se jedná o 7 a 8. měření, které také značí nejvyšší dosaženou hodnotu drsnosti povrchu  $R_t$ . Tímto výkyvem je překonána i hodnota anomálie nástroje TrimCut F6130 při řezné rychlosti 226 m/min, která je i zde patrná.

Nejnižších hodnot drsností dosahoval v převážné části měření nástroj Razor F6120 při rychlosti 226 m/min.

### 4.3 Opatření nástrojů

Pro měření opotřebení břitů nástrojů byla použita metodika, která je popsána v kapitole 3.5.3. Měření opotřebení bylo provedeno pro nástroje TrimCut F6130 a Razor F6120. Jednotlivá měření pro tyto nástroje byla dána ураženou řeznou vzdáleností břitů, jak je popsáno v kapitole 3.4.1. Opět byly k obrábění použity dvě různé řezné rychlosti, viz kapitola 3.4.

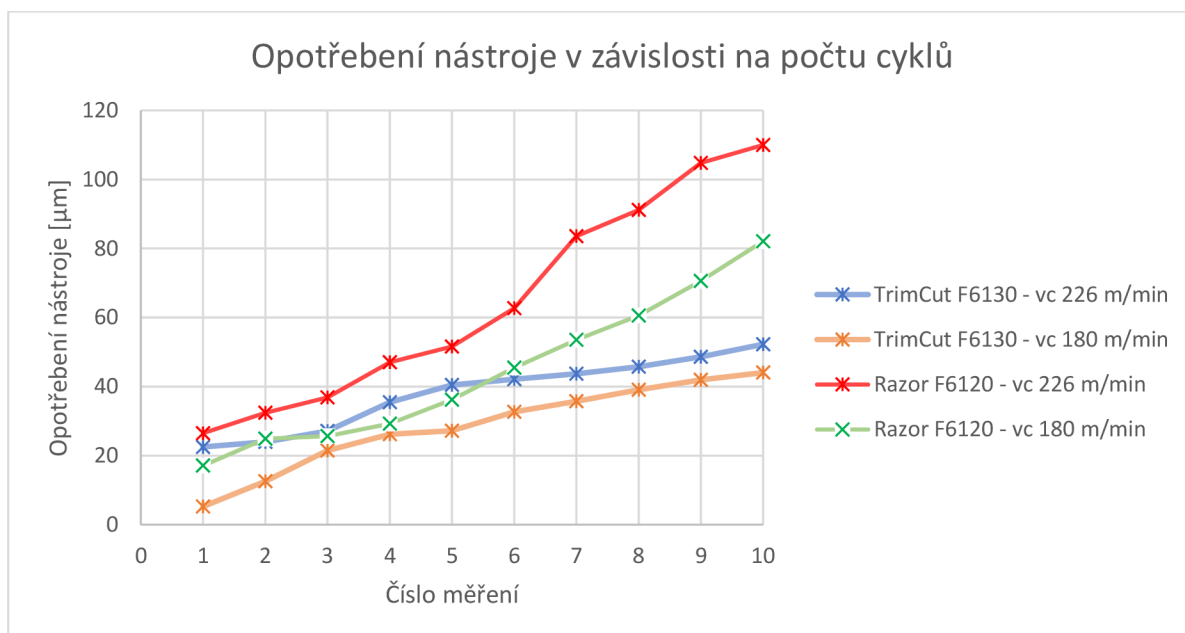
Vzhledem k faktu, že celý cyklus měření opotřebení břitů v průběhu celkové řezné dráhy proběhl pro konkrétní kombinaci nástroje a řezné rychlosti pouze jednou, nezískalo se dostatečné množství dat pro statistické zpracování nejistoty. Nicméně takto získaná data pořád mohou poskytnout cenné informace o průběhu velikosti poškození břitů v závislosti na délce řezné dráhy břitů. V tomto ohledu je třeba nadále pokračovat ve výzkumu.

tab. 17 Opotřebenění nástrojů v závislosti na počtu měřících cyklů

Opotřebenění nástroje [μm]				
TrimCut F6130			Razor F6120	
měření	$v_c = 226$ [m/min]	$v_c = 180$ [m/min]	$v_c = 226$ [m/min]	$v_c = 180$ [m/min]
1	22,513	5,238	26,493	17,059
2	23,968	12,592	32,413	24,911
3	27,135	21,412	36,887	25,653
4	35,452	26,223	47,046	29,234
5	40,484	27,192	51,558	36,218
6	42,114	32,647	62,697	45,435
7	43,664	35,692	83,579	53,489
8	45,754	39,047	91,156	60,593
9	48,572	41,95	104,754	70,571
10	52,247	44,042	109,979	82,073

V tabulce 17 jsou uvedeny velikosti opotřebenění nástrojů v závislosti na počtu měření (řezné dráze bříty). Nejmenší opotřebenění bříty vykazuje nástroj TrimCut 6130 při řezné rychlosti 180 m/min, jedná se o hodnotu 44,042 μm. Poškození bříty pro týž nástroj s řeznou rychlostí 226 m/min odpovídá hodnotě 52,247 μm.

Pro nástroj Razor F6120 jsou hodnoty poškození bříty o poznání vyšší. Pro řeznou rychlost 180 m/min se změnilo poškození o velikosti 82,073 μm a pro řeznou rychlost 226 m/min se zjistilo poškození o hodnotě 109,979 μm.



Graf 7 – Velikost opotřebenění bříty v závislosti na počtu měření



Z grafu 7 je patrné, že nezávisle na velikosti řezné rychlosti, je poškození břitů nástroje TrimCut F6130 výrazně menší než poškození břitů nástroje Razor F6120. Též je patrné, že pro nástroj TrimCut F6130 není příliš velký rozdíl v poškození od obrábění za řezné rychlosti 226 m/min nebo 180 m/min.

#### 4.4 Delaminace

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.3.3, delaminace je častý problém při třískovém obrábění kompozitních materiálů. Z tohoto důvodu je spousta náležitostí v procesu obrábění ve velké míře podřízena právě snaze eliminovat delaminace, pokud to není možné, tak je alespoň omezit. Mezi opatření vedoucí ke zmenšení delaminace lze počítat používání nižších posuvů, vyšších řezných rychlostí, volby specializovaných nástrojů s dělenými břity, nástroje s větším počtem břitů atd.

V rámci experimentu byly použity nástroje speciálně určené pro obrábění kompozitních materiálů. Zejména Razor F6120 se svým provedením břitů byl vhodnou volbou pro zamezení delaminace. Dále obě řezné rychlosti, během kterých experiment probíhal, byly velmi vysoké. Jednalo se hodnotově o tři až čtyřnásobek řezných rychlostí, které byly použity ve výzkumu, který byl citován v rešerši [23]. A jak bylo rozebráno v kapitole 3.3, tříska v případě obou nástrojů odcházela ve formě prachu.

Toto vše mělo za následek, že během experimentu byl zpozorován pouze jeden výskyt delaminace. Ta se vyskytla po dokončení 3. obráběcího cyklu nástroje TrimCut F6130 za řezné rychlosti 226 m/min. To nejspíše bylo způsobeno faktem, že nástroj není přímo určený k obrábění kompozitních materiálů s disperzí ve formě plátna ze skleněného vlákna. Také má tento nástroj pouze přímé břity, tudíž může dojít k nepřeríznutí vlákna výztuže a jejímu následnému vytažení z matrice. Výskyt delaminace koreluje s náhlým nárůstem drsnosti obroběného povrchu v tomto měření, viz kapitola 4.2.1.

Delaminaci lze vidět na obrázku 27. Měla podobu odříznutých částí výztuhy a po stranách lze vidět vytrhaná vlákna výztuhy. Podle kapitoly 2.3.3 byla tato delaminace identifikována jako kombinace I. a II. typu. Tyto dva typy delaminací se obvykle vyskytují dohromady.

Nicméně toto byl jediný případ, ve kterém došlo ke vzniku delaminace během obrábění.



Obr. 27 Ukázka delaminace (po skončení 3. cyklu)

## 5 Diskuse

Náplní této bakalářské práce je prvotní studie opotřebení při frézování kompozitů plněných skleněnými vlákny.

Název této bakalářské práce zní: „Prvotní studie opotřebení nástrojů při frézování kompozitů plněných skleněnými vlákny“.

Jako první proběhla rešerše na téma frézování a kompozitních materiálů obecně. Dále se rešerše týkala konkrétně obrábění kompozitních materiálů, typů používaných nástrojů a používaných řezných podmínek. Poté došlo k shnutí informací o vyhodnocování takového experimentu. Tyto informace jsou uvedeny v kapitole 2.

V kapitole 3 je popsána metodika experimentu, který následně proběhl. Obsah kapitoly 3 se týkal konkrétního obráběného materiálu, obráběcího stroje, nástrojů, řezných podmínek a laboratorního vybavení, které bylo použito k vyhodnocení experimentu.

Jako materiál pro obráběný vzorek byla zvolena sklotextilová deska s matricí v podobě epoxidové pryskyřice a výplní v podobě několika vrstev textilie ze skleněných vláken.

Zvolené nástroje byly podle katalogu firmy UNICUT nástroje TrimCut F6130 a Razor F6120. Oba nástroje jsou speciálně určené k obrábění kompozitních materiálů. K obrábění nebyla použita procesní kapalina.

V rámci experimentu byly měřeny následující veličiny:

- Řezné síly (ve všech směrech)
- Drsnost obrobeného povrchu
- Velikost poškození břitu nástrojů

Naměřené a vyhodnocené veličiny jsou uvedeny v kapitolách 4.1, 4.2, 4.3.

### Řezná síla

Měření řezných sil proběhlo podle metodiky popsané v kapitole 3.5.1. V této kapitole jsou uvedeny použité přístroje a použitý postup.

Nejnižší hodnota řezné síly ve směru osy X byla naměřena při obrábění nástrojem **TrimCut F6130** při řezné rychlosti **180 m/min**. Jednalo se o hodnotu **25,8 N**.

Nejvyšší hodnota řezné síly ve směru osy X byla naměřena při obrábění nástrojem **Razor F6120** při řezné rychlosti **226 m/min**. Jednalo se o hodnotu **158 N**.

Nejnižší hodnota řezné síly ve směru osy Y byla naměřena při obrábění nástrojem **TrimCut F6130** při řezné rychlosti **180 m/min**. Jednalo se o hodnotu **19,8 N**.

Nejvyšší hodnota řezné síly ve směru osy Y byla naměřena při obrábění nástrojem **TrimCut F6130** při řezné rychlosti **226 m/min**. Jednalo se o hodnotu **185 N**.

Nejnižší hodnota řezné síly ve směru osy Z byla naměřena při obrábění nástrojem **TrimCut F6130** při řezné rychlosti **180 m/min**. Jednalo se o hodnotu **27,2 N**.

Nejvyšší hodnota řezné síly ve směru osy Z byla naměřena při obrábění nástrojem **TrimCut F6130** při řezné rychlosti **226 m/min**. Jednalo se o hodnotu **157,9 N**. Nicméně pro nástroj **Razor F6120** byla při stejné řezné rychlosti zjištěna hodnota maximální řezné síly ve směru osy Z **156 N**.

Z naměřených dat se dá usoudit, že řezná rychlost má velký vliv na řeznou sílu. Tomu odpovídají zejména hodnoty sil  $F_x$  a  $F_z$ , kdy se řezné síly pro různé nástroje se stejnými řeznými rychlostmi relativně shodují.

V případě porovnání nástrojů TrimCut F6130 a Razor F6120 vůči sobě, zejména pro síly  $F_x$  a  $F_z$ , dosahoval nástroj Razor F6120 vyšších naměřených hodnot.

### **Drsnost povrchu**

Drsnost povrchu byla vyhodnocována podle metodiky popsané v kapitole 3.5.2. V této části experimentu byly měřeny a vyhodnocovány tři složky R profilu. Konkrétně se jednalo o  $R_a$ ,  $R_z$  a  $R_t$ .

Nejvyšší hodnota drsnosti povrchu  $R_a$  byla změřena při použití nástroje **TrimCut F6130** při řezné rychlosti 226 m/min. Jednalo se o hodnotu **1,739  $\mu\text{m}$** .

Nejnižší hodnota drsnosti povrchu  $R_a$  byla změřena při použití nástroje **Razor F6120** při řezné rychlosti 180 m/min. Jednalo se o hodnotu **0,596  $\mu\text{m}$** .

Nejvyšší hodnota drsnosti povrchu  $R_z$  byla změřena při použití nástroje **Razor F6120** při řezné rychlosti **180 m/min**. Jednalo se o hodnotu **9,330  $\mu\text{m}$** . Nicméně další vysoké drsnosti povrchu o hodnotě **9,631** bylo dosaženo při použití nástroje **TrimCut F6130** při řezné rychlosti **226 m/min**.

Nejnižší hodnota drsnosti povrchu  $R_z$  byla změřena při použití nástroje **Razor F6120** při řezné rychlosti **180 m/min**. Jednalo se o hodnotu **4,241  $\mu\text{m}$** .

Nejvyšší hodnota drsnosti povrchu  $R_t$  byla změřena při použití nástroje **Razor F6120** při řezné rychlosti **180 m/min**. Jednalo se o hodnotu **13,821  $\mu\text{m}$** .

Nejnižší hodnota drsnosti povrchu  $R_t$  byla změřena při použití nástroje **Razor F6120** při řezné rychlosti **226 m/min**. Jednalo se o hodnotu **6,050  $\mu\text{m}$** .

Jak je patrné z naměřených dat a dat následně zpracovaných v podobě grafů, nejnižších hodnot drsností povrchu dosahuje nástroj Razor F6120 při řezné rychlosti 226 m/min. Tento trend je zřetelně patrný ve všech vyhodnocovaných cyklech provedených po 3. měření.

Drsnosti povrchu dosažené tímto nástrojem při nižší řezné rychlosti 180 m/min jsou sice větší než při vyšší řezné rychlosti, ale pořád se jedná o menší hodnoty, než jakých bylo dosahováno nástrojem TrimCut F6130.

### **Opotřebení nástroje**

Měření velikosti poškození řezného břitu probíhalo dle metodiky popsané v kapitole 3.5.3. Nástroje byly měřeny a mezi sebou porovnávány vždy po uražení jisté řezné dráhy. Spojitost jednotlivých měření s uraženou řeznou dráhou je řešena v kapitolách 3.4.1 a 3.4.2.

Nejmenší hodnotu opotřebení břitu vykazoval po skončení experimentu nástroj **TrimCut F6130**, který obráběl řeznou rychlostí **180 m/min**. Největší naměřená hodnota poškození činila **44,042  $\mu\text{m}$** .

Druhou nejnižší hodnotu opotřebení bříty vykazoval po skončení experimentu nástroj **TrimCut F6130**, který obráběl řeznou rychlostí **226 m/min**. Největší naměřená hodnota poškození činila **52,247  $\mu\text{m}$** .

Řezné břity nástroje **Razor F6120** po uražení obdobné řezné dráhy vykazovaly o poznání vyšší poškození. Jmenovitě se jednalo o **82,073  $\mu\text{m}$**  pro řeznou rychlost **180 m/min** a **109,979  $\mu\text{m}$**  pro řeznou rychlost **226 m/min**.

Z dat získaných experimentem je zřejmé, že poškození břitů je silně závislé na typu daného nástroje. V případě stejných nástrojů a rozdílných řezných rychlostí bylo poškození pro vyšší řeznou rychlosti vždy zhruba o 20-25% vyšší než poškození pro nižší řeznou rychlost.

## Shrnutí diskuse

V průběhu experimentu bylo vyzorováno, že typ nástroje nemá příliš velký vliv na velikosti řezné síly a síly ve směru posuvu. Velikost složek těchto sil byla zejména ovlivňována velikostí řezné rychlosti (otáček vřetena).

Ovšem v případě drsnosti obrobeného povrchu se ukázala volba nástroje stejně klíčová jako volba řezné rychlosti. Nástroj Razor F6120 dosahoval menších hodnot drsností obrobeného povrchu. Též platí, že menších hodnot drsností dosahují oba nástroje v případě, že obrábí s vyšší řeznou rychlostí.

Pro nástroj TrimCut F6130 došlo v případě měření drsnosti obrobeného povrchu k anomálii. Zejména v prvních 5 měřících cyklech došlo k náhlému nárůstu a poklesu velikosti drsnosti obrobeného povrchu. Zajímavé je, že počáteční hodnota je téměř totožná s hodnotou drsnosti povrchu po onom poklesu. Celý tento jev je dobře vidět na grafech 4,5 a 6. Pokud by se jednalo o jednu hodnotu, která nezapadá do souboru naměřených dat, lze konstatovat, že se jedná o chybu měření. Nicméně v tomto případě se jedná o trend v rámci poloviny všech měření pro daný nástroj a řeznou rychlost.

Důvodů k tomuto chování může být několik. Nástroj TrimCut F6130 není přímo určený k obrábění GFRP. V rámci porovnání s nástrojem Razor F6120 dosahoval horších výsledků naměřených drsností. Je možné, že řezná rychlost 226 m/min byla příliš velká a nástroj se začal chovat nepředvídatelně.

Dalším možné vysvětlení tohoto jevu lze interpretovat z dosahovaných hodnotách. Velikosti dosahovaných drsností po tomto výkmitu jsou stejné, ne-li menší, než hodnota dosáhnutá hned na počátku s nepoškozeným nástrojem. Je možné, že nástroj se během tohoto výkmitu takzvaně „zapracoval“. V rámci prvních obráběcích cyklů došlo k prvotnímu otupení nástroje, které ovšem mělo pozitivní vliv na dosahovanou kvalitu obrobených povrchů. Další výzkum by mohl přinést hlubší porozumění tohoto jevu.

Z naměřených a následně vizualizovaných dat je zřejmé, že největší vliv na velikost poškození řezného bříty nástroje má volba konkrétního typu nástroje. Poškození na nástroji TrimCut F6130 dosahovalo polovičních hodnot než poškození na nástroji Razor F6120. Vliv řezné rychlosti na velikost poškození je též patrný, ale zdaleka není natolik významný.

Zejména u nástroje TrimCut F6130 je malý rozdíl ve velikosti poškození v závislosti na různých  
řezných rychlostech.

## 6 Závěr

Tato bakalářská práce nese název: „Prvotní studie opotřebení nástrojů při frézování kompozitů plněných skelnými vlákny“.

Celá bakalářská práce byla rozdělena na 6 nosných kapitol. V první úvodní kapitole byla nastíněna zkoumaná problematika, popsáno rozložení práce a vetyčeny cíle, kterých má bakalářská práce dosáhnout.

V druhé kapitole byla provedena rešerše současného poznání o technologii třískového obrábění, konkrétně frézování, shrnutí základního dělení kompozitních materiálů. Dále bylo obšírněji jednáno o GFRP. Následně bylo pojednáno o obrábění kompozitních materiálů z hlediska řezných podmínek, používaných nástrojů a dalších specifik této operace. V této části byla též rozebrána problematika možných komplikací, které se běžně vyskytují při obrábění kompozitních materiálů.

Dále byly v druhé kapitole rozebrány možnosti, jakým způsobem vyhodnocovat obrábění z pohledu různých sledovaných veličin.

V kapitole číslo tři byla řešena metodika experimentu. Ta se týkala konkrétních postupů, strojů, nástrojů a sledovaných veličin

Čtvrtá kapitola se týkala samotného experimentu. Zde jsou uvedeny tabulky se zpracovanými výstupy měření a jejich grafické znázornění do grafů.

V následujících dvou kapitolách proběhlo vyhodnocení výsledků měření a prezentace dosažených výsledků. Z těchto výsledků byly vyvozeny následující poznatky:

- Při měření řezných sil bylo zjištěno, že záleží na velikosti řezné rychlosti spíš než na typu nástroje. Zejména u silových složek ve směrech X a Z. V ose Y nebyly výsledky tolik prokazatelné. Nástroj Razor F6102 má velmi komplikovanou geometrii břitu, což je příčinou složitého rozkladu sil.
- Při měření hodnoty drsnosti obrobených povrchů bylo zjištěno, že primární vliv na výslednou hodnotu má volba nástroje. Ve většině měření vycházela hodnota drsnosti obrobeného povrchu menší pro nástroj Razor F6120 než pro nástroj TrimCut F6130.
- Vliv řezné rychlosti na výslednou drsnost povrchu se dá shrnout následovně: Při vyšší řezné rychlosti dosahoval, pro téměř všechna měření, nástroj Razor F6120 nejmenších hodnot drsností obrobeného povrchu. Naopak nástroj TrimCut F6130 se pro vyšší řeznou rychlost začal chovat nestandardně a dosahoval jedněch z nejvyšších naměřených hodnot drsností.
- Vyhodnocování vlivu velikosti řezné dráhy (počtu měření) na poškození břitu nástroje dopadlo následovně: poškození se zejména odvíjelo od typu nástroje. V rámci měřeného poškození na jednom konkrétním nástroji při různých řezných rychlostech bylo poškození pro větší řeznou rychlost asi o 15-25% větší než poškození při nižší řezné rychlosti.

- Při porovnání absolutní velikosti poškození dopadl nástroj TrimCut F6130 lépe než nástroj Razor F6120. Poškození na nástroji Razor F6120 dosahovalo dvojnásobných hodnot poškození, která byla změřena na nástroji TrimCut F6130.
- V případě použití nástroje Razor F6120 nedošlo k jedinému případu delaminace a v případě nástroje TrimCut F6130 se delaminace vyskytla pouze jednou.

Z těchto poznatků lze konstatovat, že pro obrábění kompozitního materiálu na bázi epoxidové pryskyřice s plnivem v podobě skleněných vláken je za daných řezných podmínek vhodný nástroj **Razor F6120**. Důvody k rozhodnutí jsou následující: za vyšších řezných rychlostí dosahoval nejmenších drsností obrobeneho povrchu a jeho provedení je speciálně určeno k obrábění GFRP.

V porovnání s nástrojem TrimCut F6130 jsou dosahované řezné síly za stejných řezných podmínek velmi podobné. Jediný parametr, kde nástroj TrimCut F6130 dosahoval lepších výsledků, je menší opotřebení břitu na podobné řezné dráze, což může být považováno v ohledu životnosti nástroje jako výhoda. Nicméně ani při menším poškození břitu nedosahoval nástroj TrimCut F6130 lepších hodnot drsností obrobeneých ploch než nástroj Razor F6120.



## 7 Seznam použitých zdrojů

- [1] KOCMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 978-80-214-1996-4.
- [2] *Základní způsoby frézování*. ELUC [online]. [vid. 2022-10-19]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1226>
- [3] VLACH, Bohumil. *Technologie obrábění a montáží*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990. ISBN 978-80-03-00143-9.
- [4] GAZDA, Jaromír. *Teorie obrábění – Řezné sily při obrábění*. První. B.m.: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, nedatováno. ISBN 80-7083-110-3.
- [5] *Opotřebení bříty*. Sandvik Coromant [online]. [vid. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/wear-on-cutting-edges>
- [6] *Opotřebení bříty*. ELUC [online]. [vid. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1203>
- [7] DAŠIĆ, Predrag, Bogdan NEDIC a R. JEČMENICA. Analysis of function approximation of the wear tools for turning of the cast iron GG-25 by nitride ceramic cutting tools. *Modelling and Optimization in the Machines Building Fields (MOCM)*. 2006, **12**, 46–60.
- [8] Měření struktury povrchu. ACCRETECH [online]. [vid. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.accretech.eu/cs/mereni-struktury-povrchu/>
- [9] Měření drsnosti. M&B Calibr, spol. s.r.o. [online]. [vid. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [10] Měření drsností povrchu. ELUC [online]. [vid. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103>
- [11] *Kontrola drsnosti povrchu*. ELUC [online]. [vid. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1102>
- [12] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [13] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [14] KORÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. 3. listopad 2021 [vid. 2023-01-18]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>

- [15] SATHISHKUMAR. Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [online]. 2014, 1258–1275. ISSN 0731-6844. doi:10.1177/0731684414530790
- [16] SHEIKH-AHMAD, Jamal. *Machining of Polymer Composites*. 1. USA: Springer, 16.4. ISBN 978-0-387-56383-1.
- [17] *Obrábění kompozitních materiálů*. MM Průmyslové spektrum. [online]. [vid. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-kompozitnich-materialu>
- [18] *Efektivní frézování kompozitů s termoplastickou maticí*. MM Průmyslové spektrum. [online]. [vid. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/efektivni-frezovani-kompozitu-s-termoplastickou-matici>
- [19] *Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů*. MM Průmyslové spektrum. [online]. [vid. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu>
- [20] DLC povlaky - Ionbond Czechia, s.r.o. *povlakovani-ionbond.cz* [online]. [vid. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://povlakovani-ionbond.cz/dlc-povlaky>
- [21] *Použití DLC povlaků (nejen) v automobilovém průmyslu*. MM Průmyslové spektrum. [online]. [vid. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pouziti-dlc-povlaku-nejen-v-automobilovem-prumyslu>
- [22] *Sandvik Coromant* [online]. [vid. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/composite-milling>
- [23] ALTIN KARATAŞ, Meltem a GÖKKAYA. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology* [online]. 2018, Composite Materials in Defence Technology, 318–326. ISSN 2214-9147.
- [24] *Problémy při obrábění kompozitních materiálů*. MM Průmyslové spektrum. [online]. [vid. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu>
- [25] MAŠEK, Petr. *Frézování kompozitních materiálů s termoplastickou maticí*. Disertační práce. Praha, 2019. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní.
- [26] KNAP, DVOŘÁČKOVÁ a KNÁPEK. Study of the Machining Process of GFRP Materials by Milling Technology with Coated Tools. *Coatings* [online]. 2022, 1354. ISSN 2079-6412.

[27] *CMX 600 V - Vertikální frézování od DMG MORI* [online]. [vid. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/vertikalni-frezovani/cmx-v/cmx-600-v>

[28] *UNICUT katalog* [online]. [vid. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.unicut.cz/download.php?fid=4719>