



Bakalářská práce

Studie opotřebení nástrojů při frézování kompozitů z uhlíkových vláken

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Jakub Antuš

Vedoucí práce:

Ing. Tomáš Knápek

Katedra obrábění a montáže

Liberec 2023



Zadání bakalářské práce

Studie opotřebení nástrojů při frézování kompozitů z uhlíkových vláken

<i>Jméno a příjmení:</i>	Jakub Antuš
<i>Osobní číslo:</i>	S19000257
<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 uhlíkovými vlákny. Shrnutí poznatků o obrábění těchto materiálů. Shrnutí poznatků o technologii frézování.
2. Volba vhodných nástrojů a řezných podmínek pro frézování karbonových kompozitů.
3. Návrh metodiky experimentů – volba nástrojů, řezných podmínek, metodika měření opotřebení nástroje, drsnosti povrchu obrobku a nástroje, měření řezných sil (popř. teploty), zkoumání delaminace obrobku.
4. Realizace experimentů
5. Vyhodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení nástroje, drsnosti povrchu, řezných sil a delaminace. Návrh vhodného nástroje a řezných podmínek.
6. Shrnutí, zhodnocení výsledků a vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování práce:

tištěná/elektronická

Jazyk práce:

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. KOČMAN, K., PROKOP, K. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2.
3. AHMAD, J. Machining of polymer composites. Boston, MA: Springer US, 2009. ISBN 978-0-387-68619-6.
4. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. Jakost obráběných povrchů. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80-7044-539-4.
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

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

L.S.

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

Obsahem bakalářské práce je studie opotřebení nástrojů při frézování kompozitů z uhlíkových vláken.

Teoretická část obsahuje základní pojmy týkající se řešené problematiky. Do této části práce jsou zahrnuty informace o poruchách obrobku, měření sil, měření drsnosti povrchu, uhlíkových vláknech a technologii frézování.

Experimentální část obsahuje informace o použitých zařízeních a metodice pro experiment. V diskuzi a v závěru jsou popsány naměřené hodnoty a vyhodnocení experimentu.

Klíčová slova: frézování, kompozitní materiály, uhlíková vlákna, řezné síly, drsnost povrchu, opotřebení nástroje.

Annotation

The content of the bachelor's thesis is a study of tool wear during the milling of carbon fiber composites.

The theoretical part includes basic concepts related to the addressed issue. This section of the thesis includes information about workpiece defects, force measurements, surface roughness measurements, carbon fibers, and milling technology.

The experimental part provides information about the used equipment and methodology for the experiment. The measured values and evaluation of the experiment are described in the discussion and conclusion.

Keywords: milling, composite materials, carbon fibers, cutting forces, surface roughness, tool wear.

Poděkování

V první řadě bych rád chtěl vyjádřit upřímné poděkování vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Tomášovi Knápkovi za jeho cenné rady, inspiraci, podporu, odborné vedení a trpělivost během psaní bakalářské práce. Též bych chtěl poděkovat panu Bc. Martinovi Váňovi za jeho přínos při implementaci praktické části do mé práce a studijnímu oddělení fakulty strojní za užitečné rady ve studiu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, přátelům a kolegům z bakalářského studia za jejich nepostradatelnou pomoc a neochvějnou oporu během celého mého studia.

Obsah

1	Úvod	11
2	Teoretická část	12
2.1	Frézování	12
2.2	Řezné podmínky při frézování	13
2.3	Řezné síly	14
2.4	Drsnost povrchu	15
2.4.1	Metody měření drsnosti povrchu.....	16
2.4.2	Základní normalizované charakteristiky drsnosti povrchu	17
2.5	Opotřebení nástroje/břítu	18
2.6	Kompozitní materiály	21
2.6.1	Matrice kompozitu	21
2.6.2	Výztuž	22
2.7	Frézování kompozitních materiálů.....	24
2.7.1	Nástroje	25
2.7.2	Delaminace kompozitních materiálů.....	26
3	Metodika experimentů	28
3.1	Materiál.....	28
3.2	Frézka CMX 600 V	29
3.3	Nástroje.....	30
3.4	Měření sil.....	31
3.5	Měření drsností	32
3.6	Měření opotřebení nástroje	33
3.7	Zvolené řezné podmínky.....	34
3.8	Delaminace.....	36
4	Experiment	37
4.1	Opotřebení	37
4.2	Drsnost	39
4.2.1	Parametr R_a	40
4.2.2	Parametr R_z	42
4.2.3	Parametr R_t	44
4.3	Řezné síly	46
4.3.1	Řezné síly v ose X	46

4.3.2	Řezné síly v ose Y	48
4.3.3	Řezné síly v ose Z	50
4.4	Delaminace vzorků materiálu	51
5	Diskuze	53
6	Závěr	55

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Význam	Jednotka
CFRP	Carbon fiber reinforced polymers	[-]
CVD	Chemical Vapour Deposition	[-]
EP	Epoxidová pryskyřice	[-]
PMC	Kompozity s polymerní matricí	[-]
PVD	Physical vapour deposition	[-]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	[-]
D	Průměr frézy	[mm]
F_x	Síla v ose X	[N]
F_y	Síla v ose Y	[N]
F_z	Síla v ose Z	[N]
L	Ujetá vzdálenost nástroje	[mm]
L_{PM}	Ujetá vzdálenost nástroje PM-TECH	[mm]
L_W	Ujetá vzdálenost nástroje WINSTAR	[mm]
R_a	Průměrná aritmetická úchylka profilu	[μ m]
R_t	Celková výška profilu	[μ m]
R_z	Nejvyšší výška profilu	[μ m]
a_e	Šířka záběru	[mm]
a_p	Hloubka záběru	[mm]
f_{min}	Minutový posuv	[mm.min ⁻¹]
f_{ot}	Posuv na otáčku	[mm]
f_{otPM}	Posuv na otáčku nástroje PM-TECH	[mm]
f_{otW}	Posuv na otáčku nástroje WINSTAR	[mm]
f_z	Posuv na zub	[mm]
n	Otáčky	[min ⁻¹]
o	Obvod kruhové výseče nástroje	[mm]
s	Ujetá řezná dráha nástroje	[m]
s_{PM}	Ujetá řezná dráha nástroje PM-TECH	[m]
s_W	Ujetá řezná dráha nástroje	[m]
v_c	Řezná rychlost	[mm.min ⁻¹]

z	Počet zubů	[-]
α	Úhel kruhové výseče	[°]

1 Úvod

Uhlíková vlákna představují nejpoužívanější vyztužující vlákna v kompozitních materiálech (označované jako CFRP). Mají mnoho výhod v porovnání s jinými běžnými materiály, jako je ocel nebo hliník. Disponují vysokou pevností a nízkou hmotností. Díky těmto vlastnostem mají široké uplatnění v různých průmyslových odvětvích. Používají se ve výrobě automobilů, letadel, sportovního vybavení, stavebních materiálů, zdravotnických prostředků a jiné.

Přes skvělé vlastnosti těchto materiálů se musejí vzít v úvahu i jejich nevýhody spojené s obráběním. Pro jejich efektivní obrábění je zásadní volit vhodné nástroje a řezné podmínky.

Bakalářská práce se zabývá problematikou opotřebení nástrojů při frézování bez procesní kapaliny CFRP kompozitů, vliv opotřebení nástroje na kvalitu povrchu materiálu a velikost řezných sil. V rámci studie jsou porovnávány dva vybrané frézovací nástroje při dvou různých řezných rychlostech za konstantních zbylých řezných podmínek.

V první části práce se představí teoretické informace spojené s tímto tématem. Jsou zde popsány základy – frézování, drsnost povrchu, opotřebení nástroje a další. Nakonec se tato část zabývá problematikou frézování kompozitních materiálů, vhodnými nástroji a vzniklými běžnými vadami tohoto materiálu obrobku.

Další částí bakalářské práce je metodika, která podrobně popisuje všechny použité stroje, nástroje a zvolené řezné podmínky. Každá kapitola této části obsahuje stručný popis provedených měření.

Nedílnou součástí metodiky je experimentální část, která na ni navazuje. V této části se porovnávají naměřené výsledky.

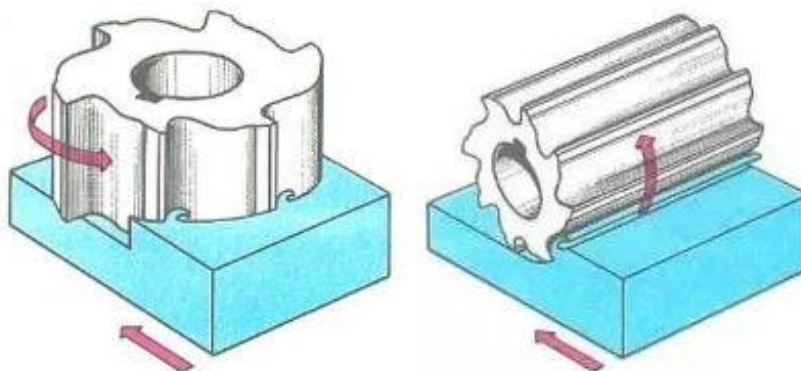
V závěru celé práce jsou zhodnoceny a popsány naměřené výsledky.

2 Teoretická část

Tato část bakalářské práce se zabývá frézováním, řeznými podmínkami při frézování, řeznými silami, drsností povrchu, opotřebením nástroje, kompozitními materiály, jejich problematice při frézování a delaminací.

2.1 Frézování

Frézování je třískové obrábění konvenčních a tvarových ploch většinou vícebřítým nástrojem, při kterém se materiál obrobku odebrává břity otáčejícího se nástroje. Hlavní řezný pohyb rotační koná nástroj a vedlejší pohyb posuvný koná obrobek nebo vřeteno s nástrojem. Každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky, řezný proces je přerušovaný. Z hlediska technologie rozlišujeme frézování čelní a frézování válcové (viz. Obr. 1). Čelní frézování se používá při práci s čelními frézami, břity jsou na obvodu a čele nástroje. Válcové frézování se uplatňuje při práci s válcovými i tvarovými frézami, břity jsou pouze na obvodu nástroje. [1]



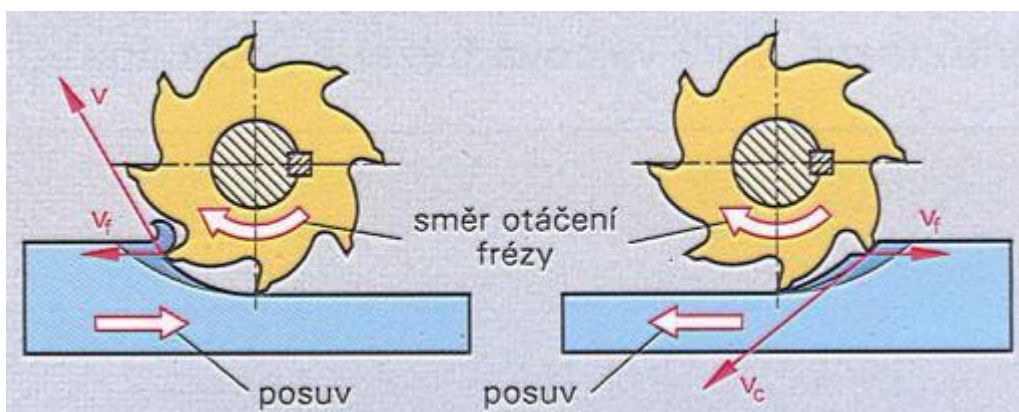
Obr. 1: Frézování čelní a válcovou frézou [2]

Dále se dělí frézování na sousledné (sousměrné) a nesousledné (protisměrné) (viz. Obr. 2).

U sousledného frézování je smysl rotace ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka řezu vzniká při vstoupení zubu frézy do obrobku. Když zub vychází ze záběru, tvoří se obrobená plocha. Řezné síly působí směrem dolů. Je vyšší trvanlivost břitu, menší drsnost obrobeného dílu, potřebný menší řezný výkon. [1]

U nesousledného frézování je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka řezu se postupně mění od nulové hodnoty do

maximální hodnoty, u níž zub frézy vychází ze záběru. K oddělování třísky dochází po určitém řezu břitu po ploše vytvořené předcházejícím zubem. Zvyšuje se opotřebení břitu. Řezná síla působí směrem nahoru a vytrhává obrobek nahoru. [1]



Obr. 2: Nesousledné a sousledné frézování [2]

2.2 Řezné podmínky při frézování

Volba řezných podmínek je závislá na druhu obráběného materiálu, materiálu břitu řezného nástroje, způsobu práce, způsobu upnutí obrobku a druhu chlazení. Jejich vhodným zvolením lze výrazně prodloužit životnost nástroje. Řezné podmínky na frézce se určují otáčkami vřetene, rychlosti posuvu stolu a hloubkou záběru. [2]

Řezná rychlost (obvodová) se určuje z

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

Kde D - průměr frézy [mm],

n – otáčky frézy (vřetene) [\min^{-1}]

Posuv na zub, vztah

$$f_z = \frac{f_{ot}}{z} = \frac{f_{min}}{n \cdot z} [mm]$$

Kde f_{ot} – posuv na otáčku [mm]

n - počet otáček [\min^{-1}]

f_{min} - minutový posuv [$mm \cdot \min^{-1}$]

z – počet zubů [-]

Hloubka záběru a_p [mm] udává odebíranou tloušťku materiálu na jeden průchod nástroje při frézování a je omezena tuhostí soustavy stroj – obrobek - nástroj. [2]

2.3 Řezné síly

Jelikož jsou řezné síly důležité pro optimalizaci obrábění (frézování) je nutné znát jejich velikost, směr a smysl. Pro správné nastavení řezných podmínek je i zásadní znát vliv změn řezných sil na proces obrábění. [3]

V průběhu řezu působí na břit řezného nástroje odporové síly, které vznikají vtlačováním břitu nástroje do obrobku a omezují nástroj v pohybu po jeho pracovní dráze, tyto síly jsou rovny silám řezání. Výslednice těchto sil se nazývá řezná síla F . [3]

Pro výpočet řezné síly je třeba znát výchozí konstanty, které platí pro konkrétní obrábění, při nichž se výpočet provádí. Výpočet se provádí pomocí exponentů a koeficientů vzatých z literatury, které ale nezaručují potřebnou přesnost výsledků. Aby se stanovily přesnější hodnoty řezných sil je nutné aplikovat měření skutečných řezných sil při obrábění. Řezná síla (její složky) se mohou měřit dvěma způsoby. [4]

- **Nepřímá metoda**

Vychází z měření příkonu stroje, nebo z krouticího momentu na vřetení stroje z něhož se řezná síla vypočítá. Parametry z měření krouticího momentu jsou přesnější než z měření příkonu stroje. Principem této metody měření je, že při stejném příkonu stroje, se porovnávají krouticí momenty při obrábění a brzdění vřetene. [4]

- **Přímá metoda**

Přímé měření řezných sil zaznamenává přístroj zvaný dynamometr (viz. Obr. 3), který je schopný měřit až tři složky řezné síly, případně i krouticí moment. Dynamometr se používá jako funkční podložka pod upínací prvky obrobku. Nejdůležitější částí dynamometru je pružný element, který se deformuje působením sil při obrábění. Tyto deformace dynamometr převádí na měřitelné veličiny. [4]



Obr. 3: Dynamometr Kistler 9257B [5]

2.4 Drsnost povrchu

Drsnost je souhrn nerovností povrchu, což jsou povrchové výškové rozdíly s malou vzdáleností, které vznikly pohybem mezi nástrojem a obrobkem ve výrobním procesu. [6]

Nepravidelnosti se dělí na mikronerovnost a makronerovnost. Mikronerovnost je způsobena typem řezného nástroje, který zanechává na materiálu stopy po obrobení. Zatímco makronerovnost se objevuje v důsledku vibrací stroje, příčinou vibrací může být kondice obráběcího stroje nebo nesprávné upnutí obrobku. Tyto nerovnosti se vzájemně překrývají a je nutné je od sebe oddělit. [6]

Jakákoli obráběcí operace má ve výrobě určitý vliv na obráběný povrch a tím ovlivní jeho drsnost. Za účelem udržení kvality vyráběných dílů se jakost povrchu stanovuje jako hodnota drsnosti. Pro její správné měření se používá přístroj zvaný profiloměr. [6, 7]

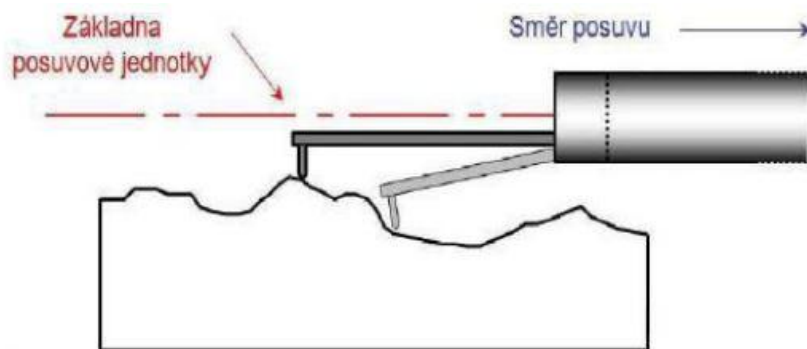
Pro dosažení požadované drsnosti povrchu je nutné zvolit správný způsob obrábění a řezné podmínky. Například běžným frézováním nebo soustružením dosáhneme drsností vyšších řádů, pro dosažení nižších drsností je nutné volit broušení povrchu a pro dosažení nejnižších drsností volíme leštění a lapování. [6]

2.4.1 Metody měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti se provádí kontaktním a bezkontaktním způsobem.

- **Kontaktní způsob měření**

Je nejstarší metodou měření drsnosti povrchu. Speciální hrot umístěný kolmo k měřenému povrchu přejíždí pomocí elektromotoru konstantní rychlostí v horizontálním směru po povrchu a snímá jeho nerovnosti. Příklad přístroje převede mechanický pohyb hrotu na elektrický signál, počítačově zpracuje a následně vyhodnotí v grafické nebo číselné podobě (viz. Obr. 4). [7]

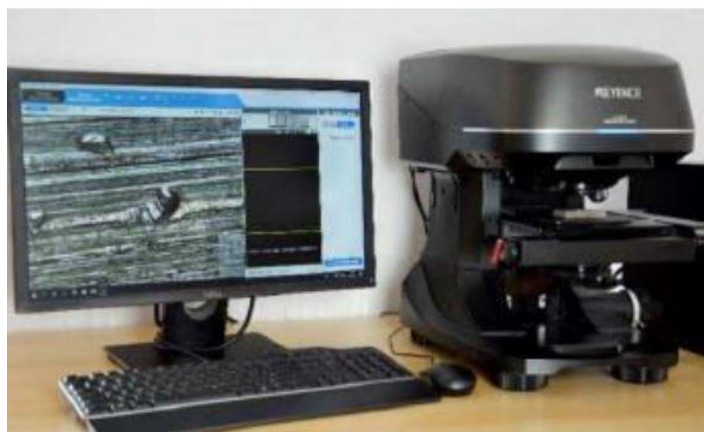


Obr. 4: Kontaktní přístroj [8]

Tato metoda není vhodná pro měkké materiály, protože při měření může dojít k poškození povrchu hrotem a i ke zkreslení výsledků. Díky jednoduchosti měřícího přístroje a jeho nenáročnosti na pracovní prostředí je obecně nejpoužívanější. [7]

- **Bezkontaktní způsob měření**

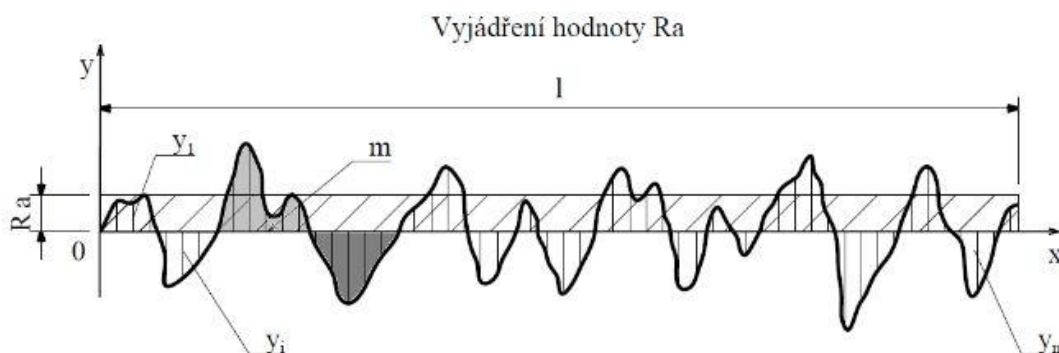
Využívá optických a laserových snímačů a je používán převážně pro laboratorní účely (viz. Obr. 5). Při použití této metody musí být měřený povrch zbaven nečistot. [7]



Obr. 5: Bezkontaktní přístroj [8]

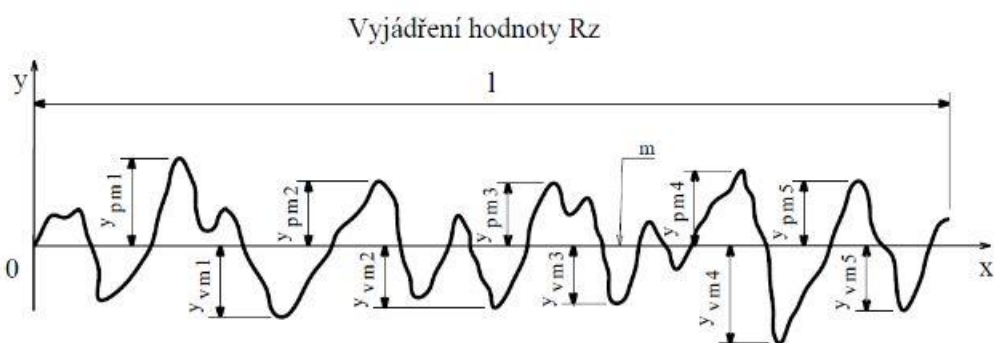
2.4.2 Základní normalizované charakteristiky drsnosti povrchu

Střední aritmetická úchylka profilu R_a – je základní měřený parametr drsnosti povrchu. Definuje se jako aritmetický průměr nejvyššího a nejnižšího výstupku v rozsahu základní délky. Patří mezi ty nejrozšířenější parametry, a proto ho lze měřit i na jednodušších měřicích přístrojích. Za to neumožňuje představu o tom, jak měřený (hodnocený) povrch ve skutečnosti vypadá. [9]



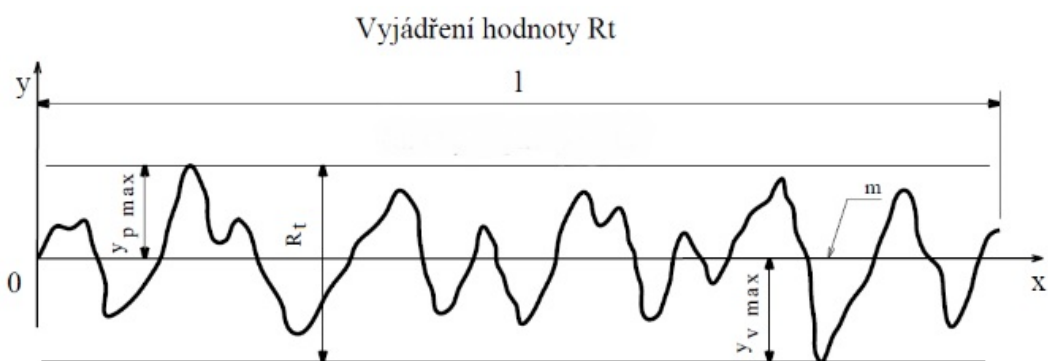
Obr. 6: Střední aritmetická úchylka profilu R_a [9]

Výška nerovností profilu z deseti bodů R_z – je střední hodnota z absolutních hodnot výšek pěti nejvyšších výstupků profilu a hloubek pěti nejnižších prohlubní profilu v rozsahu základní délky. [9]



Obr. 7: Výška nerovností profilu z deseti bodů R_z [9]

Celková výška profilu R_t – součet výšky největšího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky. [8]



Obr. 8: Celková výška profilu R_t [9]

2.5 Opotřebení nástroje/břitu

V průběhu obrábění probíhá opotřebování břitu vlivem tepelného a silového působení mezi nástrojem a obráběným materiálem. Opotřebení na břitu se projevuje změnou tvaru na čele i na jeho hřbetu a roste poloměr zaoblení ostří, tím se mění řezné úhly. [10]

- **Opotřebení na hřbetu**

Je to nejběžnější opotřebení vznikající abrazí, které způsobují tvrdé částice v obrobku. Jelikož je tento proces předvídatelný je možné předem určit životnost nástroje a tím pádem i plánovat jeho výměnu. [11]



Obr. 9: Opotřebení na hřbetu [11]

- **Opotřebení ve tvaru žlábků**

Vzniká na čele bříty a je způsobeno chemickou reakcí mezi třískou a břitem. Tímto dochází k zeslabení bříty a může dojít i k jeho lomu. [11]



Obr. 10: Opotřebení ve tvaru žlábků [11]

- **Vytváření nárůstku na břitu**

Vzniká tlakovým navařováním částic obrobku na břitovou destičku a dochází k němu během obrábění materiálů, které snadno ulpívají na břitu (nizkohlíkové oceli, korozivzdorné oceli a hliníkové slitiny). [11]



Obr. 11: Vytváření nárůstku na břitu [11]

- **Opotřebení ve tvaru vrubu**

Vzniká na čele i na hřbetu břitu a je přesně ohraničeno. Způsobuje ho tlakové navařování třísek (adheze). Často u obrábění žáruvzdorných slitin a korozivzdorných ocelí. [11]



Obr. 12: Opotřebení ve tvaru vrubu [11]

- **Plastická deformace**

Vzniká u obrábění, při kterém dochází k zahřívání břitu na vyšší teploty, než jsou určeny pro daný nástroj a následně jeho deformaci. [11]



Obr. 13: Plastická deformace [11]

- **Tepelné trhliny**

Vznikají prudkými změnami teplot břitu během obrábění (prudké ochlazení, přerušované řezy,..) [11]



Obr. 14: Tepelné trhliny [11]

- **Vylamování břítu/celkový lom**

Vzniká přetížením břítu mechanickým tahovým namáháním. Způsobuje ho například velká hloubka řezu, vysoké posuvy, vibrace, opotřebení břítu a další. [11]



Obr. 15: Vylamování břítu [11]

2.6 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou moderní technické materiály splňující určité požadavky, které u běžných materiálů jsou těžko splnitelné. Jejich složení je ze dvou nebo více různých složek do jednoho výsledného celku. Tímto vznikne unikátní materiál, který vykazuje vyšší hodnoty mechanických vlastností. Jsou to heterogenní materiály, které se zároveň liší svými vlastnostmi (mechanickými, fyzikálními a chemickými). Jednotlivé složky se vyrábějí mechanickým mísením. Nespojité, tvrdší, tužší a pevnější složka se nazývá výztuž. Funkci pojiva výztuže splňuje spojitá a poddajnější složka, nazývá se matrice, na kterou nepůsobí žádné napětí. [12]

2.6.1 Matrice kompozitu

Matrice je materiál, kterým je propojen systém partikulárních dílů a vláken tak, že po zpracování se vytvoří produkt, který je tvarově stálý. Zajišťuje geometrický tvar, přenos sil a ochranu vláken před vnějšími vlivy.

Podle použité matrice se kompozity dělí na tři obecné skupiny: kovové, keramické a polymerní matrice. [13, 14]

Polymerní matrice (PMC)

Největší využití polymerních matic je v oblasti konstrukce letadel, kde disponují nízkou hustotou a velkou měrnou pevností. Polymerní matrice se ještě rozdělují na reaktoplasty, termoplasty a elastomery. [15]

- Reaktoplasty

Reaktoplasty označované také jako termosety patří mezi nejpoužívanější polymery pro kompozitní materiály. Lze je tepelně zpracovat za specifických teplot pouze jednou. Za určité teploty vznikne nevratná chemická reakce, během níž se z lineárního viskozního stavu stává zesíťovaný stav, tento jev se značí jako vytvrzování. Vytvrzením je materiál netavitelný, nerozpustný a ztratí termoplastický charakter. Nejpodstatnější kompozity využívají reaktivní pryskyřice, jenž se vytvrzují smícháním s tvrdidly. [15, 16]

Druhy reaktivních pryskyřic:

- epoxidové pryskyřice,
- nenasycené polyesterové pryskyřice,
- vinylesterové (fenakrylátové) pryskyřice,
- fenolické pryskyřice,
- izokianátové pryskyřice.

Epoxidové pryskyřice (EP) patří mezi hodnotné reaktoplasty s dobrými mechanickými vlastnostmi, přilnavostí k podkladu, chemickou odolností a menším smrštěním při vytvrzování. Je to bezbarvá až nažloutlá látka v podobě fólie nebo tekutiny. Za normálních teplot jsou to kapalné až pevné látky, mohou obsahovat přidané látky např. rozpouštědla, která slouží k dosažení vhodné viskozity materiálu. [17]

Používají se také jako tuhá a tekutá lepidla. Tekuté lepidlo se vytvrdí přidáním tvrdidla před vlastním použitím, zatímco tuhá lepidla obsahují jisté množství tvrdidla, a tak je stačí pouze zahřát na danou teplotu. [16]

2.6.2 Výztuž

Výztuž přenáší veškerá zatížení v kompozitním materiálu. Kompozitní materiál je vyztužen částicemi nebo vlákny. [12]

Částicová výztuž se použije tam, kde je třeba zvýšit koeficient a odolnost opotřebení, při změně tepelné a elektrické vodivosti. [15]

Vláknová výztuž má větší délkové rozměry a podílí se na větším přenosu zatížení než částice. Vyztužující vlákna mají o jeden až 2 řády větší pevnost a tuhost než pojivo. Pevnost vlákna je větší než pevnost stejného materiálu

v celistvé formě. Důvodem je malý příčný průřez vláken. Při vnějším namáhání se deformují méně než polymer. Vlákná výtzuže dávají tvarovou, tahovou a ohybovou pevnost kompozitu. Tuto vlastnost ovlivňuje materiál, množství a orientace vláken v matrici, kde nejvyšší pevnost je dosažena ve směru vláken. Orientací vláken lze zásadně změnit mechanické vlastnosti kompozitu. Dochází ke vzniku smykových sil na přechodu vlákna a polymeru, které v případě adheze mezi oběma komponentami umožňují přenos veškerého napětí z matrice na vlákna. Vlákná jsou uspořádána v jednom směru, ve dvou směrech nebo chaoticky. Vláknové výtzuže mohou být krátké nebo dlouhé přes celý díl (viz. Obr. 16). [12, 18]



Obr. 16: Rozdělení vláknové výtzuže

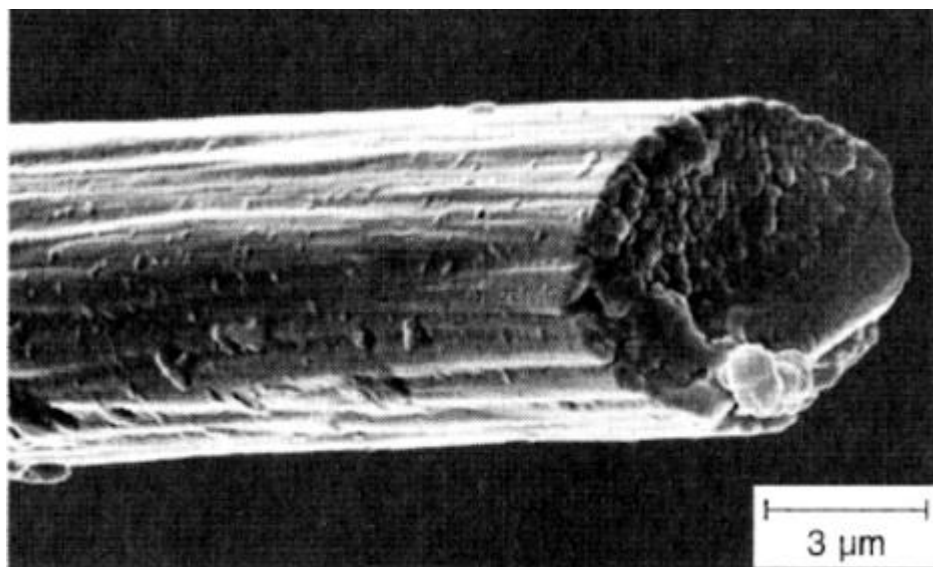
Mezi známá používaná vlákna patří:

- uhlíková,
- skelná,
- přírodní,
- aramidová,
- keramická,
- kovová,
- whiskery.

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna mají vysoké spektrum mechanických vlastností při značně nízké hustotě $1,8$ až 2 g/cm^3 s obsahem čistého uhlíku v rozmezí 90 až 95%. Jejich průměr je mezi 5 a 10 μm (viz. Obr. 17). Dynamické vlastnosti uhlíkových vláken jsou lepší než u jiných materiálů. Dále se vyznačují vysokou pevností, tuhostí, dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí. Nevýhodou je nižší tažnost a

v případě dlouhodobého skladování se snižuje jejich ohebnost, pokud dojde k jejich destrukci, vykazují značnou třišťivost. [15, 19]



Obr. 17: Snímek uhlíkového vlákna rastrovacím mikroskopem [17]

Při kontaktu uhlíku s méně ušlechtilými kovy vzniká galvanický člunek, který způsobuje elektrochemickou korozi těchto kovů, proto je potřeba kompozit s uhlíkovými vlákny oddělit od kovu nevodivým materiálem. [12, 18]

Jsou elektricky vodivá, vyznačují se extrémně vysokou pevností, tuhostí, ale nízkou tažností. Dynamické vlastnosti lepší než u ostatních materiálů. Do teploty 1000 °C jsou chemicky inertní. Mají špatnou přilnavost k matrici, a proto se pro zlepšení adheze musejí povrchově upravovat. Při ochraně vláken před oxidací mají vynikající tepelné vlastnosti. [12, 17]

2.7 Frézování kompozitních materiálů

Kompozitní materiály jsou řazeny mezi materiály s těžkou obrobiteľností. Těžká obrobiteľnost je určena specifickými technologickými znaky materiálu kompozitu. Těmi jsou především značná pevnost a tvrdost vláknových výztuží, různorodost mechanických vlastností, nízké teploty, při nichž polymerové matrice mění své vlastnosti. Při obrábění těchto materiálů je nutné tyto vlastnosti zohlednit, a proto je nutné pečlivě volit vhodné řezné podmínky a nástroje.

Mechanické vlastnosti výztuže způsobují, že je nástroj opotřebován abrazivně. Z této příčiny je vhodné používat nástroje z tvrdých a otěruvzdorných

materiálů, jako např. cermety, slinuté karbidy, řezná keramika a polykrystalický diamant.

Nevhodnou vlastností matrice je špatný odvod tepla, které se při obrábění převádí do nástroje a tím zvyšuje jeho opotřebením, zhoršení kvality obrobené plochy a ztrátu pevnosti matrice. [20, 21]

Jestliže je nutné kompozit chladit, neměly by se používat k chlazení olejové emulze, jelikož většina kompozitních materiálů je nasákavá. Dobrým příkladem je karbon, který je hodně porézní, při použití olejové emulze by se nasákl. To by způsobilo zhoršení jeho obecných vlastností a byl by tím pádem znehodnocen. V tomto případě by bylo vhodné použít chlazení vzduchem, vodou nebo speciálními roztoky. [20, 21]

Kompozity lze obrábět i bez použití emulzí – na sucho. Ale v tomto případě během obrábění vzniká velké množství nebezpečného prachu, který obsahuje mikroskopické částičky výztuže a matrice. Tento prach je velmi abrazivní a zdraví škodlivý. Jelikož jsou jako tyto výztuže používány např. keramika, sklo, které se vyznačují velikou tvrdostí, a pokud by se tento prach dostal do kluzných nebo rotačních mechanismů, způsobil by poškození stroje (abrazi styčných ploch). Z těchto důvodů je nutné frézovací prostor důkladně odsávat odsávacím systémem s vhodnou filtrací vzduchu. [20, 21]

2.7.1 Nástroje

Pro kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny se pro účinné obrábění nejčastěji volí nástroje z polykrystalického diamantu. Polykrystalický diamant se používá při vyšších řezných rychlostech a je odolnější vůči abrazi. Nesmí vzniknout přerušovaný řez, během něhož se vytváří rázy a hrozí odštípnutí břitu, to by způsobilo nenapravitelné škody na nástroji a obrobku. Nevýhoda je především jejich vysoká cena, která je ale vyvážená jejich životností.

Další a levnější variantou jsou monolitní nástroje nebo destičky ze slinutých karbidů vyráběné práškovou metalurgií. Pro vyšší životnost a snížení opotřebením těchto nástrojů se nechávají pokrýt ořezuvzdornou vrstvou (povlakovat) o tloušťce několika málo mikrometrů. Samotné povlakování se provádí buďto metodou chemické depozice z plynné fáze – CVD, nebo metodou fyzikální depozice z plynné fáze – PVD. [20]



Obr. 18: Druhy fréz SandvikCoromant [22]

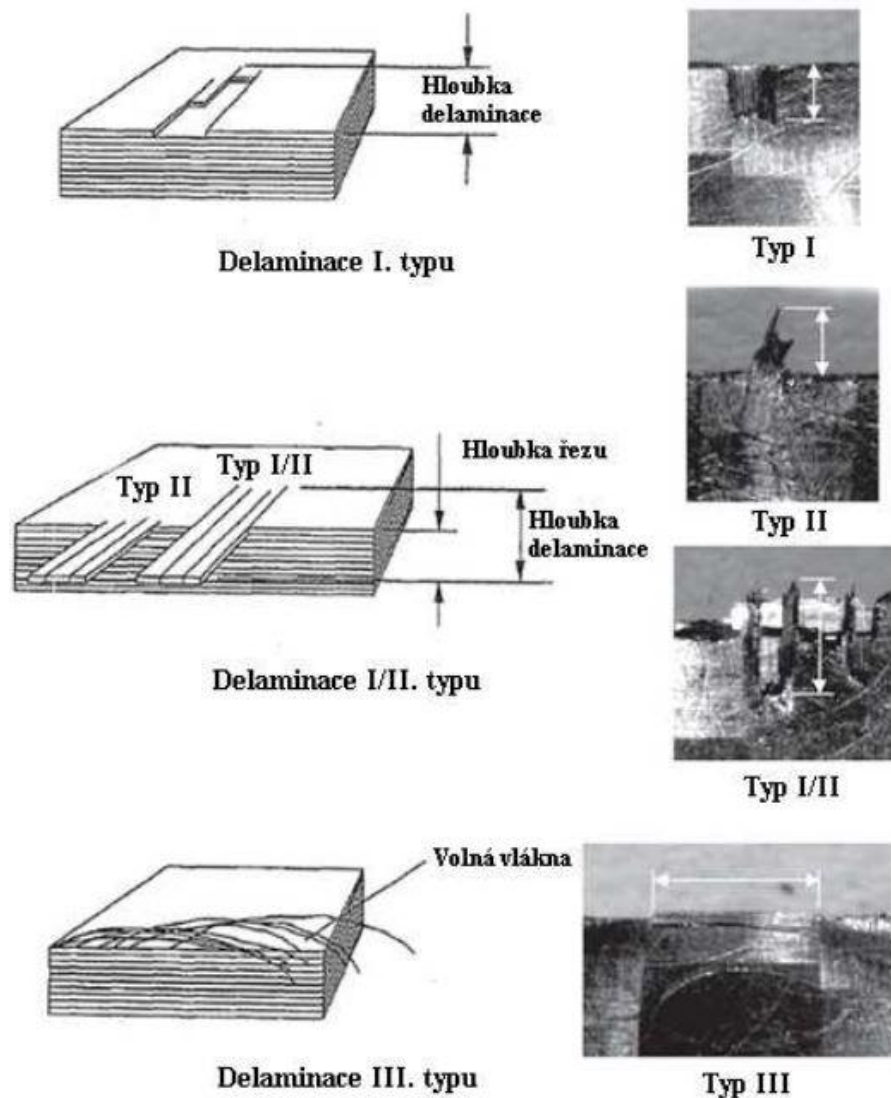
2.7.2 Delaminace kompozitních materiálů

Obráběním kompozitních materiálů může docházet k vadám, tzv. delaminaci. Delaminace se rozděluje na 3 druhy (viz. Obr. 19).

Delaminace prvního typu je vada v podobě odlamování jednotlivých vrstev za hranicí obrobeného materiálu, proto lze vadu odstranit dalším obráběním. [23]

Delaminace druhého typu je způsobena neodříznutím vláken a značí se jejich vyčníváním mimo materiál. [23]

Delaminace třetího typu je obdobná s delaminací druhého typu s tím rozdílem, že volná vlákna vznikají po směru posuvu nástroje. [23]



Obr. 19: Typy delaminací při frézování [23]

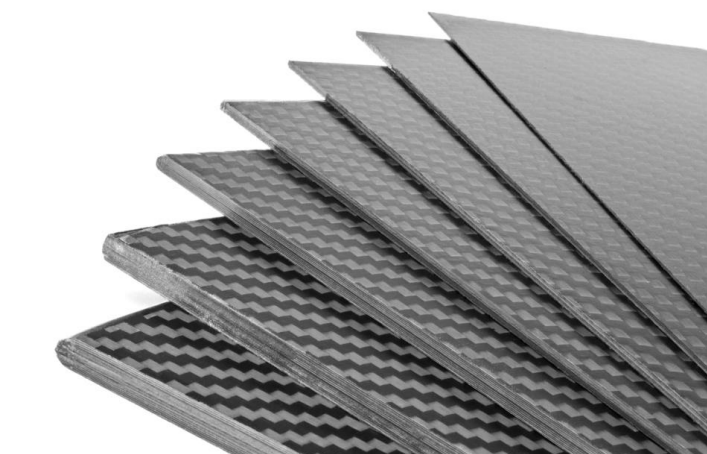
Aby se zabránilo vzniku této vady, je nutné dodržovat stanovené rezné podmínky a sledovat ostrost nástroje, případně měnit VBD. Dalším důležitým aspektem pro předcházení delaminace je volba vhodného nástroje. Při použití např. válcové spirálové frézy s pozitivní nebo negativním stoupáním bude pravděpodobně docházet k delaminaci. Jako optimální volba se proto používají kompresní frézy – s levopravým stoupáním. [21, 22]

3 Metodika experimentů

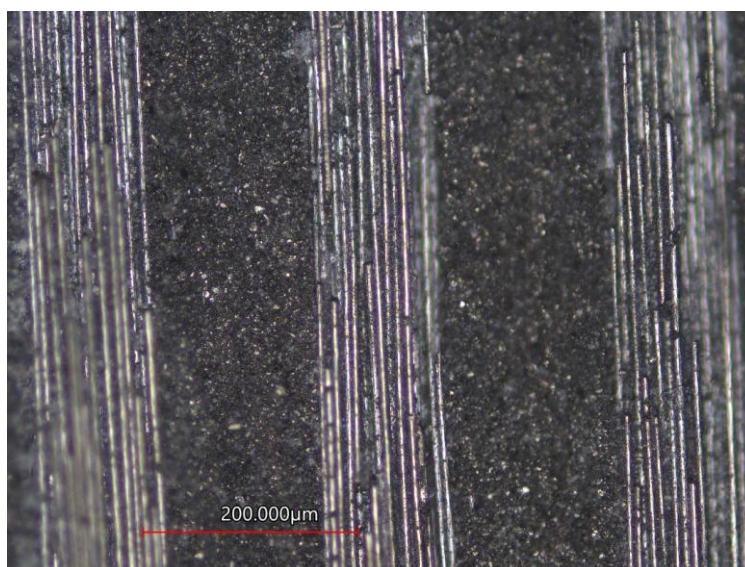
Tato část bakalářské práce je zaměřena na informace o obráběném materiálu, použitých strojích, nástrojích a jejich základních parametrech. Bude provedeno 8 po sobě jdoucích měření, ze kterých budou vyhodnocována naměřená data.

3.1 Materiál

K provedení experimentu je použita lesklá 3K CFRP deska od výrobce Kavan Rc o tloušťce 5 mm (viz. Obr. 20). Desky jsou dodávány o rozměrech 400 mm x 250 mm. Matricí u této desky je epoxidová pryskyřice. Další parametry jsou uvedeny v Tab. 1.



Obr. 20: Desky Kavan Rc [24]



Obr. 21: Vzorek CFRP v řezu

Tab. 1: Materiálové charakteristiky CFRP kompozitu

Materiálová charakteristika CFRP laminátu	
Matrice	Epoxidová pryskyřice
Typ uhlíkového vlákna	HT (vysoká houževnatost)
Typ vazby	2x2
Počet vláken na pramen	3K
Objemové tření vlákna	40 [%]
Počet vrstev	20
Tloušťka	5 [mm]
Hustota	1670 [kg/m]

3.2 Frézka CMX 600 V

Všechny frézovací operace na obráběném kompozitu se realizují na CNC frézce DMG MORI CMX 600 V (viz. Obr. 22). Parametry stroje jsou uvedeny v Tab. 2.



Obr. 22: Frézka CNC DMG MORI CMX 600 V [25]

Tab. 2: Parametry frézky DMG MORI CMX 600 V

CNC frézka DMG MORI CMX 600 V		
Charakteristika	Hodnota	Jednotky
Rozměry pracovního stolu	900 x 560	[mm]
Max. velikost obrobku (x,y,z)	600 x 560 x 510	[mm]
Max. hmotnost obrobku	600	[kg]
Rychloposuv (x, y, z)	30	[m.min ⁻¹]
Rozsah otáček vřetena	30-12000	[min ⁻¹]
Max. Výkon vřetena	13	[kW]
Hmotnost stroje	5000	[kg]

3.3 Nástroje

Během frézování obrobku budou použity dva řezné nástroje vhodné pro frézování kontur CFRP kompozitu o průměru 6 mm a délce 60 mm (viz. Obr. 23). Jako prvním řezným nástrojem se použije dokončovací ECSSF fréza s povlakem DLC, kterou vyrábí společnost Winstar (Taiwan), tato fréza disponuje 6 zuby a úhlem šroubovice 8°. Druhým použitým řezným nástrojem bude fréza s CVD povlakem, 2 zuby a úhlem šroubovice 30° od výrobce PM-TECH.



Obr. 23: Řezné nástroje
1) WINSTAR, 2) PM-TECH

Pro upnutí nástrojů budou využity tepelné upínače, které fungují na principu tepelné roztažnosti materiálu. Indukční cívkou se nahřeje pouzdro upínače, to způsobí jeho roztažení a umožní volné vložení nástroje. Poté se pouzdro upínače ochlazením smrští a zajistí svoji maximální přídržnou sílu.

3.4 Měření sil

Řezné síly budou měřeny třísložkovým dynamometrem KISTLER 9265B (viz. Obr. 24.) s nábojovým zesilovačem 5019B (viz. Obr. 25). Výsledky měření budou vyhodnocovány v grafické podobě softwarem Labwiew (viz. Obr. 26).

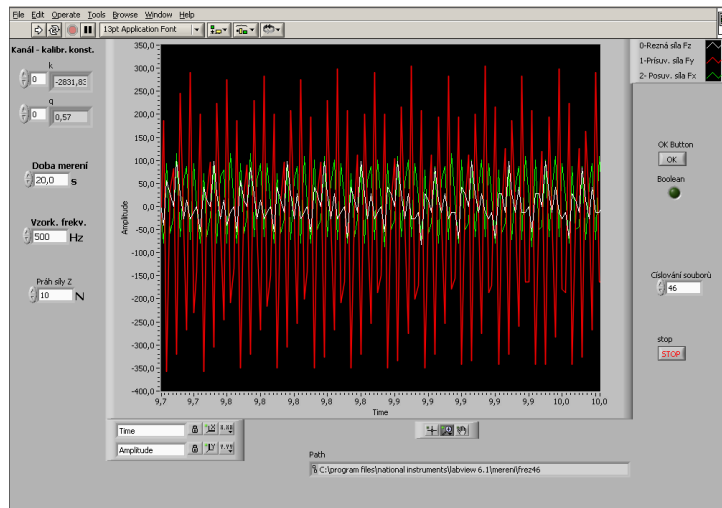
Na pracovní stůl frézky je upnut dynamometr se strojním svěrákem, který bude držet upínací přípravek s obráběným materiálem. Na upínací přípravek bude také připojena hadice pro odsávání třísek.



Obr. 24: Dynamometr KISTLER 9265B



Obr. 25: Nábojový zesilovač 5019B

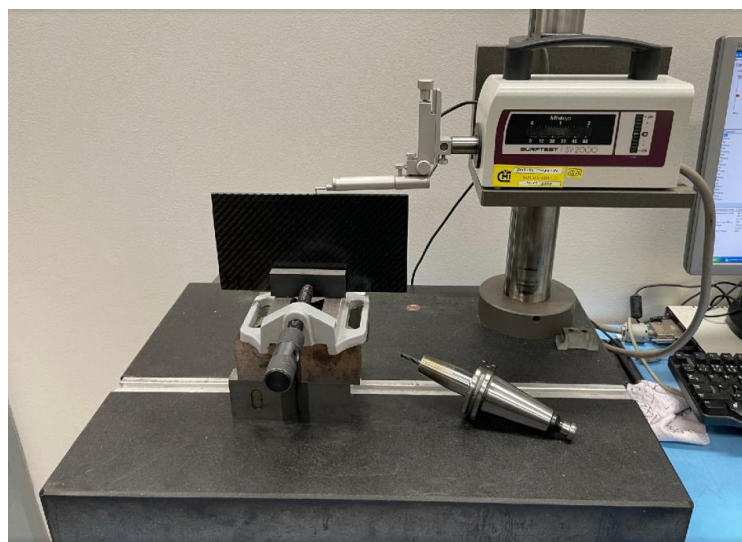


Obr. 26: Přiblížený výstup sil z měření v softwaru Labview

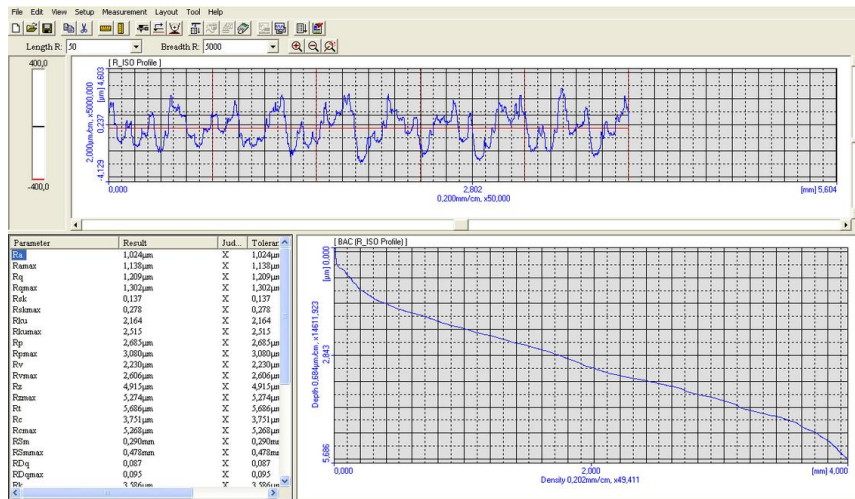
3.5 Měření drsnosti

Měření drsnosti povrchu se uskuteční na dotykovém profilometru MITUTOYO SV-2000N2 SURFTEST (viz. Obr. 27). Naměřené hodnoty jsou vyhodnocovány v softwaru Surfpack (viz. Obr. 28), který nabízí široké spektrum měřených parametrů drsnosti. Software umožňuje v souladu s různými mezinárodními normami vyjádřit ISO, DIN, ANSI a JIS.

Zkušební vzorek bude upnut obrobenou stranou k diamantovému hrotu a profilometr se bude pomocí klíčky pohybovat směrem ke vzorku. Po kontaktu vzorku s hrotem se rozsvítí dioda zajišťující správnost měření. Sledované parametry R_a , R_z a R_t .



Obr. 27: Profilometr MITUTOYO SV-2000N2



Obr. 28: Změřené hodnoty v softwaru Surfpak

3.6 Měření opotřebení nástroje

Pro zkoumání opotřebení bříty se využije konfokální mikroskop KEYENCE VK-X3000 s 3D laserovým skenováním (viz. Obr. 29). Ovládání a vyhodnocení výsledků je zprostředkováno softwarem MultiFileAnalyser.

Mikroskop realizuje zvětšení 42x až 28800x s automatickým zaostřováním a je schopen měřit objekty od milimetrů po nanometry. Disponuje kruhovým, koaxiálním nebo smíšeným osvětlením, které lze libovolně přepínat dle potřeby. Software mikroskopu poskytuje měření v osách X, Y. Například měření vzdálenosti, průměru a úhlu. [26]



Obr. 29: Konfokální mikroskop KEYENCE

Při měření opotřebení bříty na mikroskopu je důležité, aby osa nástroje byla dokonale rovnoběžná se stolem mikroskopu. Jelikož se nebude nástroj vyjímat

z upínače, bude nutné použít podkládací přípravek, který bude vytištěn na 3D tiskárně. Tím bude zaručena rovnoběžnost osy nástroje, který bude upnut v upínači (viz. Obr. 30). Tímto způsobem budou zajištěny spolehlivé a nezkršené výsledky měření opotřebení bříty.



Obr. 30: Nástroj s upínačem ustavený v přípravku

3.7 Zvolené řezné podmínky

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.2, správná volba řezných podmínek je klíčová pro prodloužení životnosti nástrojů. Aby nástroje mohly být porovnávány, je potřeba zaručit stejné nebo alespoň podobné velikosti řezných drah obou nástrojů (s). Vzorek je obráběn konstantním posuvem na zub $f_z = 0,02$ mm, hloubkou záběru $a_p = 5$ mm (tloušťka materiálu) a šířkou záběru $a_e = 5$ mm. U obou nástrojů se porovnávají dvě řezné rychlosti (226;180). Všechny tyto informace jsou shrnuty v Tab. 3.

Tab. 3: Řezné podmínky

Řezné podmínky pro frézování				
Nástroj	f_z [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	v_c [m/min]
PM-TECH	0,02	5	5	(226;180)
WINSTAR				

Úhel záběru nástroje:

$$\alpha = 131,89 [^\circ]$$

Výpočet obvodu kruhové výseče nástroje:

$$o = \frac{\pi}{180} \cdot \alpha \cdot \frac{D}{2} = \frac{\pi}{180} \cdot 131,89 \cdot \frac{6}{2} = 6,91 \text{ [mm]}$$

Zvolí se ujetá vzdálenost pro nástroj WINSTAR a PM-TECH:

$$L_W = 2000 \text{ [mm]}$$

$$L_{PM} = 800 \text{ [mm]}$$

Aby se řezné dráhy co nejvíce shodovaly, musí se na frézce při obrábění nástrojem PM-TECH otočit potenciometrem o 20 % (navýšit posuv na zub).

Posuv na otáčku:

$$f_{otW} = z \cdot f_z = 6 \cdot 0,02 = 0,12 \text{ [mm]}$$

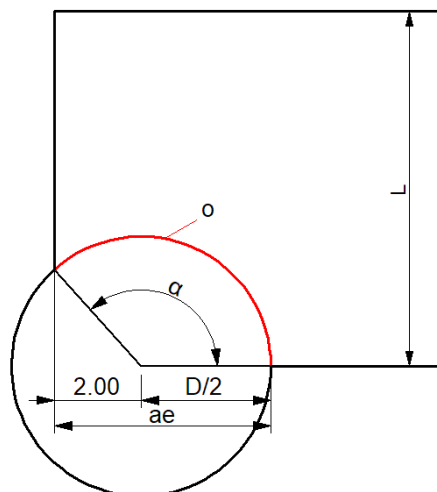
$$f_{otPM} = z \cdot f_z = 2 \cdot (0,02 \cdot 1,2) = 0,048 \text{ [mm]}$$

Ujetá řezná dráha nástroje:

$$s_W = \frac{o \cdot L_W}{f_{otW}} = \frac{6,91 \cdot 2000}{0,12} = 115166 \text{ [mm]} = 115,2 \text{ [m]}$$

$$s_{PM} = \frac{o \cdot L_{PM}}{f_{otPM}} = \frac{6,91 \cdot 800}{0,048} = 115166 \text{ [mm]} = 115,2 \text{ [m]}$$

Pro jedno měření vychází pro oba řezné nástroje stejná řezná dráha $s = 115,2 \text{ [mm]}$.



Obr. 31: Kruhová výseč nástroje

3.8 Delaminace

Pro zkoumání delaminace vzorku se použije konfokální mikroskop KEYENCE VK-X3000 s 3D laserovým skenováním, stejně jako při vyhodnocování opotřebení břitu v kapitole 3.6. Vzorky budou zkoumány po ukončení všech předchozích měření pro oba nástroje.

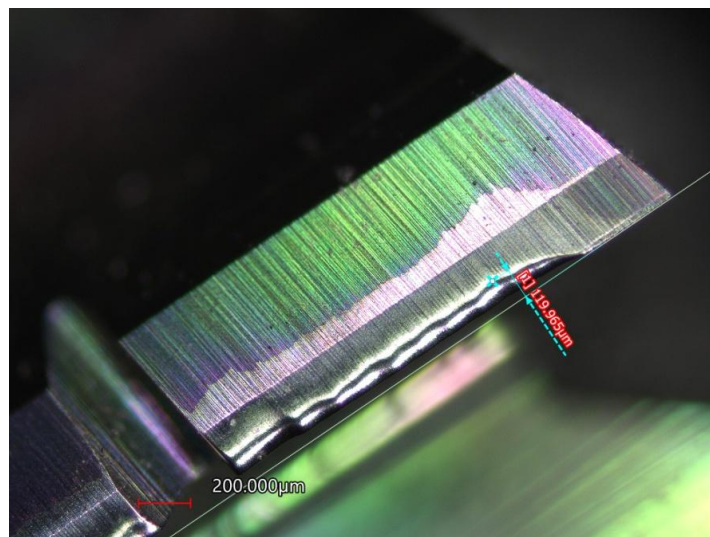
4 Experiment

Tato kapitola se zaměřuje na stručný popis měření v několika klíčových oblastech spojených s frézováním. Zahrnuje informace o naměřených silách při frézování, drsnostech povrchu vzorku a opotřebení nástroje.

Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, proběhlo 8 měření bez použití procesní kapaliny. Přičemž se použily dva řezné nástroje a ke každému z nich dvě řezné rychlosti. Všechny naměřené hodnoty byly vyhodnocovány za pomoci softwaru Excel.

4.1 Opotřebení

Jedním ze základních měřených parametrů je opotřebení nástroje v závislosti na jeho odjeté dráze při frézování (viz. Obr. 32).



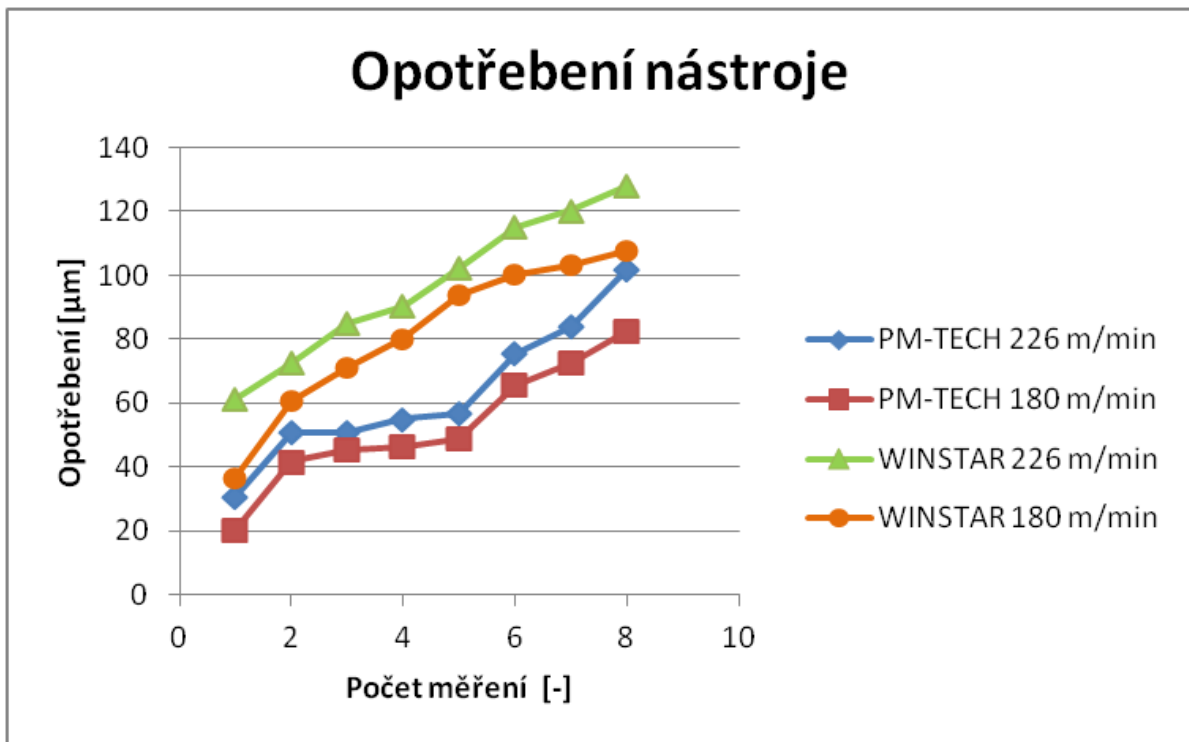
Obr. 32: Měření opotřebení břitu

Tab. 4: Opotřebenění nástroje

Opotřebenění nástroje				
Nástroj	PM-TECH		WINSTAR	
	v_c [m/min]		v_c [m/min]	
	226	180	226	180
Měření	opotřebenění [μm]		opotřebenění [μm]	
1	30,669	20,132	61,151	36,508
2	50,677	41,685	72,586	60,667
3	50,979	45,233	84,891	71,212
4	55,012	46,2	90,442	80,228
5	56,8	48,691	102,218	93,622
6	75,324	65,473	114,876	100,347
7	83,906	72,654	120,277	103,129
8	101,938	82,551	128,067	107,493

Nejvyšší celkové opotřebenění **128,067 μm** bylo naměřeno u šestizubého nástroje **WINSTAR** při $v_c = 226$ m/min.

Nejnižší celkové opotřebenění **82,551 μm** bylo naměřeno u dvouzubého nástroje **PM-TECH** při $v_c = 180$ m/min.



Obr. 33: Opotřebení nástroje

Údaje z Tab. 4 jsou přeneseny do grafu Obr. 33, který vizuálně zobrazuje naměřené hodnoty. Je zde velmi dobře vidět opotřebení jednotlivých nástrojů v závislosti na odjeté dráze při frézování.

Z grafu vyplývá, že nástroj WINSTAR se šesti zuby vykazuje při obou řezných rychlostech vyšší opotřebení než nástroj PM-TECH se dvěma zuby. Při vyšší řezné rychlosti jsou oba řezné nástroje více opotřebovány. To znamená, že vyšší řezná rychlost způsobuje větší opotřebení břitu nástroje.

4.2 Drsnost

Dalším důležitým parametrem bylo měření hodnot drsností R_a , R_z a R_t povrchu vzorku po jeho obrobení. V každém měření parametru drsnosti bylo vzato 5 hodnot, z nichž je zapsán do tabulek vážený aritmetický průměr s nejistotou měření.

4.2.1 Parametr R_a

Tab. 5: Parametr drsnosti R_a

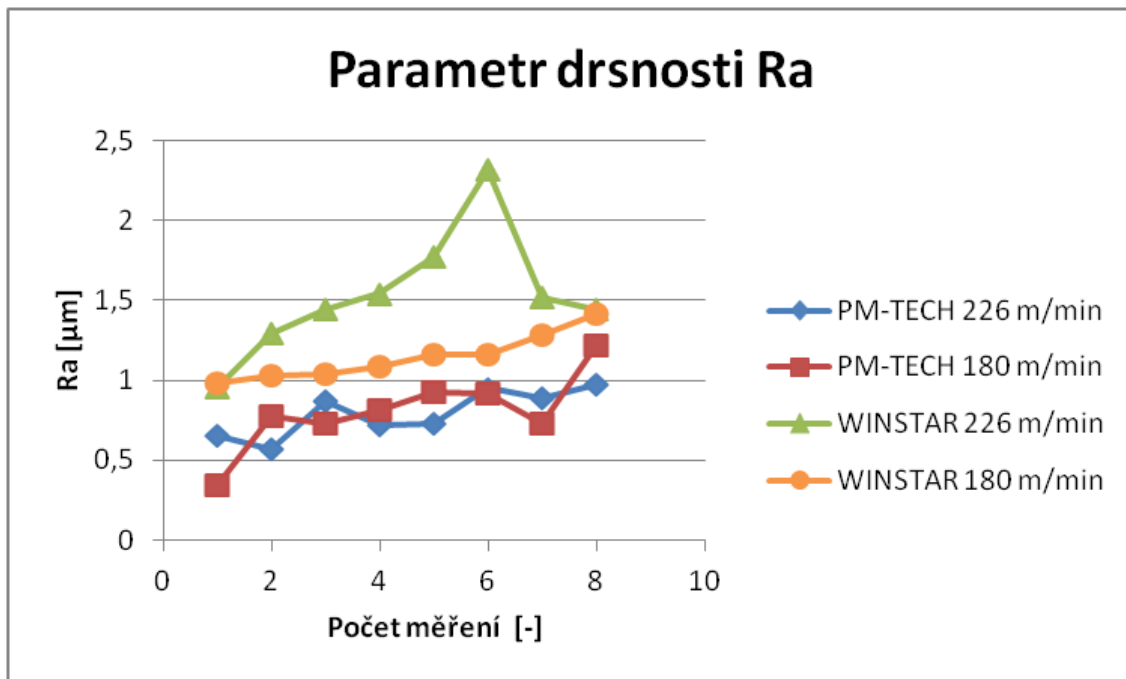
Parametr drsnosti R_a				
Nástroj	PM-TECH		WINSTAR	
v_c [m/min]	226	180	226	180
Měření	R_a [μm]			
1	0,658 ± 0,264	0,343 ± 0,241	0,956 ± 0,132	0,986 ± 0,205
2	0,570 ± 0,188	0,776 ± 0,514	1,291 ± 0,170	1,027 ± 0,281
3	0,872 ± 0,205	0,727 ± 0,136	1,442 ± 0,317	1,036 ± 0,131
4	0,722 ± 0,486	0,811 ± 0,131	1,542 ± 0,267	1,084 ± 0,136
5	0,729 ± 0,429	0,924 ± 0,128	1,773 ± 0,839	1,164 ± 0,236
6	0,950 ± 0,199	0,921 ± 0,287	2,316 ± 0,377	1,161 ± 0,258
7	0,882 ± 0,433	0,727 ± 0,256	1,520 ± 0,922	1,286 ± 0,390
8	0,974 ± 0,273	1,221 ± 0,285	1,440 ± 0,356	1,417 ± 0,244

Vzorek po obrobení nástrojem **PM-TECH** při $v_c = 226$ m/min měl nejvyšší parametr $R_a = 0,974 \mu\text{m}$ a nejnižší parametr $R_a = 0,570 \mu\text{m}$.

Vzorek po obrobení nástrojem **PM-TECH** při $v_c = 180$ m/min měl nejvyšší parametr $R_a = 1,221 \mu\text{m}$ a nejnižší parametr $R_a = 0,343 \mu\text{m}$.

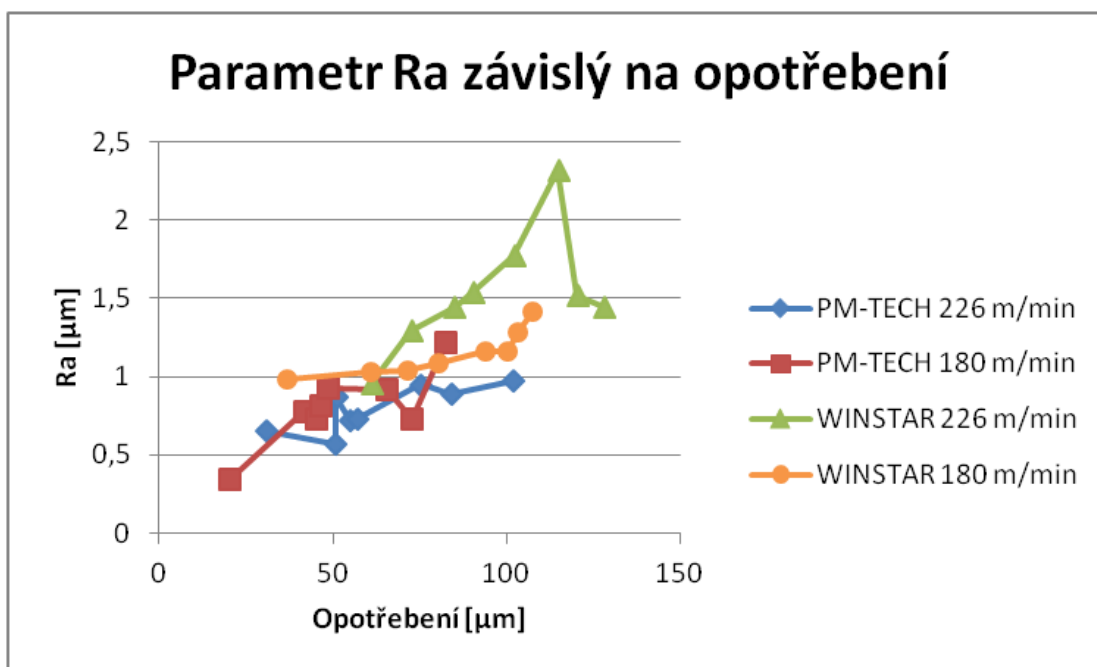
Vzorek po obrobení nástrojem **WINSTAR** při $v_c = 226$ m/min měl nejvyšší parametr $R_a = 2,316 \mu\text{m}$ a nejnižší parametr $R_a = 0,956 \mu\text{m}$.

Vzorek po obrobení nástrojem **WINSTAR** při $v_c = 180$ m/min měl nejvyšší parametr $R_a = 1,417 \mu\text{m}$ a nejnižší parametr $R_a = 0,989 \mu\text{m}$.



Obr. 34: Parametr drsnosti Ra

Z grafu vyplývá, že parametry drsnosti vzorku R_a rostly u všech řezných nástrojů téměř lineárně, výjimkou je WINSTAR s vyšší řeznou rychlostí. Je také patrné, že vzorek obráběný nástrojem PM -TECH dosahuje nižších hodnot drsnosti již od počátku měření.



Obr. 35: Parametr Ra závislý na opotřebení

Tento graf znázorňuje, jak dosažená drsnost materiálu závisí na opotřebení jednotlivých nástrojů.

Z grafu lze určit, že parametry drsností vzorku nástrojem PM-TECH při $v_c = 226$ m/min a nástrojem WINSTAR při $v_c = 180$ m/min dosahují téměř shodných drsností povrchu při zvyšujícím se opotřebení nástrojů.

4.2.2 Parametr R_z

Tab. 6: Parametr drsnosti R_z

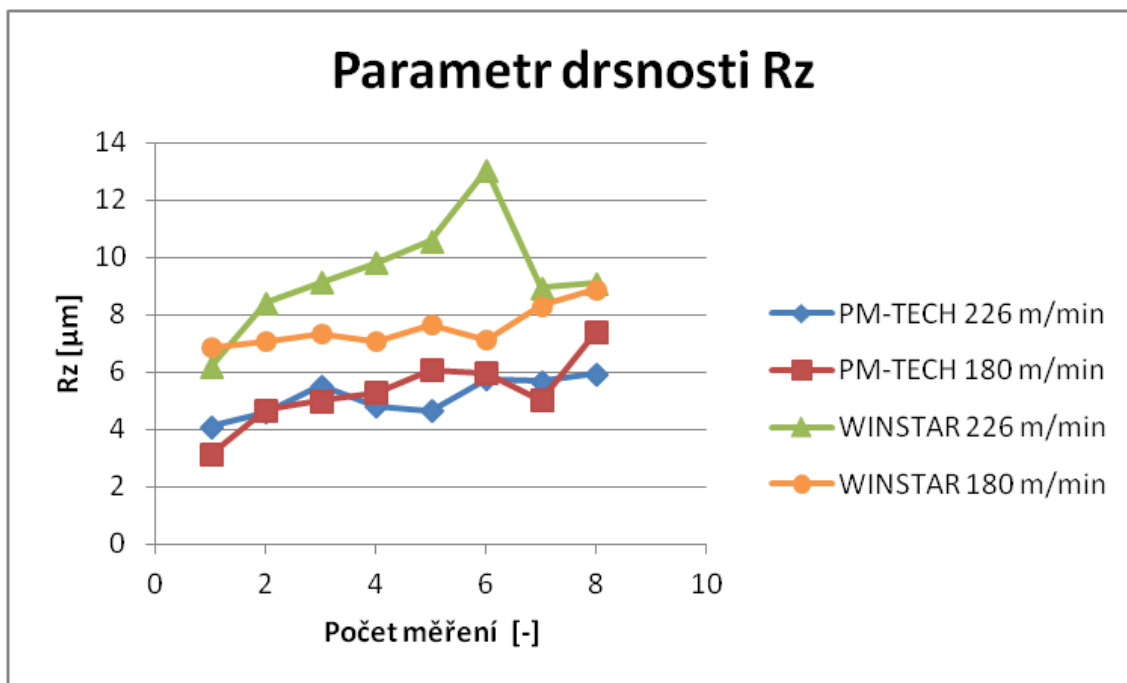
Parametr drsnosti R_z				
Nástroj	PM-TECH		WINSTAR	
v_c [m/min]	226	180	226	180
Měření	R_z [μm]			
1	4,107 ± 0,836	3,145 ± 1,373	6,196 ± 1,254	6,863 ± 1,452
2	4,596 ± 1,528	4,676 ± 1,950	8,418 ± 2,538	7,076 ± 1,275
3	5,517 ± 0,788	5,000 ± 1,364	9,132 ± 2,774	7,338 ± 1,054
4	4,819 ± 1,863	5,275 ± 0,552	9,812 ± 1,644	7,082 ± 1,052
5	4,643 ± 1,422	6,093 ± 1,194	10,577 ± 5,094	7,660 ± 2,093
6	5,758 ± 0,841	5,965 ± 1,958	13,054 ± 1,945	7,138 ± 1,243
7	5,689 ± 2,066	5,024 ± 1,298	8,936 ± 5,161	8,310 ± 2,559
8	5,949 ± 1,154	7,410 ± 1,393	9,107 ± 2,466	8,886 ± 0,861

Vzorek po obrobení nástrojem **PM-TECH** při $v_c = 226$ m/min měl nejvyšší parametr $R_z = 5,949 \mu\text{m}$ a nejnižší parametr $R_z = 4,107 \mu\text{m}$.

Vzorek po obrobení nástrojem **PM-TECH** při $v_c = 180$ m/min měl nejvyšší parametr $R_z = 7,410 \mu\text{m}$ a nejnižší parametr $R_z = 3,145 \mu\text{m}$.

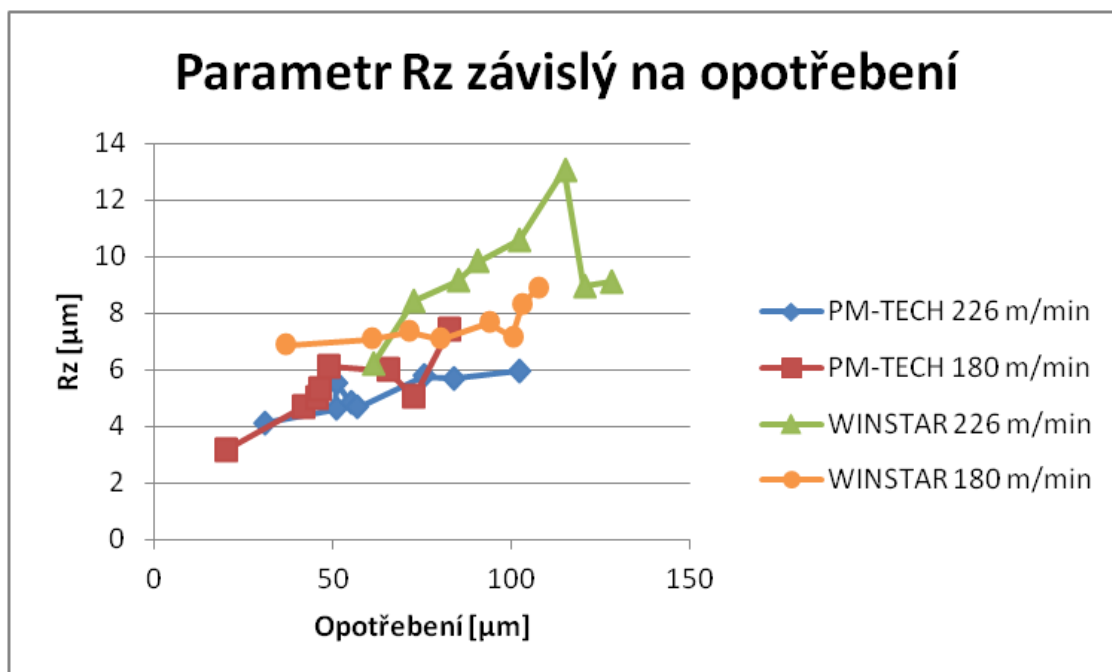
Vzorek po obrobení nástrojem **WINSTAR** při $v_c = 226$ m/min měl nejvyšší parametr $R_z = 13,054 \mu\text{m}$ a nejnižší parametr $R_z = 6,196 \mu\text{m}$.

Vzorek po obrobení nástrojem **WINSTAR** při $v_c = 180$ m/min měl nejvyšší parametr $R_z = 8,886 \mu\text{m}$ a nejnižší parametr $R_z = 6,863 \mu\text{m}$.



Obr. 36: Parametr drsnosti R_z

Z grafu vyplývá, že parametry drsnosti vzorku R_z rostly u všech řezných nástrojů téměř lineárně, výjimkou je WINSTAR s vyšší řeznou rychlostí. Je také patrné, že nástroj PM-TECH dosahuje nižších hodnot drsností vzorku již od počátku měření.



Obr. 37: Parametr R_z závislý na opotřebení

Z grafu lze určit, že povrchy vzorku po obrobení nástrojem PM-TECH při $v_c = 226$ m/min a nástrojem WINSTAR při $v_c = 180$ m/min dosahují jen mírně zvyšujících se hodnot drsností při zvyšujícím se opotřebení nástrojů.

4.2.3 Parametr R_t

Tab. 7: Parametr drsnosti R_t

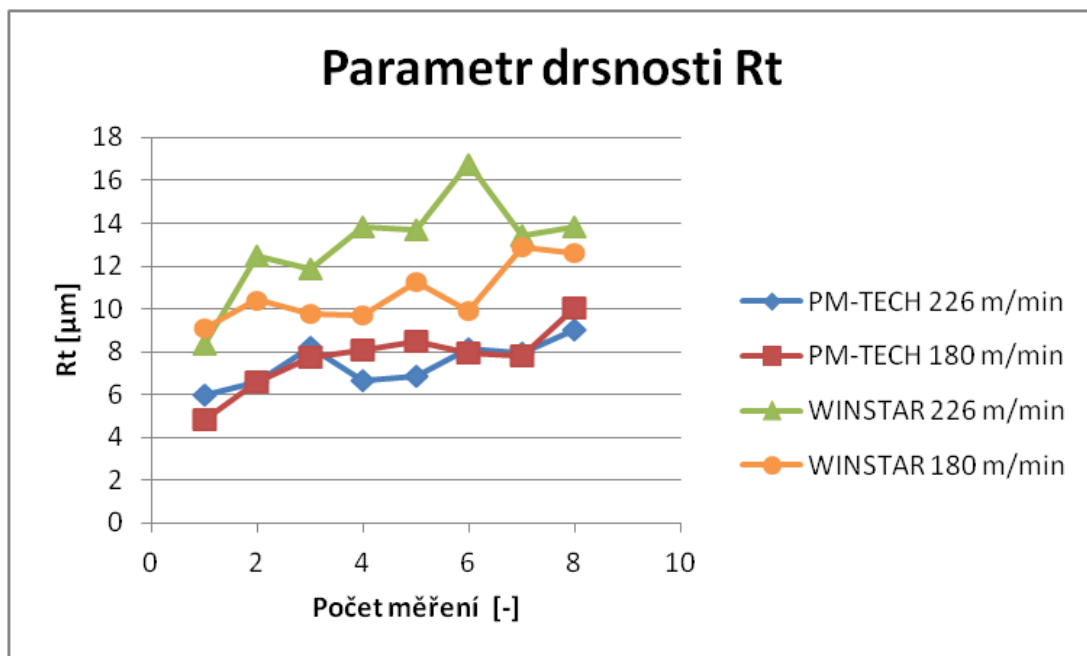
Parametr drsnosti R_t				
Nástroj	PM-TECH		WINSTAR	
v_c [m/min]	226	180	226	180
Měření	R_t [μm]			
1	5,984 ± 1,412	4,852 ± 2,195	8,335 ± 1,743	9,089 ± 2,235
2	6,616 ± 2,203	6,593 ± 3,299	12,501 ± 5,529	10,416 ± 5,501
3	8,219 ± 1,391	7,743 ± 1,626	11,868 ± 2,867	9,784 ± 2,243
4	6,657 ± 2,909	8,086 ± 0,900	13,852 ± 3,740	9,690 ± 1,392
5	6,859 ± 2,872	8,510 ± 1,241	13,721 ± 6,317	11,246 ± 3,402
6	8,163 ± 1,637	7,965 ± 2,975	16,788 ± 3,386	9,907 ± 3,326
7	7,968 ± 3,054	7,825 ± 1,593	13,421 ± 6,341	12,892 ± 3,895
8	8,046 ± 2,761	10,032 ± 2,160	13,817 ± 3,622	12,614 ± 3,335

Vzorek po obrobení nástrojem **PM-TECH** při $v_c = 226$ m/min měl nejvyšší parametr $R_t = 8,219 \mu\text{m}$ a nejnižší parametr $R_t = 5,984 \mu\text{m}$.

Vzorek po obrobení nástrojem **PM-TECH** při $v_c = 180$ m/min měl nejvyšší parametr $R_t = 10,032 \mu\text{m}$ a nejnižší parametr $R_t = 4,852 \mu\text{m}$.

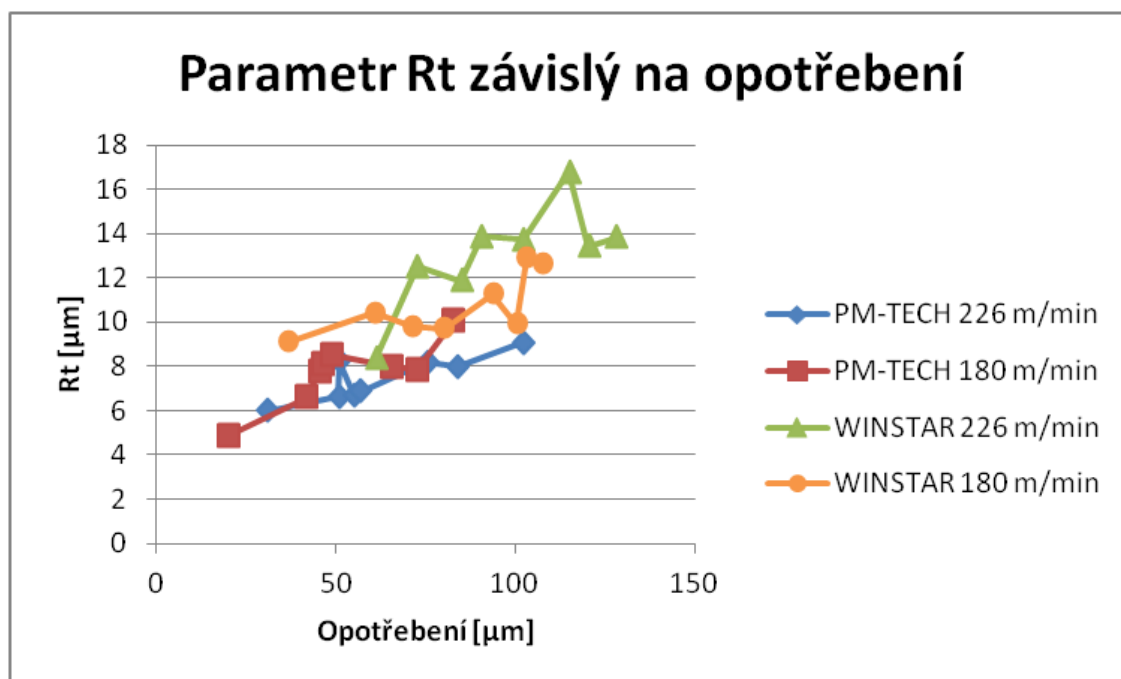
Vzorek po obrobení nástrojem **WINSTAR** při $v_c = 226$ m/min měl nejvyšší parametr $R_t = 16,788 \mu\text{m}$ a nejnižší parametr $R_t = 8,335 \mu\text{m}$.

Vzorek po obrobení nástrojem **WINSTAR** při $v_c = 180$ m/min měl nejvyšší parametr $R_t = 12,892 \mu\text{m}$ a nejnižší parametr $R_t = 9,089 \mu\text{m}$.



Obr. 38: Parametr drsnosti Rt

Z grafu vyplývá, že parametry drsnosti vzorku R_t rostly u všech řezných nástrojů téměř lineárně, výjimkou je vzorek obráběný nástrojem WINSTAR s vyšší řeznou rychlostí. Je také patrné, že nástroj PM -TECH dosahuje nižších hodnot drsnosti vzorku již od počátku měření.



Obr. 39: Parametr Rt závislý na opotřebení

Z grafu lze určit, že nástroj PM-TECH při $v_c = 226$ m/min dosahuje téměř shodných drsností vzorku při jeho zvyšujícím se opotřebení.

4.3 Řezné síly

Řezné síly F_x , F_y a F_z byly odečítány z grafu zobrazeného měřícím přístrojem. U každého měření se vybralo 6 největších hodnot řezných sil, z nichž je v tabulkách zapsán vážený aritmetický průměr s nejistotou měření.

4.3.1 Řezné síly v ose X

Tab. 8: Řezné síly F_x

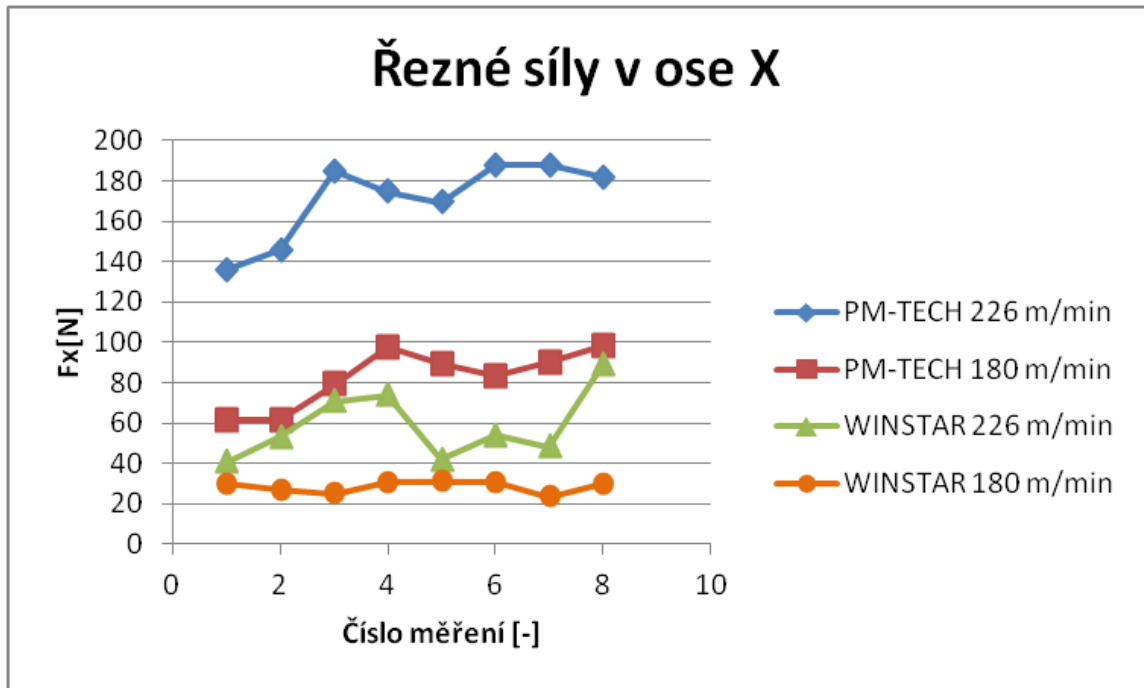
Řezné síly F_x				
Nástroj	PM-TECH		WINSTAR	
v_c [m/min]	226	180	226	180
Měření	F_x [N]			
1	136,2 ± 2,2	61,5 ± 8,2	40,8 ± 1,1	30,2 ± 3,9
2	145,5 ± 8,3	63,3 ± 5,9	53,2 ± 3,1	27,2 ± 5,1
3	184,7 ± 26,3	79,2 ± 4,3	70,8 ± 3,9	25,0 ± 5,4
4	174,7 ± 12,4	97,5 ± 18,8	73,8 ± 7,1	30,7 ± 4,0
5	169,3 ± 13,3	89,2 ± 4,3	42,0 ± 11,6	31,0 ± 7,1
6	188,0 ± 9,9	83,2 ± 4,1	57,2 ± 10,8	30,7 ± 7,2
7	188,0 ± 11,4	90,0 ± 6,0	48,3 ± 24,0	23,5 ± 3,4
8	181,7 ± 4,7	98,3 ± 5,9	89,2 ± 23,1	30,0 ± 5,1

U nástroje **PM-TECH** při $v_c = 226$ m/min byla naměřena největší síla $F_x = 188,0$ N a nejmenší síla $F_x = 136,2$ N.

U nástroje **PM-TECH** při $v_c = 180$ m/min byla naměřena největší síla $F_x = 98,3$ N a nejmenší síla $F_x = 61,5$ N.

U nástroje **WINSTAR** při $v_c = 226$ m/min byla naměřena největší síla $F_x = 89,2$ N a nejmenší síla $F_x = 40,8$ N.

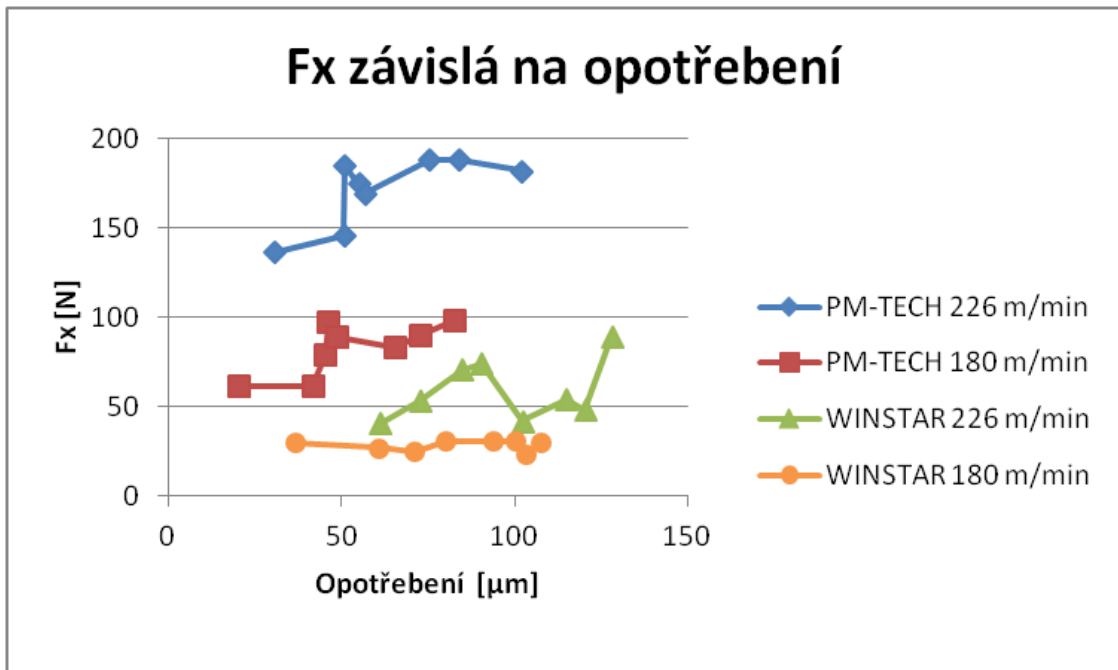
U nástroje **WINSTAR** při $v_c = 180$ m/min byla naměřena největší síla $F_x = 31,0$ N a nejmenší síla $F_x = 23,5$ N.



Obr. 40: Řezné síly F_x

Z grafu je patrné, že největší silou v ose X působí během všech měření řezný nástroj PM-TECH při $v_c = 226$ m/min.

Nejmenšími řeznými silami v ose X působí nástroj WINSTAR při $v_c = 180$ m/min a při všech měřeních dosáhl podobných hodnot.



Obr. 41: F_x závislá na opotřebení

Z grafu je patrné, že největší silou v ose X působí během všech měření řezný nástroj PM-TECH při $v_c = 226$ m/min. Zatímco při $v_c = 226$ m/min dosahuje nejmenšího opotřebení.

Nejmenšími řeznými silami v ose X působí nástroj WINSTAR při $v_c = 180$ m/min a při všech měřeních dosáhl podobných hodnot.

4.3.2 Řezné síly v ose Y

Tab. 9: Řezné síly F_y

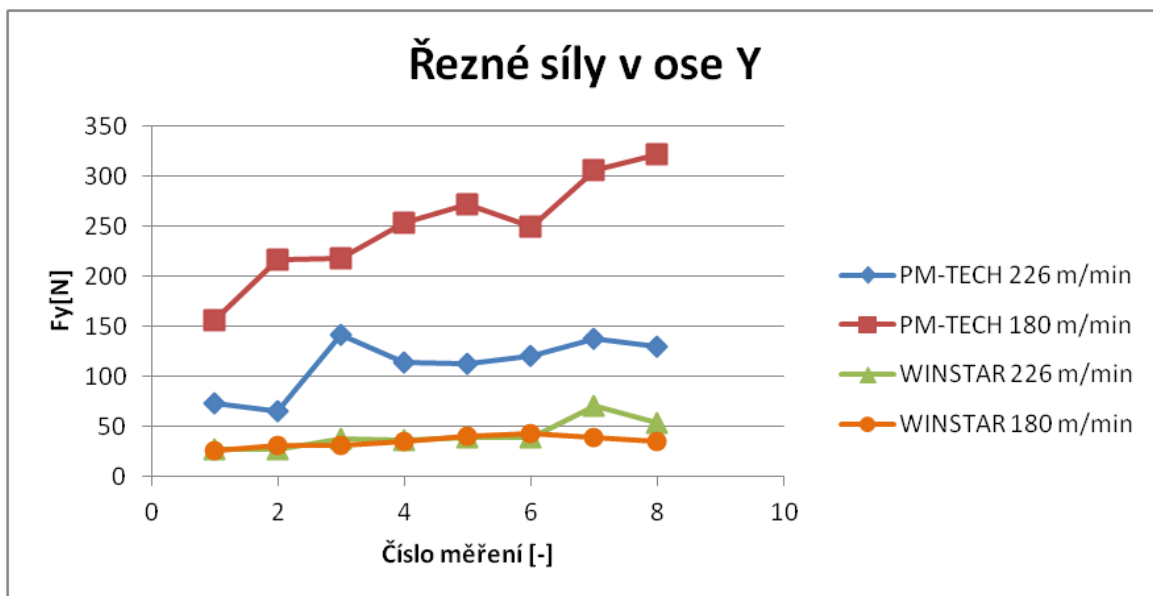
Řezné síly F_y				
Nástroj	PM-TECH		WINSTAR	
v_c [m/min]	226	180	226	180
Měření	F_y [N]			
1	73,3 ± 5,9	144,5 ± 5,3	27,3 ± 2,3	26,3 ± 1,9
2	65,2 ± 10,4	217,2 ± 4,6	26,5 ± 2,6	30,8 ± 1,1
3	141,7 ± 18,7	217,5 ± 3,3	38,0 ± 2,6	31,7 ± 1,9
4	113,5 ± 19,2	253,0 ± 5,1	35,8 ± 3,4	35,7 ± 2,6
5	113,3 ± 17,7	271,7 ± 4,9	39,2 ± 3,2	39,7 ± 4,6
6	120,3 ± 7,7	249,2 ± 20,4	38,8 ± 5,7	43,5 ± 2,4
7	137,2 ± 8,9	306,2 ± 50,2	70,0 ± 5,8	38,8 ± 6,1
8	129,5 ± 4,5	322,5 ± 6,0	52,8 ± 12,8	38,3 ± 4,0

U nástroje **PM-TECH** při $v_c = 226$ m/min byla naměřena největší síla $F_y = 141,7$ N a nejmenší síla $F_y = 65,2$ N.

U nástroje **PM-TECH** při $v_c = 180$ m/min byla naměřena největší síla $F_y = 322,5$ N a nejmenší síla $F_y = 144,5$ N.

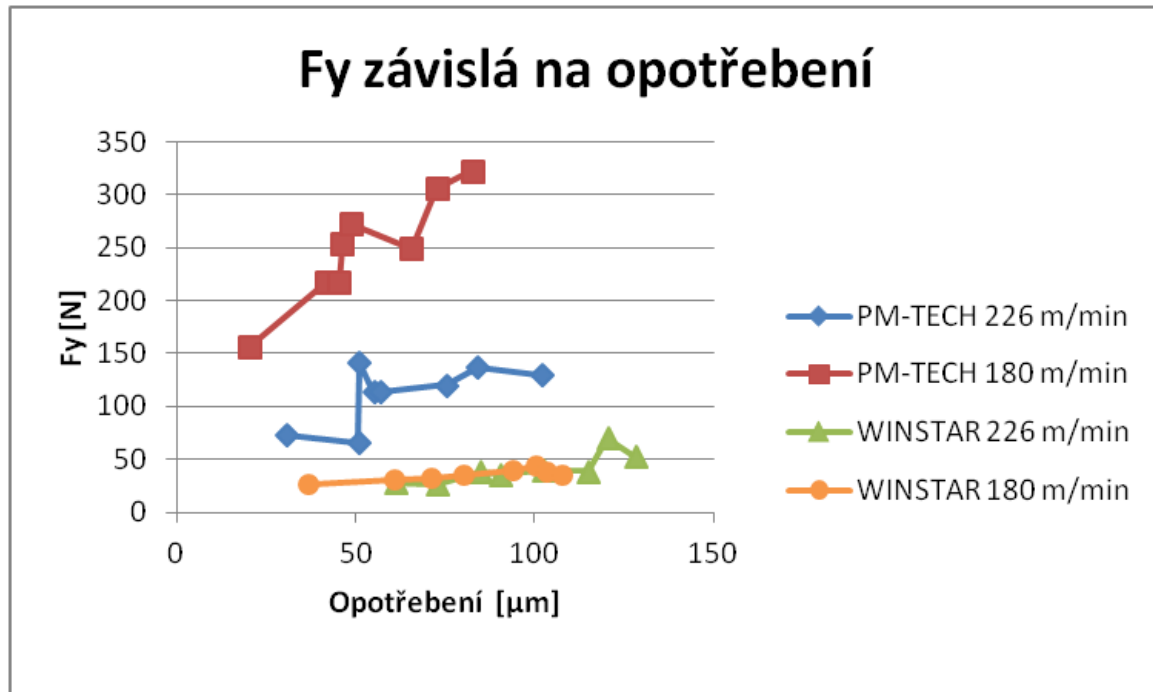
U nástroje **WINSTAR** při $v_c = 226$ m/min byla naměřena největší síla $F_y = 70,0$ N a nejmenší síla $F_y = 26,5$ N.

U nástroje **WINSTAR** při $v_c = 180$ m/min byla naměřena největší síla $F_y = 43,5$ N a nejmenší síla $F_y = 26,3$ N.



Obr. 42: Řezné síly F_y

Z grafu je patrné, že největší silou působí v ose Y řezný nástroj PM-TECH při $v_c = 180$ m/min. Nástroj WINSTAR má v obou řezných rychlostech podobné hodnoty.



Obr. 43: F_z závislá na opotřebení

Z grafu je patrné, že největší silou působí v ose Y řezný nástroj PM-TECH při $v_c = 180$ m/min, ale zároveň nejnižším opotřebením. Nástroj WINSTAR v obou řezných rychlostech vykazuje podobné hodnoty.

4.3.3 Řezné síly v ose Z

Tab. 10: Řezné síly F_z

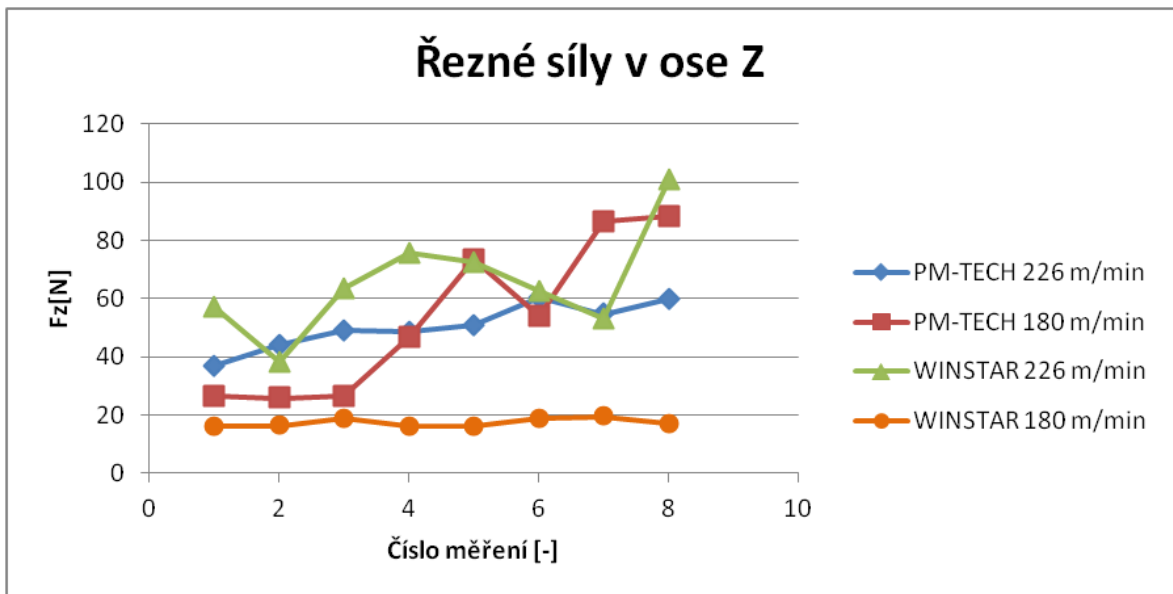
Řezné síly F_z				
Nástroj	PM-TECH		WINSTAR	
v_c [m/min]	226	180	226	180
Měření	F_z [N]			
1	36,7 ± 3,3	26,7 ± 3,0	57,0 ± 3,6	16,2 ± 3,4
2	44,2 ± 3,2	25,8 ± 4,3	38,3 ± 17,8	16,3 ± 3,3
3	48,9 ± 3,7	26,7 ± 3,0	63,3 ± 10,7	19,0 ± 2,4
4	48,5 ± 5,1	46,7 ± 5,9	75,8 ± 4,3	16,0 ± 1,0
5	50,7 ± 4,6	73,3 ± 3,0	72,5 ± 11,9	16,2 ± 2,7
6	60,3 ± 3,3	54,2 ± 15,6	62,5 ± 7,0	18,7 ± 3,8
7	54,7 ± 4,6	86,7 ± 4,7	53,0 ± 10,9	19,5 ± 5,9
8	60,0 ± 1,9	88,3 ± 4,7	100,8 ± 23,4	17,2 ± 4,0

U nástroje **PM-TECH** při $v_c = 226$ m/min byla naměřena největší síla $F_z = 60,3$ N a nejmenší síla $F_z = 36,7$ N.

U nástroje **PM-TECH** při $v_c = 180$ m/min byla naměřena největší síla $F_z = 88,3$ N a nejmenší síla $F_z = 25,8$ N.

U nástroje **WINSTAR** při $v_c = 226$ m/min byla naměřena největší síla $F_z = 100,8$ N a nejmenší síla $F_z = 38,3$ N.

U nástroje **WINSTAR** při $v_c = 180$ m/min byla naměřena největší síla $F_z = 19,5$ N a nejmenší síla $F_z = 16,0$ N.



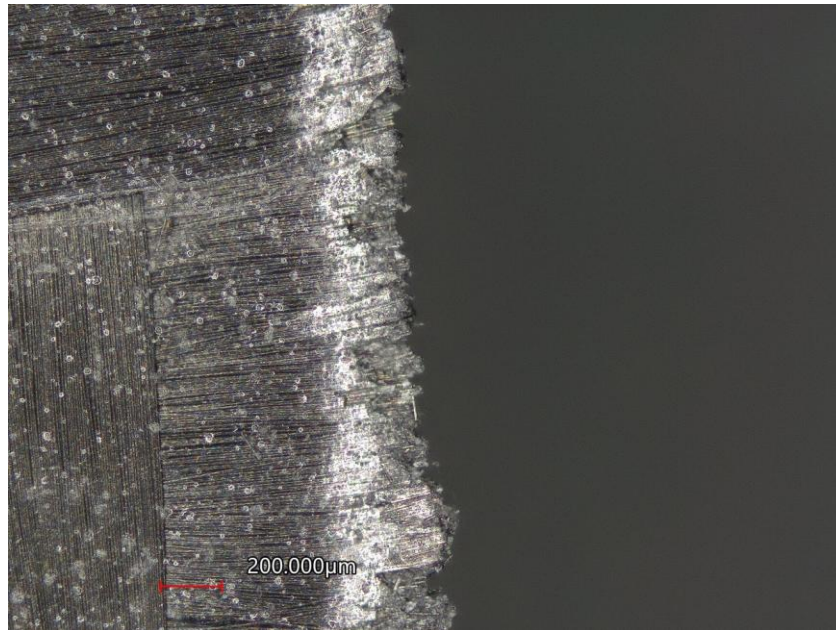
Obr. 44: Řezné síly F_z

Z grafu je patrné, že nejmenšími řeznými silami v ose Z působí řezný nástroj WINSTAR při $v_c = 180$ m/min a při $v_c = 226$ m/min řezné síly u obou nástrojů dosahují v průměru nejvyšších hodnot.

4.4 Delaminace vzorků materiálu

Tato kapitola se zaměřuje na vizuální porovnání vzorků pod mikroskopem od společnosti KEYENCE pro nástroje PM-TECH a WINSTAR.

Z níže uvedených Obr. 45 a Obr. 46 je patrné, že horší kvalitu hrany vzorku (roztřepené konce) má vzorek obrobený řezným nástrojem PM-TECH. Byla zpozorovaná delaminace 2. a 3. typu (viz. kapitola 2.7.2), tu se však nepodařilo zachytit pod mikroskopem. Čistší řez hrany vzorku bez roztřepených konců měl při frézování nástroj WINSTAR (viz. Obr. 46).



Obr. 45: Vzorek frézovaný řezným nástrojem PM-TECH



Obr. 46: Vzorek frézovaný řezným nástrojem WINSTAR

5 Diskuze

Hlavním cílem bakalářské práce bylo pozorovat opotřebení řezného nástroje a provést důkladnou analýzu jeho dopadu na povrch obráběného materiálu. Současně byly měřeny a studovány řezné síly v souvislosti s použitím opotřebovaného nástroje.

Pro získání relevantních údajů z jednotlivých měření bylo nezbytné zvolit řezné podmínky a následně určit postup pro měření požadovaných hodnot v rámci plánovaného výzkumu.

- **Opotřebení nástroje**

Z naměřených dat vyplývá, že řezné nástroje WINSTAR se opotřebovávají přímo úměrně a jejich celkové opotřebení je vyšší. U řezných nástrojů PM-TECH mezi 2. a 4. měřením nedocházelo téměř k žádnému nárůstu opotřebení, ale od 5. měření došlo k jeho prudkému zvýšení.

Nejnižší opotřebení nástroje **82,551 μm** měl nástroj **PM-TECH** při řezné rychlosti **$v_c = 180 \text{ m/min}$** .

Nejvyšší opotřebení řezného nástroje **128,067 μm** měl **WINSTAR** při řezné rychlosti **$v_c = 226 \text{ m/min}$** .

- **Drsnost povrchu**

Průběhy grafů drsností R_a , R_z a R_t byly navzájem velmi podobné, proto se tyto grafy mohly vyhodnotit společně. Z grafů vyplývá, že nástroj **WINSTAR** při **$v_c = 226 \text{ m/min}$** mezi 5. a 6. měřením došlo ke skokovému nárůstu drsnosti a naopak mezi 6. a 7. měřením k jeho prudkému snížení. Tento výkyv mohl být způsoben např. vadou struktury materiálu. U nástroje **WINSTAR** při **$v_c = 180 \text{ m/min}$** a u nástroje **PM-TECH** pro obě řezné rychlosti bylo z grafů patrné, že nárůst drsnosti je téměř přímo úměrný počtu měření.

Nejmenší hodnota rozdílu mezi nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotou byla u nástroje **WINSTAR** při **$v_c = 180 \text{ m/min}$** a nástroje **PM-TECH** při **$v_c = 226 \text{ m/min}$** . Naopak největší hodnota rozdílu drsností byla u nástroje **WINSTAR** při **$v_c = 226 \text{ m/min}$** .

- **Řezná síla**

Největší složka řezné síly v ose X byla naměřena u obrábění nástrojem **PM-TECH** při $v_c = 226 \text{ m/min}$. Naopak nástroj **WINSTAR** měl nejnižší složku řezné síly při $v_c = 180 \text{ m/min}$.

Největší složka řezné síly v ose Y byla naměřena u obrábění nástrojem **PM-TECH** při $v_c = 180 \text{ m/min}$. Naopak nástroj **WINSTAR** měl nejnižší složku řezné síly při $v_c = 180 \text{ m/min}$.

Největší složky řezné síly v ose Z byly v průměru nejvyšší u nástroje **WINSTAR** při $v_c = 226 \text{ m/min}$. Naopak nástroj **WINSTAR** měl nejnižší všechny složky řezné síly při $v_c = 180 \text{ m/min}$.

- **Delaminace**

Byla zde pozorována delaminace 2. a 3. typu pouze u nástroje PM-TECH. Konce odříznutých vláken byly roztřepeny. Důvodem těchto vad mohl být velký úhel šroubovice. Naopak u nástroje WINSTAR byl na kraji obráběného vzorku pozorován čistší řez bez roztřepení.

6 Závěr

Bakalářská práce se zabývala studií opotřebení nástrojů při frézování kompozitů z uhlíkových vláken bez použití procesní kapaliny. Výsledkem práce bylo podrobně analyzovat opotřebení dvou řezných nástrojů (PM-TECH, WINSTAR) při dvou různých řezných rychlostech, zatímco ostatní řezné podmínky byly konstantní.

V první části byly představeny teoretické informace týkající se problematiky, kterou se tato práce zabývala. Byly zde popsány základní informace o frézování, měření drsnosti povrchu, opotřebení břitu řezných nástrojů a problematika spojená s frézováním CFRP kompozitů (delaminace).

Ve druhé části bakalářské práce byla představena metodika experimentu, kde byly podrobněji popsány jednotlivé postupy měření, použité technické vybavení a zvolené konstantní řezné podmínky.

Ve třetí, experimentální části bakalářské práce byly zaznamenávány naměřené údaje, které byly zpracovány do tabulek a do grafické podoby.

V diskuzi a v závěru byly zhodnoceny a popsány naměřené výsledky experimentu.

Z vyhodnocení jednotlivých měření vyplynulo:

- Největší celkové opotřebení břitu dosáhl nástroj **WINSTAR** při $v_c = 226 \text{ m/min}$, zatímco nejmenší celkové opotřebení břitu dosáhl nástroj **PM-TECH** při $v_c = 180 \text{ m/min}$.
- Největších drsností v závislosti na počtu měření dosáhl nástroj **WINSTAR** při $v_c = 226 \text{ m/min}$, zatímco nejnižších drsností závislých na počtu měření dosáhl nástroj **PM-TECH** při $v_c = 226 \text{ m/min}$.
- Všeobecně nejmenší řezné síly vykazoval nástroj **WINSTAR** při $v_c = 180 \text{ m/min}$, zatímco největší řezné síly vykazoval nástroj **PM-TECH** při obou řezných rychlostech.
- Z hlediska způsobené delaminace materiálu nástrojem měla nejlepší výsledky fréza **WINSTAR**.

Nejvhodnějším nástrojem pro obrábění CFRP kompozitů podle naměřených výsledků byl řezný nástroj **PM-TECH**. Který za daných řezných rychlostí dosáhl


nejmenšího opotřebení břítu a nejnižších drsností vzorku. Bohužel nástroj způsoboval delaminaci a vyšší řezné síly.

Naopak při obrábění nástrojem **WINSTAR** bylo dosaženo nejvyšších hodnot opotřebení břítu a nejvyšších drsností vzorku. Na druhou stranu nezpůsoboval žádnou delaminaci a řezné síly byly nižší.

Téma této práce má velký potenciál pro uplatnění jejích výsledků v praxi. Proto by bylo vhodné navázat na tuto bakalářskou práci a zkoumat další řezné nástroje za různých řezných podmínek při frézování CFRP kompozitů.

Seznam použité literatury

- [1] KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 978-80-214-1996-4.
- [2] *Elektronická učebnice - ELUC* [online]. [vid. 2022-10-24]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1238>
- [3] Vliv vybraných parametrů procesu na řezné síly při HSC | MM Průmyslové spektrum. *www.mmspektrum.com* [online]. [vid. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-vybranych-parametru-procesu-na-rezne-sily-pri-hsc>
- [4] GAZDA, Jaromír. *Teorie obrábění: řezné síly při obrábění*. Vyd. 1. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1993. ISBN 80-7083-110-3.
- [5] *Multicomponent dynamometers, maximum forces up to 10 kN, cover plate 100x170 mm | Kistler* [online]. [vid. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/INT/en/cp/multicomponent-dynamometers-maximum-forces-up-to-10-kn-cover-plate-100x170-mm-9257b/P0000675>
- [6] Měření struktury povrchu. *ACCRETECH (Europe)* [online]. [vid. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://www.accretech.eu/cs/mereni-struktury-povrchu/>
- [7] *Měření drsnosti - M&B Calibr, spol. s.r.o.* [online]. [vid. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [8] BEČVÁŘ, Vojtěch. *Vliv řezných podmínek na kvalitu povrchu při soustružení konstrukčních ocelí*. Liberec, nedatováno. Bakalářská práce. Technická Univerzita v Liberci.
- [9] BUMBÁLEK, Bohumil. *Drsnost povrchu*. B.m.: Nakladatelství technické literatury, nedatováno.
- [10] KRATOCHVÍL, Václav. *Studium signálu akustické emise ve vztahu k opotřebení nástroje*. Plzeň, 2020. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní.
- [11] AB SANDVIK COROMANT-SANDVIK CZ S.R.O. *Příručka obrábění - kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, nedatováno. ISBN 91-972299-4-6.
- [12] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [13] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2., opr.rozš. vyd.* Brno: CERM, 2002. ISBN 978-80-7204-248-7.
- [14] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.

- [15] TEUCHNER, Dan. *Vliv matrice na porušování vláknových kompozitů*. Praha, 2018. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní.
- [16] *Reaktoplasty* [online]. [vid. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/21.html>
- [17] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [18] vlakna.pdf. *Google Docs* [online]. [vid. 2023-01-30]. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/13laXaUZ1GDDetCdz1KaufjHLRdTLNomu/viwe?usp=sharing&usp=embed_facebook
- [19] *Kovový matricový kompozit (MMC)* [online]. [vid. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/metal-matrix-composites/>
- [20] KROUPA, Tomáš. *Obrábění kompozitních materiálů*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní.
- [21] NOVOTNÝ, Vojtěch. *Vliv technologických parametrů na jakost obrobené plochy při CNC frézování kompozitů*. Zlín, 2016. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická.
- [22] Frézování kompozitních materiálů. *Sandvik Coromant* [online]. [vid. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/composite-milling>
- [23] MAŠEK, Petr. *Frézování kompozitních materiálů s termoplastickou maticí*. Praha, 2019. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní.
- [24] S.R.O, RCprofi. Uhlíková deska 5,0mm 40x25cm. *RCprofi.cz* [online]. [vid. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.rcprofi.cz/uhlikova-deska-5-0mm-40x25cm>
- [25] *CMX 600 V - Vertikální frézování od DMG MORI* [online]. [vid. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/vertikalni-frezovani/cmx-v/cmx-600-v>
- [26]  *Můj KEYENCE účet | KEYENCE International Belgium (Čeština)* [online]. [vid. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/mykeyence/?ptn=001&dLangId=&dLangType=cs-CZ>