

Stanovení vhodných řezných podmínek pro frézování kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny z hlediska řezného nástroje a obráběného materiálu

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. Tomáš Knápek

Vedoucí práce:

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

Katedra obrábění a montáže





Zadání diplomové práce

Stanovení vhodných řezných podmínek pro frézování kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny z hlediska řezného nástroje a obráběného materiálu

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Knápek**
Osobní číslo: S19000375
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávací katedra: Katedra obrábění a montáže
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí dosavadních poznatků o kompozitních materiálech na bázi reaktoplastů a o obrábění těchto materiálů zpevněných (nejen) uhlíkovými vlákny. Shrnutí poznatků o technologii frézování. 2. Volba řezných nástrojů a řezných podmínek pro frézování kompozitních materiálů. 3. Návrh metodiky experimentů v rámci volby vhodného řezného nástroje pro frézování kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny – studie z hlediska opotřebení řezného nástroje, teplot a sil při obrábění, tvorby třísky, drsnosti povrchu, rozměrové stability obráběného materiálu a celkové integrity obrobeneho povrchu. 4. Realizace experimentů. 5. Hodnocení získaných výsledků v rámci opotřebení řezného nástroje, teplot a sil při obrábění, tvorby třísky, drsnosti povrchu, rozměrové stability obráběného materiálu a celkové integrity obrobeneho povrchu. Návrh vhodných řezných podmínek pro frézování kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny. 6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

Obrázky, tabulky a grafy – dle potřeby.
cca 60 – 70 stran textu.
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. LIDAŘÍK, M. a kol. Epoxidové pryskyřice. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1983. 732 s. 2. KOČMAN, K., PROKOP, K. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN Brno, s.r.o., 2001. 274 s. ISBN 80-214-196-2. 3. BILÍK, O. Obrábění II. (1.Díl): Fyzikálně mechanické záležitosti procesu obrábění. Ostrava: Vysoká škola báňská – TU Ostrava, 1994. 132 s. ISBN 80-7078-228-5. 4. HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing s.r.o, 2008. 235 s. ISBN: 8025422502. 5. MÁDL, J., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F., kol. Jakost obráběných povrchů. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 179 s. ISBN 80-7044-539-4.

Vedoucí práce:

doc. Ing. et Ing. Štěpánka Dvořáčková, Ph.D.
Katedra obrábění a montáže

Datum zadání práce:

10. března 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

10. září 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

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

Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

21. května 2021

Bc. Tomáš Knápek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucí bakalářské práce paní doc. Ing. et Ing. Štěpánce Dvořáčkové, Ph.D. a konzultantům panu Ing. Miloslavu Ledvinovi, Ph.D a panu Bc. Martinu Váňovi za cenné připomínky a odborné rady při vypracování této bakalářské práce.

ANOTACE:

Předkládaná diplomová práce poskytuje informace o frézování kompozitních materiálů na bázi reaktoplastů plněných uhlíkovými vlákny.

Hlavním cílem diplomové práce je stanovení vhodných řezných podmínek při frézování reaktoplastů plněných uhlíkovými vlákny.

Nezbytné základní pojmy spojené s problematikou obrábění těchto materiálu jsou uvedeny v teoretické části. Do této části práce jsou také zahrnuty informace o reaktoplastických matricích, uhlíkových vláknech a technologii frézování.

Dosažením cíle je věnována experimentální část, obsahující metodiku měření, a provádění zvolených experimentů. Na konci práce v diskuzi a závěru je uvedeno vyhodnocení získaných výsledků.

Klíčová slova: kompozitní materiál, uhlíková vlákna, frézování, řezné podmínky

ANNOTATION:

The presented diploma thesis provides information on milling of composite materials based on thermosets filled with carbon fibers.

The main goal of the diploma thesis is to determine suitable cutting condition for milling thermosets filled with carbon fibers.

Necessary basic concepts associated with the issue of machining these materials are given in theoretical part. This part of the work also includes information about thermosetting matrices, carbon fibers and milling technology.

Achieving the goal is devoted to the experimental part, containing the measurement methodology and the implementation of selected experiments. At the end of the work in the discussion and conclusion, the evaluation of the obtained results is given.

Key words: composite material, carbon fibers, milling, cutting conditions

Evidenční číslo práce: **KOM 1313**

Jméno a příjmení: **Tomáš Knápek**

Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Ph.D. Štěpánka Dvořáčková
Konzultant: Ing. Miloslav Ledvina, Ph.D.
Bc. Martin Váňa

Počet stran: 75
Počet příloh: 1 CD
Počet tabulek: 13
Počet obrázků: 38
Počet diagramů: 11

Obsah

1	Úvod	12
2	Teoretická část	13
2.1	Kompozitní materiály	13
2.1.1	Matrice kompozitů	13
2.1.2	Vlákna	15
2.2	Frézování	16
2.2.1	Síly při frézování	17
2.3	Frézování kompozitů	19
2.3.1	Porovnání frézování uhlíkových kompozitů a kovů	20
2.3.2	Delaminace	21
2.3.3	Strategie obrábění a volba vhodného řezného nástroje	22
2.3.4	Nástroje	23
2.3.5	Opotřebenění nástrojů	25
2.3.6	Teplo vzniklé při frézování	26
2.3.7	Řezné podmínky	27
2.3.8	Chlazení při obrábění	28
2.3.9	Kvalita obrábění	29
3	Metodika experimentů	30
3.1	Výroba vzorků	30
3.1.1	Matrice	30
3.1.2	Plnivo	31
3.1.3	Vzorky	31
3.1.4	Příprava vzorků	32
3.2	Použité stroje, nástroje	34
3.2.1	Použitý nástroj	36
3.3	Měřené parametry při frézování	37
3.3.1	Měření síly	38
3.3.2	Měření teplot	40
3.3.3	Měření drsnosti povrchu	41
3.3.4	Měření rozměrové stability	42
3.3.5	Měření opotřebenění nástroje	43

4	Realizace experimentů	47
4.1	Řezná síla	47
4.1.1	Řezná síla u čisté pryskyřice	48
4.1.2	Řezné síly u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken	49
4.1.3	Řezné síly u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken	50
4.1.4	Řezné síly u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny	51
4.2	Teplota	51
4.3	Drsnost povrchu	53
4.3.1	Drsnost povrchu čisté pryskyřice	54
4.3.2	Drsnost povrchu pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken	56
4.3.3	Drsnost povrchu pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken	58
4.3.4	Drsnost povrchu pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny ...	59
4.4	Rozměrová stabilita	60
4.5	Velikost opotřebení VB	61
5	Diskuze	64
6	Závěr	71
	Seznam použité literatury	73
	Seznam příloh	75

Seznam použitých zkratek a symbolů

CFRP		carbon fiber reinforced polymers
DLC		diamond - like carbon
DP		diplomová práce
FRP		fiber reinforced polymer
PAN		polyakrilonitrilové vlákna
PK		procesní kapalina
PKD		polykrystalický diamant
PVD		physical vapour deposition
SEM		skenovací elektronový mikroskop
VBD		vyměnitelná břitová destička
d	[mm]	průměr frézy
f_o	[mm]	posuv na otáčku
f_z	[mm]	posuv na zub
h_i	[mm]	jmenovitá tloušťka třísky
k_{ci}	[N.mm ⁻²]	měrná řezná síla
n	[ot/min]	otáčky
o	[mm]	obvod kruhové výseče nástroje
s	[mm]	ujetá dráha nástroje
v_c	[mm.min ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[mm.min ⁻¹]	rychlost posuvu
x	[-]	exponent vlivu tloušťky třísky
z	[-]	počet zubů
A_{Di}	[mm ²]	průřez třísky
C_{Fc}	[-]	konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu
F_{ci}	[N]	složka řezné síly
F_{cNi}	[N]	složka řezné síly
F_i	[N]	celková řezná síla
F_{fi}	[N]	složka řezné síly
F_{fNi}	[N]	složka řezné síly
F_x	[N]	síla v ose X

F_z	[N]	síla v ose Z
L	[mm]	celková ujetá vzdálenost nástroje
R	[mm]	poloměr nástroje
Ra	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu
Rt	[μm]	celková výška profilu
Rz	[μm]	nejvyšší výška profilu
φ_i	[$^\circ$]	úhel pootočení břitu
ψ	[$^\circ$]	úhel záběru ostří
π	[-]	Ludolfovo číslo
κ_r	[$^\circ$]	nástrojový uhel nastavení hlavního ostří

1 Úvod

Kompozitní materiály poslední dobou získávají na popularitě. Jejich hlavní výhodou jsou nízká hmotnost, přes kterou dosahují vysokých pevností. Kompozitní materiály plněné uhlíkovými vlákny jsou v dnešní době obzvláště oblíbené. Používají se v letectví, kosmonautice, ve vojenské technice a vybavení, ale i v běžných odvětvích jako např. v automobilovém průmyslu nebo výrobě sportovních potřeb.

Výhody kterými disponují kompozitní materiály jsou většinou doprovázeny nevýhodami, mezi které patří problematika jejich obrábění. Mezi nejčastější metody obrábění kompozitních materiálů s uhlíkovými vlákny jsou frézování a vrtání. Výrobci řezných nástrojů zkoumají vhodné řezné podmínky, materiály a geometrie svých nástrojů tak, aby byla dosažena vysoká jakost povrchu obrobku a vysoká efektivita obrábění.

Diplomová práce se zabývá volbou vhodných řezných podmínek při frézování kompozitních materiálů s reaktoplastickou maticí plněnou uhlíkovými vlákny.

Hlavním cílem předkládané práce bylo navrhnout a ověřit vhodné řezné podmínky pro frézování kompozitních materiálů na bázi reaktoplastů zpevněných uhlíkovými vlákny. K dosažení vytyčeného cíle bylo nutné vytvořit kompletní metodiku pro měření opotřebení řezného nástroje, teplot a sil při obrábění, drsnosti povrchu, rozměrové stability a celkové integrity obrobku včetně celkového vyhodnocení naměřených výsledků.

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

2 Teoretická část

V teoretické části jsou zahrnuty poznatky o kompozitních materiálech s reaktoplastickou matricí a poznatky o obrábění těchto materiálů, které jsou vyztuženy uhlíkovými vlákny. Dále se zde nachází shrnutí poznatků o technologii frézování.

Je zde nastíněný současný stav řešené problematiky volby řezných podmínek při frézování těchto kompozitních materiálů a volby vhodných nástrojů pro jejich obrábění.

2.1 Kompozitní materiály

Obecně jsou kompozitní materiály heterogenní materiály složené ze dvou či více fází, které se navzájem výrazně liší ve svých vlastnostech (mechanických, chemických, fyzikálních). Tvrdší, tužší, nespojitá a pevnější složka se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice. Výztuž většinou disponuje lepšími mechanickými vlastnostmi než matrice, proto je jejím hlavním úkolem zlepšit matrici zmíněné vlastnosti. Dochází tedy ke kombinaci pevné výztuže s houževnatou matricí. [1,2]

2.1.1 Matrice kompozitů

Matrice pro kompozitní materiály s kontinuálními vlákny se nejčastěji používají polymerní, a to reaktoplastické nebo termoplastické.

Mezi nejpoužívanější matrice patří především nenasycené polyestery, vinylestery, epoxidy a z termoplastů polypropylen a polyamid.

V rámci naplánovaných experimentů DP bylo pracováno pouze s epoxidovou pryskyřicí, proto bude teoretická pozornost věnována pouze dané pryskyřici.

Epoxidové pryskyřice

Jsou polymerní syntetické sloučeniny, které obsahují oxiranové (epoxidové, ethylenoxidové) jednotky ve strukturní molekule. Epoxidová skupina neboli epoxid, je cyklický ether se třemi atomy v kruhu. Díky tomu, že tyto atomy tvoří téměř rovnostranný trojúhelník, je molekula epoxidu energeticky bohatá a tím velice reaktivní. Vysoká reaktivita pryskyřic, jako i chemická odolnost, nízké smrštění při vytvrzování a především vysoká přilnavost k mnoha jiným materiálům byla důvodem masivního rozšíření použití epoxidů v různých průmyslových aplikacích.

Existují dvě základní skupiny epoxidových pryskyřic:

- typy obsahující glycidyllové skupiny – tyto se dále dělí na glycidylethery, glycidylestery a glycidylaminy připravované prostřednictvím kondenzačních reakcí vhodných surovin,
- alifatické nebo cykloalifatické epoxidové pryskyřice – jsou připravovány peroxidací olefinů.

Správně vytvrzené epoxidové pryskyřice vykazují vlastnosti, které jsou žádoucí v řadě aplikací. Nejdůležitější z nich jsou:

- chemická odolnost - vůči zásadám a zředěným roztokům kyselin,
- teplotní odolnost - závisí na typu vybraného tvrdidla a stupni zesílení, odolávají teplotám v rozmezí 80 - 250 °C,
- elektroizolační vlastnosti,
- malá smrštitivost při vytvrzení - při teplotě 100 °C je smrštění na úrovni 0,7%,
- dobrá adheze k většině materiálů a vysoká mechanická pevnost - mohou být připraveny od typů na bázi viskózních kapalin až po tuhé pryskyřice.

Díky svým vlastnostem nacházejí epoxidové pryskyřice poměrně široké využití v různých průmyslových odvětvích. Největší využití pryskyřic je v oblasti průmyslu nátěrových hmot. Jako dvousložkové barvy a laky se využívají především k ochraně betonových, kovových, dřevěných a jiných povrchů. Výhodné je jejich použití v oblasti vodou ředitelných nátěrových hmot, práškových nebo i bezrozpuštědlových nátěrových hmot.

Vysoká adheze pryskyřic k široké škále materiálů (keramika, porcelán, kovy, sklo, pryže, dřevo atd.) dává prostor pro využití pryskyřic jako lepidel. Lepidla na bázi epoxidů se používají v elektrotechnice, ve strojírenství například k lepení brusných kotoučů, břitů obráběcích nástrojů i v leteckém průmyslu pro náročnější konstrukční aplikace.

Poměrně známé je použití epoxidových pryskyřic do kompozitních systémů. Skleněná vlákna dodávají epoxidovým laminátům vysokou pevnost v tahu i tlaku, dobrou tvarovou stálost za tepla a odolnost k agresivnímu prostředí. Uplatnění nacházejí v elektrotechnice (podkladové desky pro tištěné spoje, profilové izolanty pro elektrické zařízení atd.), v oblasti letectví (části trupu a křídel letadel, podlahy letadel, anténní systémy), kde se často skleněná vlákna nahrazují vlákny borovými nebo uhlíkovými nebo v chemickém průmyslu při přepravě ropných produktů (potrubí, skladovací nádrže atd.).

Další oblastí uplatnění pryskyřic na bázi epoxidů je například stavebnictví (spojování stavebních prvků, odlévání podlah, které jsou odolné silnému namáhání, ochrana a opravy betonu). Lící pryskyřice se používají v elektrotechnickém průmyslu při zalévání transformátorů, jako izolátory a ve strojírenství při výrobě nástrojů a forem. [17]

2.1.2 Vlákna

Principem vlastního vláknového vyztužení je skutečnost, že vyztužující vlákna, mající o jeden až dva řády vyšší pevnost a tuhost ve srovnání s pojivem, se při vnějším namáhání deformují méně než polymer. Dochází tak ke vzniku smykových sil na rozhraní vlákno/polymer, které v případě adheze mezi oběma komponentami umožňují přenos veškerého napětí z nepevné matrice do vláken. Ta jsou schopna nést veškerá napětí působící na kompozitní dílec, takže nepevné, ale deformovatelné pojivo je prakticky bez napětí. [20]

V rámci naplánovaných experimentů DP bylo pracováno pouze s uhlíkovými vlákny, proto bude teoretická pozornost věnována pouze daným vláknům.

Uhlíková vlákna

Mají nejširší spektrum mechanických vlastností při poměrně malé hustotě (1,8-2 g/cm³). Uhlík ve styku s méně ušlechtilými kovy vytváří galvanický článek a dochází k elektrochemické korozi, při níž koroduje kov. Kompozit s uhlíkovými vlákny proto musí být od kovu oddělen nevodivým materiálem.

Krystal grafitu je značně anizotropní, v rovinách bazálních vrstev jsou atomy vázány velmi pevnými kovalentními vazbami. Teoretická pevnost grafitového monokrystalu namáhaného tahem ve směru rovnoběžném s bazálními rovinami činí cca 100 GPa a teoretický modul pružnosti v tahu je 1000 GPa.

Uhlíková vlákna se dnes vyrábějí převážně z vláken polyakrilonitrilových (PAN), vláken novoloidu fenol-aldehydových (Kynol), ze sulfonovaného polyetyleny a z ligninu.

Postup výroby vlákna PAN.:

- Stabilizace - při teplotách 200 - 300 °C, za působení tahového napětí a v oxidačním prostředí je PAN vlákno stabilizováno. Dojde k cyklizaci vazeb v řetězci makromolekuly PAN a k vzájemnému zesílení makromolekul kyslíkovými můstky. Vlákno při této etapě ztmavne a stane se netavitelným.
- Karbonizace - při teplotách od 1000 do 1800 °C v inertním prostředí (velice čistý dusík) ve vláknu proběhne karbonizace (odstraní se vodík a sníží obsah

dusíku a kyslíku, 80 až 90 % hmoty tvoří uhlík). Vlákno dosáhne maximální pevnosti v tahu.

- Grafítizace - při teplotách do 3000 °C v prostředí argonu. Ještě více se zvětší obsah uhlíku a umožní se vznik dokonalejších mikrokystalů. Vyvinutější mikrokystalové vláknové materiály vedou ke zvětšení tuhosti vláknové struktury.

U vláken PAN je přírůstek tuhosti dosažen za cenu poklesu pevnosti, protože zvětšení velikosti mikrokystalů vede též k zvětšování defektů mezi nimi. U nejtuhších vláken je používáno dlužení při grafítizaci. Při dlužení se zmenší úhel odklonu mikrokystalů od osy vlákna (tzv. vysokomodulová vlákna). [18]

2.2 Frézování

Frézování je obrábění rovinných nebo tvarových ploch, vnitřních nebo vnějších, vícebřitým nástrojem. Nástroj - fréza - je většinou vícebřitý. Z hlediska chvění je výhodné, je-li v záběru s obrobkem více břitů současně. Při frézování koná hlavní řezný pohyb (rotační) nástroj a obrobek koná pohyb posuvný obvykle přímočarý, někdy otáčivý, nebo obecný pohyb po prostorové křivce.

Frézování se dělí na dva základní způsoby obrábění: frézování čelem nástroje a frézování obvodem nástroje (viz obr. 1). Na frézce se za řezné podmínky volí otáčky vřetene a rychlost posuvu stolu, ostatní požadované hodnoty je nutné vypočítat.

Velikost řezné rychlosti v_c , tedy obvodové rychlosti frézy se počítá dle následujícího vztahu.

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

Kde d je průměr frézy [mm],

n jsou otáčky vřetene [min^{-1}].

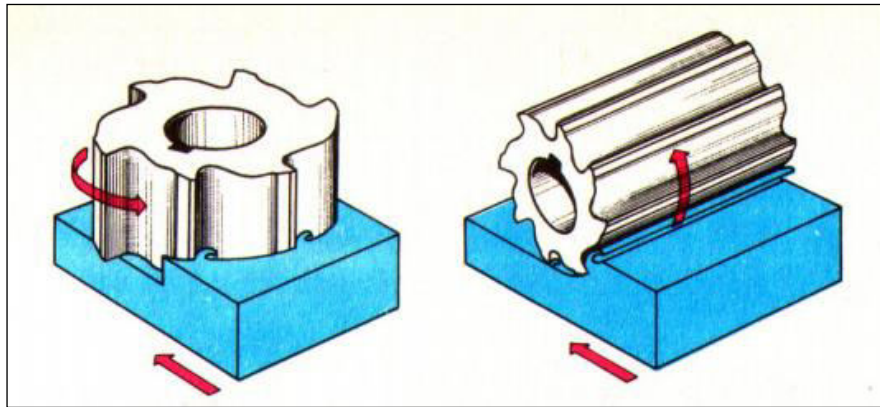
Rychlost posuvu stolu frézky v_f se udává v $mm \cdot min^{-1}$. Z hlediska záběru zubů je důležitější hodnota posuvu na zub f_z .

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot n} [mm]$$

Kde z je počet zubů frézky.

Posuv na otáčku f_o představuje dráhu, kterou urazí obrobek za jednu otáčku frézy.

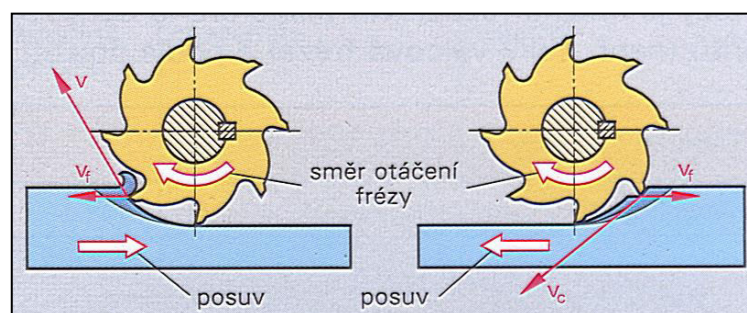
$$f_o = f_z \cdot z [mm]$$



Obr.1 Frézování čelem a obvodem frézy [23]

Dále se frézování dělí podle smyslu otáčení frézy na sousledné a nesousledné (viz obr. 2). U nesousledného frézování je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Tloušťka řezu postupně roste z nulové hodnoty na hodnotu maximální, při které zub frézy vychází ze záběru. V průběhu vznikají silové účinky a deformace způsobující vlnitý charakter obrobené plochy a větší opotřebení břitu. Výhodou naopak je, že trvanlivost nástroje nezávisí na okujích a dosahuje se větší produktivity u hrubování. Řezná síla působí směrem nahoru a táhne obrobek od stolu.

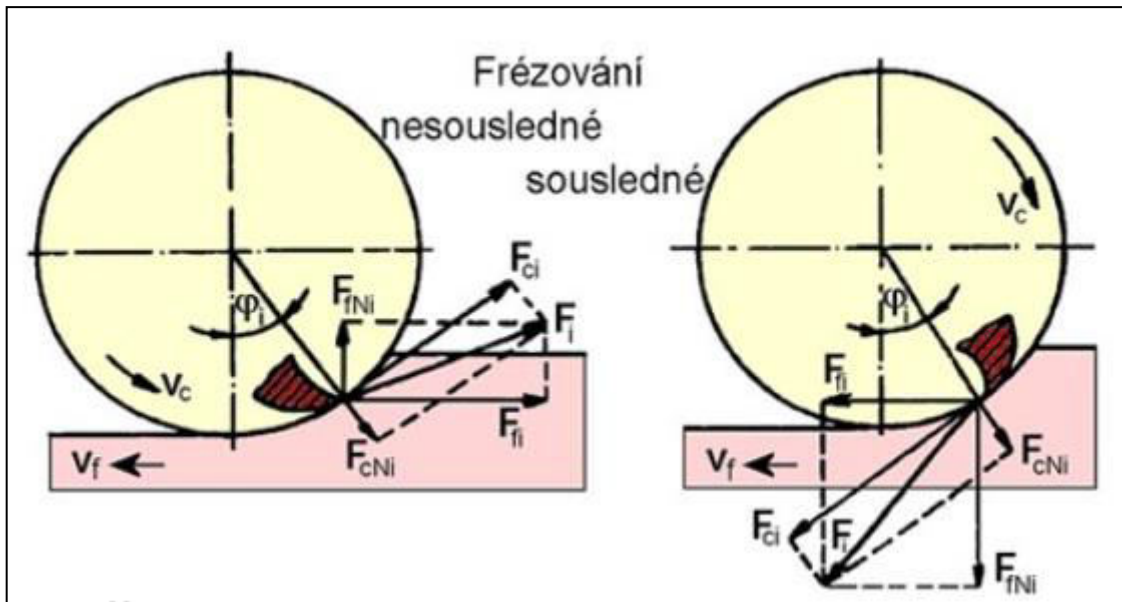
U sousledného frézování je smysl rotace ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka řezu vzniká při vnikání zubu frézy do obrobku. Řezná síla působí směrem dolů. Výhodou je vyšší trvanlivost břitu, menší sklon ke chvění a tvoření nárůstků, menší potřebný řezný výkon a lepší jakost obrobeného povrchu.



Obr. 2 Frézování nesousledné a sousledné [23]

2.2.1 Síly při frézování

Při specifikaci řezných sil při frézování se vychází ze silových poměrů na jednom břitu, který je v poloze určené úhlem φ_i . Pro válcové frézování nástrojem s přímými zuby se celková řezná síla působící na břitu F_i rozkládá na složky F_{ci} a F_{cNi} , resp. na složky F_{fi} a F_{fNi} (obr. 3). [14]



Obr. 3 Řezné síly na zubu válcové frézy v pracovní rovině P_{fe} [14]

Řezná síla F_{ci} se vyjádří na základě měrné řezné síly k_{ci} a průřezu třísky A_{Di} :

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i$$

Měrná řezná síla k_{ci} se vyjádří pomocí vztahu:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}}$$

Po dosazení a úpravě:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i$$

Při čelním frézování se řezná síla F_{ci} vyjádří obdobným způsobem:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i$$

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}}$$

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin \kappa_r^{x-1} \cdot \sin^x \varphi_i$$

Protože frézy jsou v převážné většině vícebřité nástroje, je při frézování vždy v záběru několik zubů současně. Výsledné síly pak závisí na počtu zubů v záběru a na okamžité poloze zubů frézy vzhledem k obrobku. Z hlediska potřebného krouticího momentu a výkonu na vřetenu frézky je pak důležitá celková řezná síla F_c , která se pro válcové frézování vypočítá podle vztahu:

$$F_{ci} = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i$$

Pro čelní frézování:

$$F_{ci} = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{x-1} \kappa \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i$$

Počet zubů v záběru se pro válcové frézování vypočítá podle vztahu:

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{360} \cdot z$$

Pro čelní frézování:

$$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z$$

2.3 Frézování kompozitů

Obrábění kompozitních materiálů je považováno za finální operaci vzhledem k tomu, že vláknové kompozitní díly jsou lisované, kladené nebo navíjené do podoby blízké konečnému tvaru výrobku. Dokončování na finální rozměr souvisí zejména s obrobením kontury často prostorově velmi členitého dílce na rozměr v předepsaných tolerancích a zhotovení montážních otvorů pro vzájemné spojení dílců, kde je zejména požadována přesná vzájemná poloha děr a to i na rozměrných dílcích. Hlavní předpoklad je jakostní provedení řezu při vysoké produktivitě obrábění.

Kompozitní materiály jsou považovány za těžko obrobitelné. Špatná obrobitelnost je dána různými nepříznivými technologickými vlastnostmi materiálu jako jsou: nehomogenita mechanických vlastností, velká tvrdost a pevnost materiálu výztuže, nízké teploty při kterých dochází k degradaci materiálu matrice a způsobu dělení třísky při obrábění. [13]

Přes velkou podobnost termoplastických a termosetových vláknových kompozitů je přístup k jejich obrábění rozdílný a vyplývá z odlišných vlastností obou typů matic. Termosetické matrice bývají zpravidla křehké, což ovlivňuje tvorbu třísky. Třísky jsou v tomto případě velmi jemné, prakticky ve formě prachu. U termosetických matic je změna vlastností s rostoucí teplotou zanedbatelná, na rozdíl od termoplastických matic, kde se mechanické vlastnosti matrice s teplotou mění značně. Po překročení teploty skelného přechodu materiál začíná měknout a ztrácí své vlastnosti a s dalším zvyšováním teploty dochází k jeho tavení. Obrábění měkčí matrice s vyšší tažností u termoplastů nevede k tvorbě typicky velmi jemných třísek, ale k tvorbě krátkých třísek nepodobných těm, které vznikají při obrábění kovových materiálů, a pak nevelkého množství prachových částic z vláknové výztuže. Při obrábění kompozitů s termoplastickou maticí je kritickým faktorem také tepelné ovlivnění obrobku a obrobené plochy. S ohledem na větší či menší nasákavost těchto materiálů se však možnosti chlazení řezného procesu omezují výhradně na aplikaci ofuku upraveným či neupraveným tlakovým vzduchem. [6]

2.3.1 Porovnání frézování uhlíkových kompozitů a kovů

Jedním ze základních problémů obrábění kompozitů je, že obráběné otvory budou mít tendenci být poddimenzovány, protože obráběný materiál se při obrábění uvolní. Účinek je obtížné předvídat, protože vlákna materiálu leží často v náhodných směrech. Řešení tohoto problému vyžaduje rozsáhlou kontrolu a seřízení.

Uhlíkové vlákna jsou abrazivní a urychlují opotřebení nástrojů. Pryskyřice, která je použita jako matrice má tendenci se odlamovat na kraji obrobku, zatímco výztužná uhlíková vlákna mohou být řezána nebo pouze zlomena. Obrábění uhlíkových kompozitů vyžaduje jiné nástroje, a řezné podmínky než běžné kovy. Každý typ kompozitního materiálu vyžaduje před obráběním zvláštní pozornost.

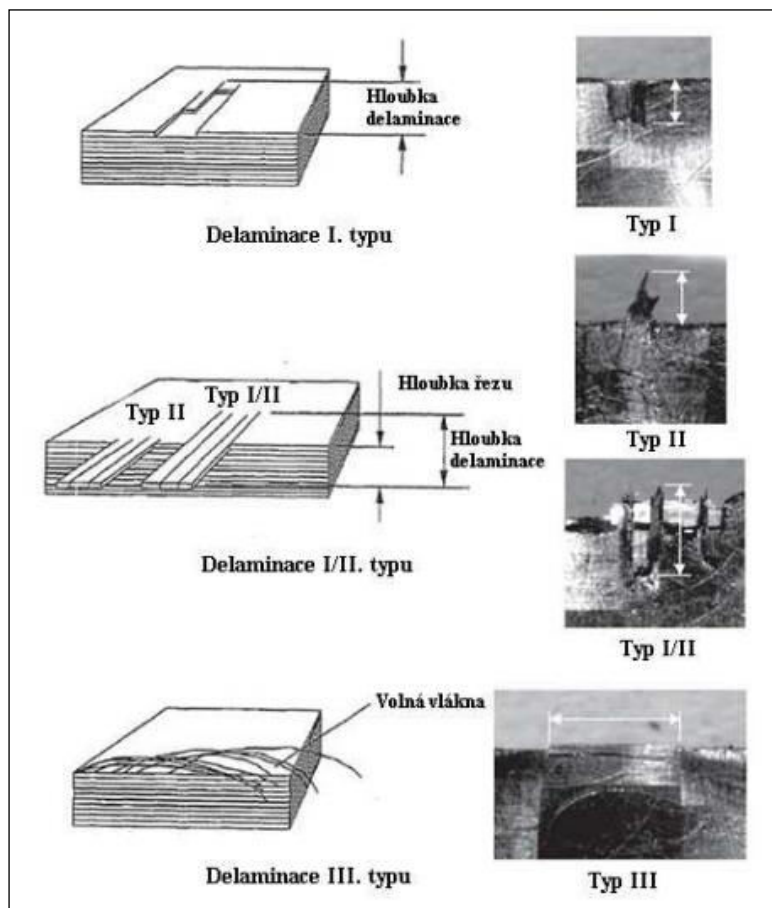
Pro obrábění kompozitů jsou na prvním místě specifické nástroje, protože většina kompozitů je extrémně abrazivní a nástroje se rychle opotřebovávají. To vyžaduje velmi ostrou hranu nástroje, aby se zabránilo delaminaci což také přispívá k opotřebení nástroje. Nástroje také mají tendenci se zahřívat, protože není teplo odváděno tolik třískou jako u kovů. Teplo je dalším nepřítelem životnosti nástroje.

Typické obrábění kovů vytváří z třísek nepořádek, ale obrábění uhlíkových kompozitů obecně vytváří obrovské množství prachu a nepořádku pouze z jedné relace obrábění. Obrábění uhlíkových vláken vytváří značné množství uhlíkového prachu, který je škodlivý při vdechnutí a také může poškodit elektroniku, jelikož je uhlík vodivý a jemný prach se může

dostat do vnitřku elektroniky kde jí následně zkratuje. Při obrábění těchto materiálů je důležité důkladné odsávání uhlíkového prachu pro bezpečnost obsluhy a elektroniky v blízkosti stroje. [10]

2.3.2 Delaminace

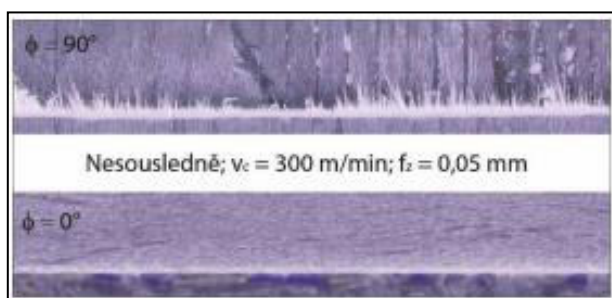
Velmi častý problém při obrábění kompozitních materiálů je delaminace. Nejběžněji se sní lze setkat u vrtání nebo frézování vrstvených kompozitů. Delaminace se objevuje jak na vstupu nástroje do materiálu, tak i u jeho výstupu. U frézování rozdělujeme 3 typy delaminace (viz obr. 4). Většinou vzniká delaminace ve dvou fázích. Za první fázi lze považovat období, kdy síla od příčného ostří působí na neobrobenou plochu materiálu, následně dosáhne kritické hodnoty a končí poté, co ostří pronikne skrz materiál. Následuje druhá fáze, kdy se následkem tlaku nástroje delaminace rozvíjí. Delaminace končí, jakmile příčné ostří prostoupí na povrch. Delaminace nenastane u vnitřních vrstev, neboť jsou drženy horní a spodní vrstvou. Velký vliv na delaminaci má také ostří nástroje, proto je nutné nástroj dostatečně často ostřit, popřípadě měnit VBD. Vlivem neostroti nástroje se vlákna nestříhají, nýbrž mají sklon k deformaci a vytahování z matrice. [19]



Obr.4 Typy delaminace při frézování [13]

2.3.3 Strategie obrábění a volba vhodného řezného nástroje

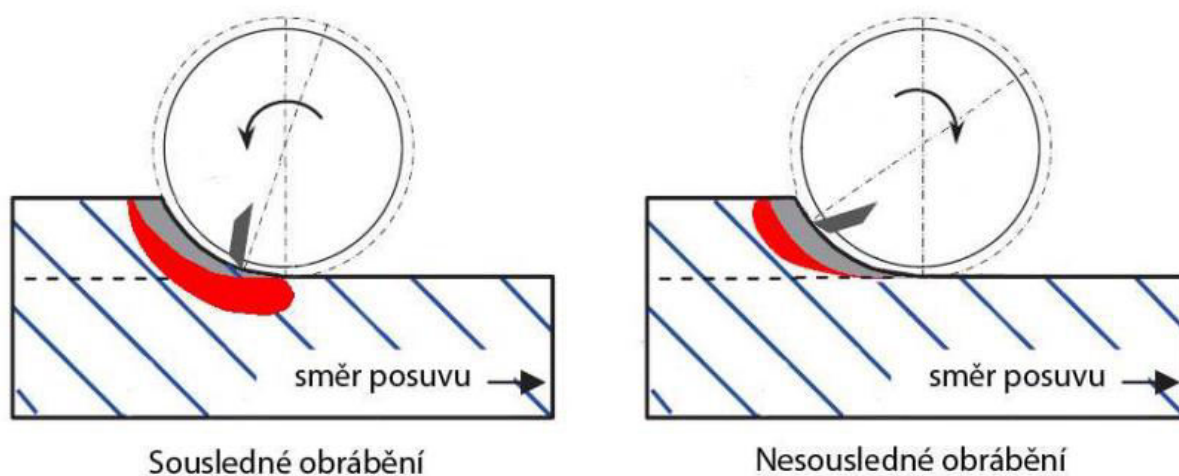
Důležitým úkolem navržené strategie obrábění je zamezit vzniku vysoké teploty v místě řezu a rozvolnění vazby matrice a výztuže. Z provedených experimentů vyplynula řada poznatků. Z nich lze uvést například to, že výrazný vliv na kvalitu povrchu má volba frézování kolmo na vlákna nebo podél vláken (obr. 5), a to, že sousledné frézování a vyšší řezná rychlost kvalitu povrchu a opracované hrany zlepšuje.



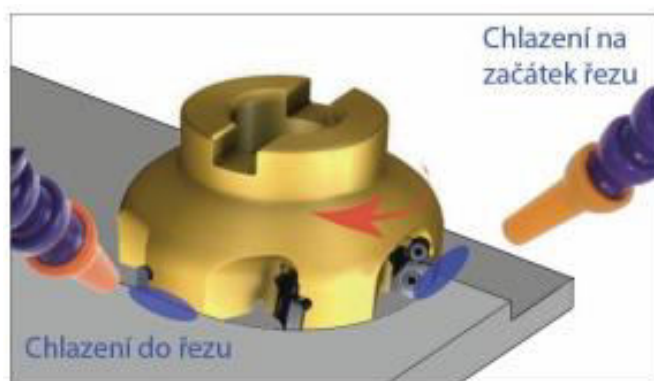
Obr. 5 Frézování kolmo na vlákna nebo podél vláken [9]

Naproti tomu výhodou nesousledného frézování je odříznutí teplotně poškozené části matrice břitem nástroje (obr. 6). Pro omezení teplotních vlivů je nutno intenzivně chladit v místě řezu (obr. 7), chlazení v místě začátku řezu má menší efekt. Strategie obrábění s menší radiální hloubkou řezu a sníženými silami snižuje teplotu v místě řezu.

Kvůli navlhání polymerních matric není doporučeno chlazení za přítomnosti vody. Jako nejúčinnější se jeví chlazení proudem vzduchu, ochlazeného na nízkou teplotu, chlazení kryogenní a pokud je to možné, pak olejovou emulzí. [9]



Obr. 6 Odříznutí tepelně ovlivněné části kompozitu [9]



Obr. 7 Chlazení při frézování [9]

Obecně platí, že z hlediska teploty řezu, řezných sil a kvality obrobené plochy je nutno dávat přednost nástrojům s ostrou pozitivní geometrií, protože vlákna výztuže je nutno odřezávat nebo odlamovat, nikoliv ohýbat. Účinný způsob, jak zabránit vzniku delaminace (separaci sousedních vrstev), je volba kompresního nástroje s velkým úhlem čela i hřbetu. Pozitivní geometrii a vysokou životnost v sobě spojují nástroje, osazené břity z PKD, které jsou sice křehčí, ale jsou schopny z místa řezu odvádět více tepla, než nástroje karbidové. Vhodnou variantou je užití karbidových nástrojů s PVD diamantovým povlakem. [9]

2.3.4 Nástroje

V současné době je nabízeno nepřehledné množství typů a geometrií řezných nástrojů pro obrábění zmiňovaných materiálů. Nástroje jsou k dispozici jak pro vrtací a soustružnické operace, tak i pro operace rovinného a tvarového frézování, či stále populárnější operace – ořezávání dílců na konečný rozměr. Právě pro posledně jmenovanou operaci se používají většinou monolitní frézy menších průměrů (do cca 8–12 mm) s větším počtem břitů.



Obr. 8 Druhy fréz různých tvarů a geometrií pro frézování kompozitů [4]

Je už praxí prokázáno, že nástroje pro efektivní obrábění obou typů kompozitů jsou dnes vyráběny buď z polykrystalického diamantu (PKD) anebo z povlakovaného slinutého karbidu (nejčastěji DLC povlaky). Povlakovaný karbidový nástroj je přitom oproti PKD nástrojům levnější variantou. Přestože mohou karbidové nástroje vykazovat i 10x nižší trvanlivost břitu než nástroje z PKD (především v důsledku abrazivního působení tvrdých vláken v kompozitu), jsou velmi často vhodným řešením s ohledem na vyšší počet břitů a dosahovanou vyšší jakost obrobeného povrchu. Abrazivnímu opotřebení pochopitelně lépe odolávají nástroje s diamantovými břity. I z tohoto důvodu není dnes nasazení nástrojů s diamantovými břity ničím zvláštním, a to i přes jejich výrazně vyšší pořizovací cenu. Bylo však již naznačeno, že problém efektivního opracování kompozitů není spojen pouze s trvanlivostí břitu v řezu, ale také s výslednou jakostí obrobku. A právě diamantové nástroje díky málo pozitivní geometrii často vedou k výraznější tvorbě defektů v podobě neodříznutých vláken, tvorby otřepů, delaminace a nebo i výrazně větších řezných sil. [6]

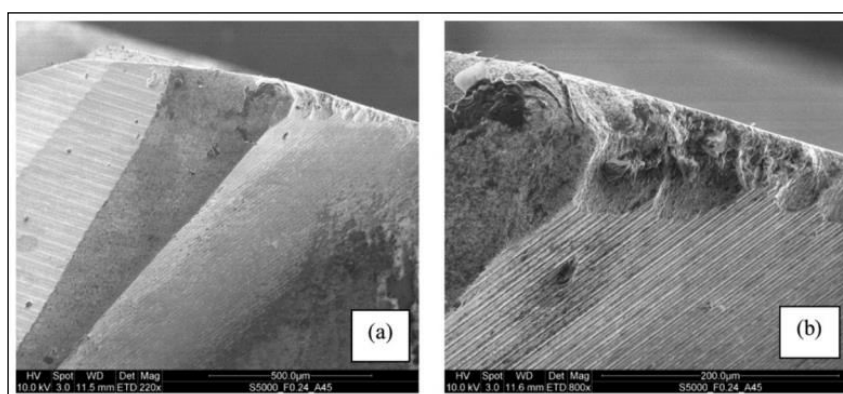
Výroba nástrojů s diamantovými břity navíc umožňuje jen tvorbu přímých ostří na nástroji, což má za následek jednak proměnlivou geometrii břitu po ostří a také znemožnění vytvoření většího počtu břitů. Dodržení požadované produktivity proto musí být kompenzováno dalším zvýšením řezných podmínek (řezné rychlosti a posuvu), což však může vést k již zmíněným nežádoucím vlivům na jakost povrchu. Zatímco možný nárůst řezné rychlosti je limitován potřebou malého tepelného ovlivnění plochy řezu, potřebný nárůst posuvu na zub často limituje posuvem zvýšená tvorba vad na obrobku (delaminace,

nedoříznutá vlákna) a velká drsnost povrchu. Uvedená negativa nástrojů s břity z PKD lze výrazně potlačit laserovou úpravou břitu – vytvořením geometrie laserem. Nicméně dnešní cena takového řešení je velmi vysoká a cenu diamantového nástroje ještě prakticky zdvojnásobuje.

Co se týče geometrie nástroje, efektivní řezné nástroje pro kompozitní materiály mají nízké úhly stoupání šroubovice zajišťující snížení axiálních sil na lamelární vrstvy materiálu, a tudíž nedochází k jejich delaminaci. Frézy s levostrannou i pravostrannou šroubovicí jsou také považovány za velmi efektivní geometrii pro obrábění kompozitních materiálů. Tyto typy řezných nástrojů, často známé jako kombinované frézy, směřují a stlačují řezné síly směrem do středu tloušťky obrobků (v případě stranového frézování), aby lamelární vrstvy zůstaly neporušené. Tyto typy geometrií také navíc umožňují mnohem volnější obrábění kompozitních materiál. [4]

2.3.5 Opotřebení nástrojů

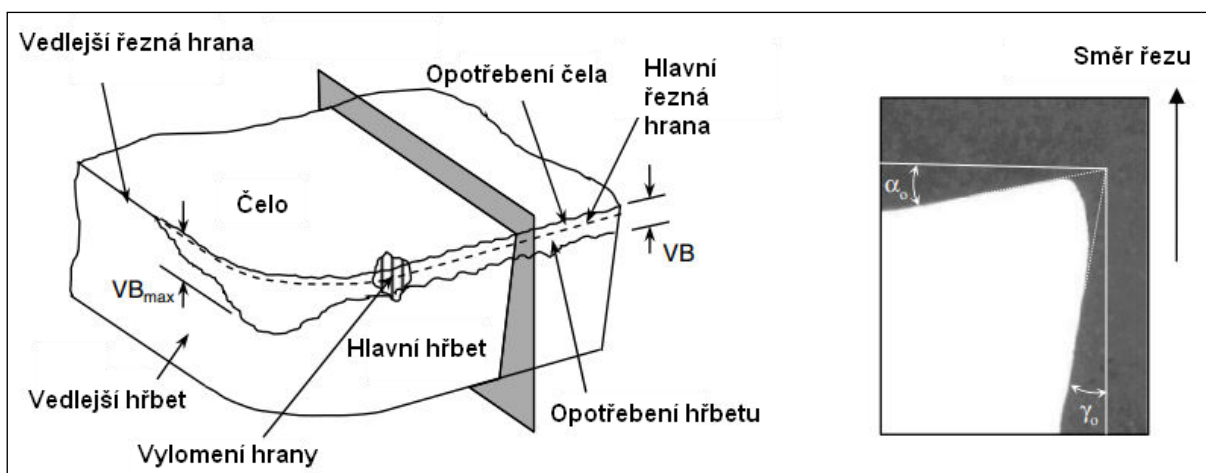
Mechanismy opotřebení nástrojů obrábějících polymerní kompozitní materiály jsou odlišné od mechanismů opotřebení známých z obrábění kovů. U kovů může teplota s rostoucí řeznou rychlostí růst rychle a často se stává hlavní příčinou opotřebení nástrojů. Do takového opotřebení můžeme započítat například chemický otěr či difuzi. U polymerních kompozitních materiálů však teplota neroste tak výrazně a nemůže dosáhnout tak vysokých hodnot, aby mohlo docházet k mechanismům opotřebení nástroje souvisejících s vysokou řeznou rychlostí a potažmo teplotou v řezu. Jako hlavní mechanismus opotřebení byl identifikován abrazivní otěr. Ten je způsobený vysokou tvrdostí a pevností vláknové výztuže kompozitu. Na zvětšených snímcích ze SEM (skenovacího elektronového mikroskopu) jsou jasně patrné škrábance na hřbetu ostří. Při bližším pohledu pak je možné pozorovat na řezné hraně poškození mikrochippingem (obr. 9). [13]



Obr. 9 Mechanismus opotřebení během obrábění skelného vláknového kompozitu nepovlakovaného jemnozrného SK (a) abraze, (b) mikrochipping [13]

Opotřebení rezného nástroje se projevuje v různých formách (viz obr. 10) Při obrábění FRP je nejběžnějším typem opotřebení zaoblení hran, které je způsobeno postupným odíráním ploch tvořících břit.

Obr. 10b ukazuje příčný řez opotřebované rezné hrany, na které je jasně vidět zaoblení hran. Je vidět, že většina opotřebení je na hlavním hřbetu nástroje. Zaoblení na čele vytváří mnohem užší zakřivení. Dalším typem opotřebení, které se projevuje při obrábění FRP, je vylomení hrany. Tento typ opotřebení je běžnější při použití nedostatečně houževnatého nástroje, který nemá dostatečnou houževnatost na to odolat kolísavým rezným silám, při velkých hloubkách záběru.

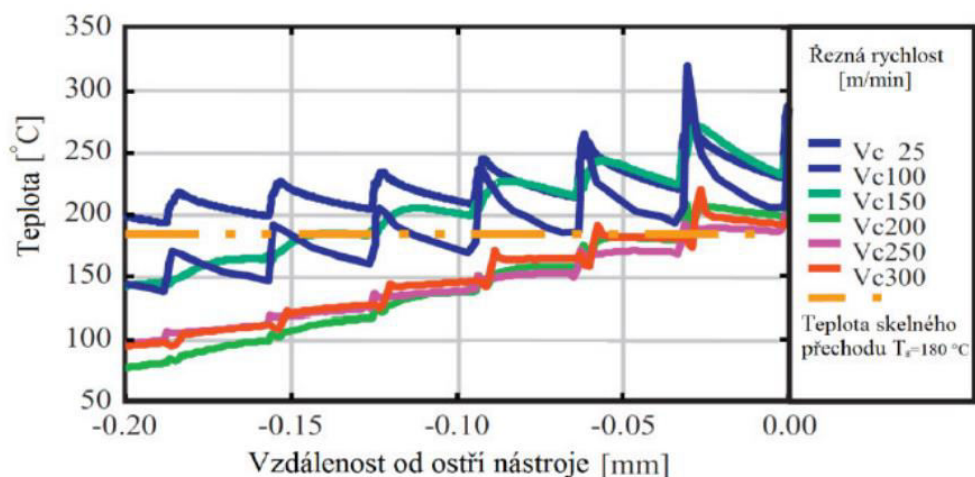


Obr. 10 (a) Druhy opotřebení nástroje při obrábění FRP, (b) průřez hrany řezu [10]

2.3.6 Teplo vzniklé při frézování

Při obrábění FRP kompozitů nastává zásadní problém s odvodem tepla z místa řezu, především díky nízké tepelné vodivosti polymerních matic. Při obrábění polymerů vzniká smykem teplo v oblasti primární a sekundární plastické deformace vlivem tření třísky o čelo nástroje. V oblasti terciální plastické deformace vzniká tření obrobenej plochy o břit nástroje vlivem elastické deformace. Ve srovnání s obráběním kovů, kde je až 70% vzniklého tepla odváděno třískou, kvůli vysoké rezné rychlosti, je při obrábění polymerů 90% tepla odvedeno třískou, především díky tomu, že teplo se nedostane téměř k nástroji. Kvůli tomuto faktu může matrice termosetického materiálu díky lokálnímu ohřevu začít hořet, termoplastická se může zase nalepovat na již obrobenej povrch. V porovnání jsou vlákna z uhlíku schopna odvádět teplo ve směru jejich os lépe než aramidová, nebo skelná vlákna, což vede k lepšímu odvodu tepla z místa řezu. Přesto má však spojení s polymerní maticí výsledný CFRP kompozit velmi nízkou tepelnou vodivost, je proto třeba sledovat hodnotu teploty skelného přechodu matrice a teplotu v těsné blízkosti ostří nástroje. Teplota se se zvyšující vzdáleností

od ostří rapidně snižuje díky nízké vodivosti matrice. Při překročení teploty skelného přechodu dojde k nenávratné ztrátě pevnosti matrice a ke zhoršení kvality obrobené plochy. V grafu je možné vidět závislost teploty na vzdálenosti od ostří nástroje. Chlazení je problematické kvůli nasákavosti matrice a olejové emulze se z těchto materiálů velice špatně odstraňují. Rozdílné teplotní koeficienty roztažnosti mohou přispívat k pnutí materiálu, které můžou i obrobek poškodit. [11]



Graf 1 Závislost teploty vzorku na vzdálenosti od oblasti primární plastické deformace [11]

2.3.7 Řezné podmínky

Firma SandvikCoromant disponuje ve své nabídce nástrojů i nástroji pro frézování uhlíkových vláknových kompozitů. Mezi nejčastější operace frézování těchto materiálů patří frézování hran a obrysů dílu. Jako zástupce mezi nástroji byl vybrán nástroj CoroMillPlura (obr. 11 vlevo), pro který výrobce udává doporučené řezné podmínky: $v_c = 200$ m/min, $f_z = 0,15$ mm/zub. Jako další operace frézování uhlíkových dílů je drážkování, pro tuto operaci má zmiňovaný výrobce v nabídce nástroj CoroMillPlura N20C (obr. 11 vpravo), pro který doporučuje řezné podmínky: $n = 10000$ ot/min, $v_f = 3200$ mm/min, f_z pro hrubování = 0,03 - 0,08 mm/zub a f_z pro dokončování = 0,02 - 0,04 mm/zub.



Obr. 11 Nástroje SandvikCoromant [22]

2.3.8 Chlazení při obrábění

Chladicí kapalina může pomoci nebo uškodit. Volba obrábění za mokra nebo za sucha se provádí na základě operace obrábění. Pokud tato operace bude generovat velké množství tepla, je nutné použít chladicí kapalinu. Chladicí kapalina může také pomoci nižší teploty řezné hrany což je pro diamantové nástroje rozhodující, protože diamant degraduje při mnohem nižších teplotách než tradiční nástrojové materiály. Použití chladicí kapaliny může také pomoci při odvádění prachu.

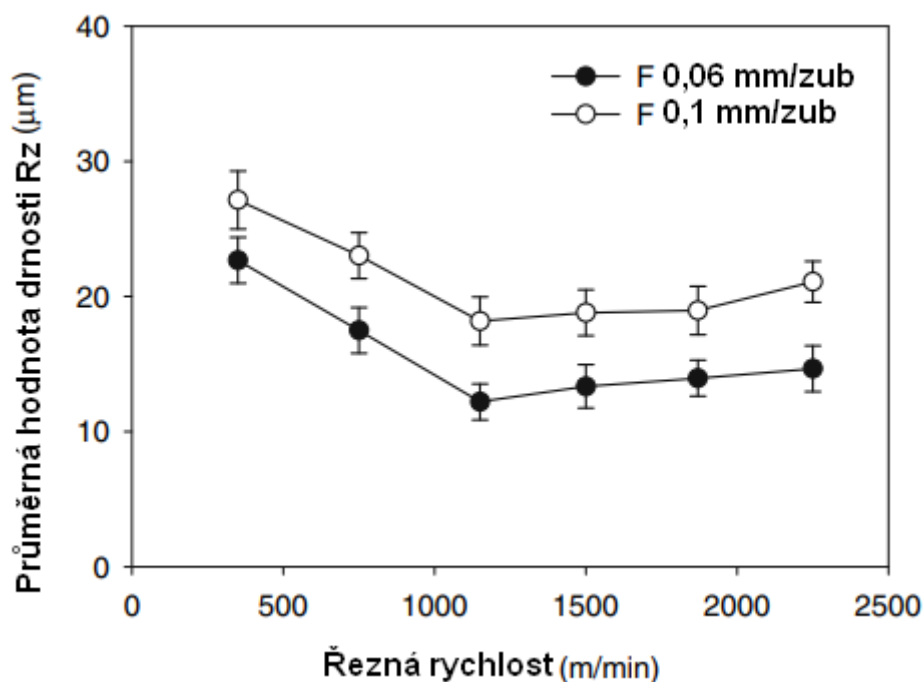
Vakuum je další možnost k regulaci prachu. Volba chladicí kapaliny nebo vakua pro regulaci prachu často závisí na tom, jak velká plocha vytváří prach. U mnoha jednobodových soustružnických operacích se prach koncentruje na malé ploše a vakuum funguje dobře. Při frézování velkých součástí může být těžší aplikovat vakuum, proto je pro regulaci prachu preferována chladicí kapalina.

U většiny kompozitních materiálů je upřednostňována jako chladicí kapalina čistá voda. Pokud je důležitá kontrola rzi, lze přidat malé množství inhibitoru rzi (1-2 %). Je důležité používat ve vodě rozpustnou chladicí kapalinu, protože oleje mohou nepříznivě ovlivnit lepení laku. Vzhledem k poréznímu povrchu kompozitů a tendenci vláken k prosakování olejů a rozpouštědel do vnitřku dílu je důležitá čistota, protože je téměř nemožné vyčistit nežádoucí nečistoty, jako jsou oleje. Jakákoli chladicí kapalina by měla být ověřena, že nebude rušit barvu anebo lepidlo plánované pro použití s kompozitním materiálem.

Poslední otázkou, kterou je třeba u chladicích kapalin zvážit, je to, že při použití chladicí kapaliny k zadržování prachu je výsledkem směs chladicí kapaliny a prachu, která je kalem. Likvidace těchto kalů často vyžaduje dodatečné úpravy, jako je odstranění přebytečné vody, než se dostane na skládku. Tyto dodatečné náklady jsou jedním z důvodů, proč upřednostňovat vakuum před regulací prachu chladicí kapaliny, když nejsou potřebné chladicí vlastnosti kapaliny. [10]

2.3.9 Kvalita obrábění

Kvalita obrábění při frézování je dána integritou povrchu, která zahrnuje tepelné a mechanické poškození povrchu a také delaminace horní a spodní vrstvy laminátové struktury. Kvalita povrchu je ovlivněna posuvem, poloměrem špičky nástroje a opotřebením nástroje. Drsnost povrchu se obecně zvyšuje s rychlostí posuvu. Obr. 12 ukazuje variantu drsnosti povrchu R_z s řeznou rychlostí pro hodnoty dvou posuvů na zub při frézování PKD frézou. Drsnost povrchu klesá s nárůstem řezné rychlosti až do 1130 m/min. Další navýšení řezné rychlosti vede k mírnému zvýšení drsnosti povrchu. Zvýšení posuvu na zub způsobuje výrazné zvýšení drsnosti povrchu. To lze připsat teplu vznikajícímu v důsledku vyššího tření. Zvýšení rychlosti posuvu zase způsobí prudký pokles nárůstu síly posuvu, který zase způsobí vyšší tření. [10]



Obr. 12 Variace drsnosti povrchu s řeznou rychlostí a posuvem na zub při obrábění FRP [10]

3 Metodika experimentů

Metodika měření, je část diplomové práce, která pojednává o vybraných a provedených měření. Tato část obsahuje přípravu vzorků, popis obráběných materiálů, postupy obrábění a měření zkoumaných veličin.

Experimentální vzorky byly zkoumány v rámci rozměrové přesnosti, integrity povrchu, teplot a sil vzniklých při obrábění a trvanlivosti řezného nástroje při použití procesní kapaliny a bez ní.

Obrábění vzorků bylo prováděno na univerzální konzolové frézce FNG 32 v laboratoři třískových technologií a procesů katedry obrábění a montáže v budově L - Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, Technické univerzity v Liberci. Zařízení potřebné k měření zmíněných veličin se nacházelo na stejném místě.

3.1 Výroba vzorků

Pro experimenty byly zvoleny 4 materiály:

1. čistá epoxidová pryskyřice,
2. epoxidová pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny,
3. epoxidová pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě pramenů,
4. epoxidová pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny.

3.1.1 Matrice

Pro výrobu kompozitních vzorků byla jako matrice zvolena dvousložková nízkomolekulární epoxidová pryskyřice ChS-EPOXY 520 (Districhem a. s.) (viz obr. 13). K vytvrzování pryskyřice bylo použito tvrdidlo T0492 (viz obr. 13), přidávané v hmotnostním poměru 100:26 (Districhem a. s.).



Obr. 13 epoxidová pryskyřice a tvrdidlo

3.1.2 Plnivo

Uhlíková vlákna byla použita ve třech formách. Krátká recyklovaná vlákna Carbiso™ MF (EasyComposites Ltd.), uhlíkový roving 3700 tex 50K. (HAVEL COMPOSITES CZ, s.r.o.) a uhlíková tkanina 800 tex 12k, (HAVEL COMPOSITES, CZ, s.r.o.). Tkanina byla kolmo k podélnému uspořádání uhlíkových vláken protkána polyesterovými vlákny s označením 7,6 dtex. Měrná hmotnost tkaniny byla 380 g/m².

3.1.3 Vzorky

Čistá pryskyřice - příprava vzorků čisté pryskyřice probíhala volbou vhodného druhu tohoto materiálu, dále odlití do forem, vytvrzení a poté konečná rozměrová úprava jednotlivých vzorků.

Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě pramenů - nastříhané prameny na stejné rozměry viz obr. 14 byli nakladeny do formy a poté zality epoxidovou pryskyřicí, následně zalité vzorky byli vytvrzeni a poté upraveny na dané rozměry.



Obr.14 Prameny uhlíkových vláken

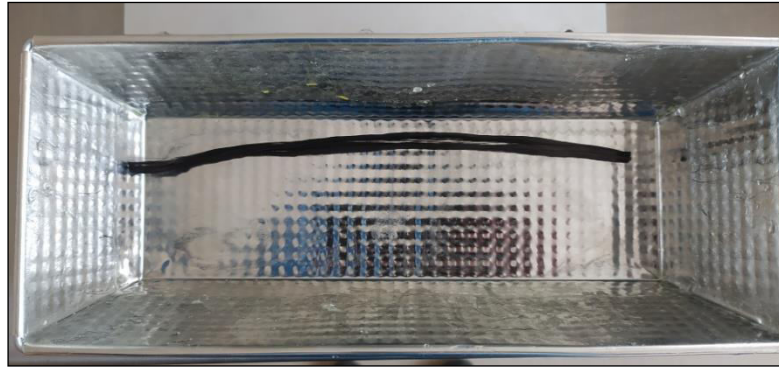
Pryskyřice s uhlíkovými vlákny ve formě tkaniny - Vzorky byly vyrobeny tak, že vrstvy tkaniny byly v separované formě kladeny na sebe a prosycovány epoxidovou pryskyřicí s tvrdidlem. Při přípravě vzorků bylo dbáno na to, aby pryskyřice obalila uhlíková vlákna a vytvořila požadované mezifázové rozhraní.

Pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny - vzorky byly vyrobeny s plněním 40 ds. Označení 40 ds značí, že k 100 g pryskyřice bylo přidáno 40 g recyklovaných uhlíkových vláken. Tato jednotka eliminuje v průmyslu nutnost přepočítávat koncentraci na hmotností procenta.

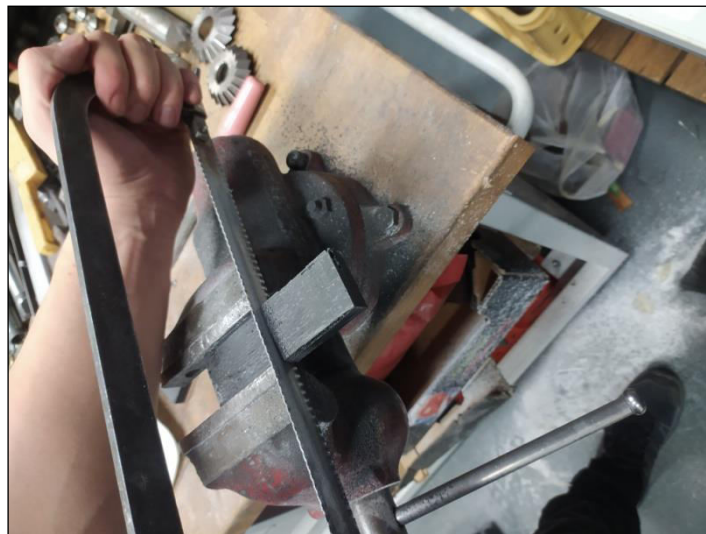
Všechny vzorky byly po dobu 24 hodin vytvrzovány při teplotě $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Po vyjmutí z formy byly všechny vzorky následně dotvrzeny při teplotě 50°C po dobu 10 hodin. Při vytvrzování ani dotvrzování nebyl použit zvýšený tlak.

3.1.4 Příprava vzorků

Vzorky byly odlévány do různých forem (obr. 15), ze kterých byly následně nařezány (obr. 16) a obrobena na potřebné rozměry. Přesnost rozměrů vzorků nebyla tolik důležitá, podstatná byla délka vzorku, která činila 60 mm. Řezání vzorků bylo prováděno ruční pilkou s jemnými zuby, které bránily hrubému přetřhání uhlíkových vláken.



Obr.15 Příklad použité formy pro odlití vzorků



Obr.16 Řezání vzorků

Dále byly vzorky ze všech stran zarovnány, aby mohli být při obrábění pohodlně a přesně upnuty ve svěráku. Tato operace byla provedena pomocí čelní frézy s VBD na frézce FNG 32 (obr. 18). Aby se zabránilo vdechnutí nežádoucích částic prachu z uhlíkových vláken byla při přípravě vzorků, ale také při obrábění použita ochranná filtrační polomaska viz obr. 19.



Obr. 17 Ochranná filtrační maska



Obr.18 Zarovnávání vzorků

3.2 Použité stroje, nástroje

Veškeré frézovací operace byly prováděny na univerzální konzolové frézce FNG 32 od výrobce TOS Olomouc (obr. 19)



Obr. 19 Univerzální konzolová frézka FNG 32

Parametry frézky:

Univerzální konzolová frézka FNG 32		
Charakteristika stroje	Hodnota	Jednotky
Rozměr pracovní plochy	800 x 400	[mm]
Maximální zatížení stolu	350	[kg]
Pracovní zdvih podélný	600	[mm]
Pracovní zdvih příčný, svislý	400	[mm]
Posuv X, Y	15-1000	[mm/min]
Posuv Z	6-400	[mm/min]
Rychloposuv X, Y	2000	[mm/min]
Rychloposuv Z	800	[mm/min]
Rozsah otáček vřetena	50-4000	[ot/min]
Počet rychlostních stupňů vřetena	2	[°]
Natočení vertikálního vřetena	±90	[°]
Výkon hlavního motoru vertikálního vřetena	4	[kW]
Výkon posuvného motoru vertikálního vřetena	1,1	[kW]
Celkový příkon stroje	22	[kVA]

Tab. 1 Parametry frézky FNG 32

3.2.1 Použitý nástroj

Pro frézování vzorků byla použita válcová stopková fréza Ø25 mm se čtyřmi vyměnitelnými břitovými destičkami (obr. 20 vpravo). Při frézování byla použita však použita pouze jedna destička, kvůli jednoduššímu a přesnějšímu měření sil. Pro orovnávaní byla použita válcová stopková fréza s VBD (obr. 20 vpravo)

Pro obrábění byla zvolena břitová destička TNGX 100404SR-F od firmy Pramet (obr. 21).



Obr. 20 Použité frézy při obrábění materiálů



Obr. 21 Použitá břitová destička

Měření bylo rozděleno na 2 sady, první sada měření byla bez použití procesní kapaliny a druhá byla s použitím procesní kapaliny.

Jako procesní kapalina byla zvolena kapalina složená z vody a mazací látky Blasocut BC 25 MD, která byla k místu řezu přiváděna pomocí integrovaného chladicího systému frézky FNG 32.

3.3 Měřené parametry při frézování

Jako zvolené měřené parametry byly:

- síla,
- teplota,
- rozměrová přesnost vzorků,
- drsnost povrchu vzorků,
- trvanlivost rezného nástroje.

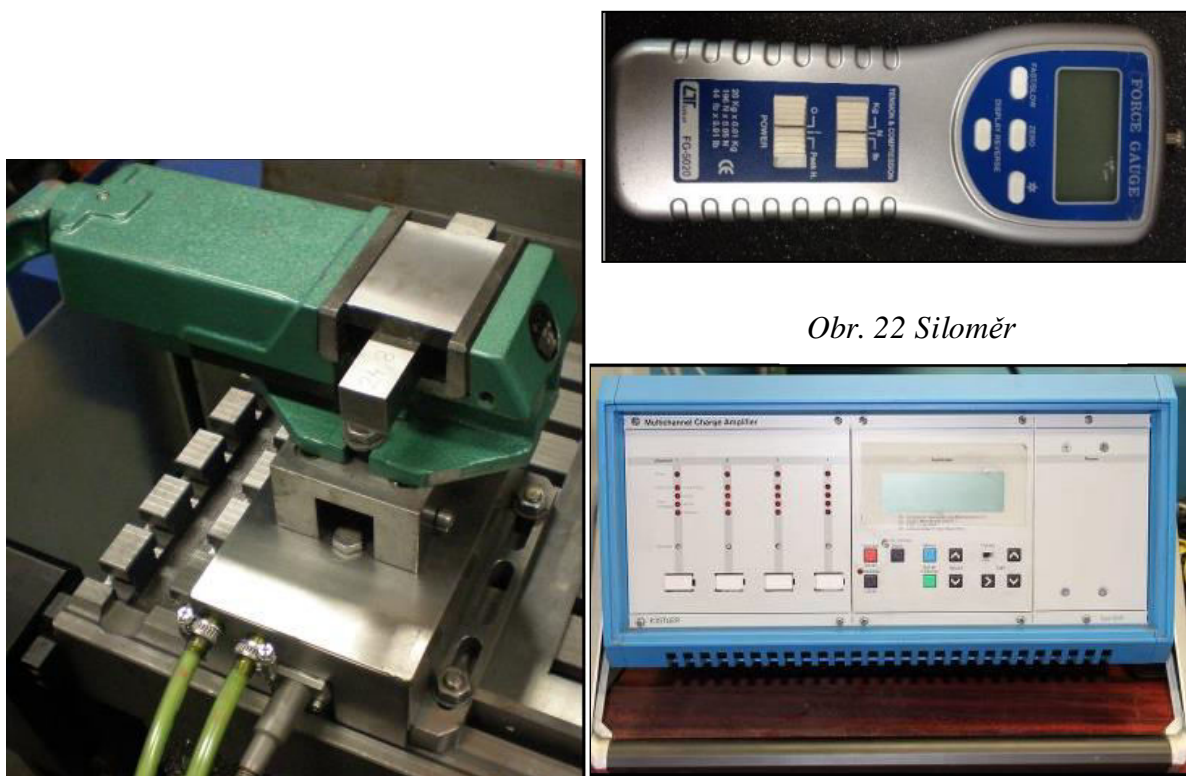
Všechny tyto parametry byly zkoumány při obrábění bez procesní kapaliny a s procesní kapalinou.

3.3.1 Měření síly

K měření řezných sil byl použit tříložkový piezoelektrický dynamometr KISTLER (obr. 23). Piezoelektrické snímače jsou založeny na krystalu, který při zatížení produkuje elektrický náboj. Ten je přímo úměrný působící síle. V případě poklesu síly se náboj lineárně snižuje, až zcela vymizí v případě nulového zatížení. [21]

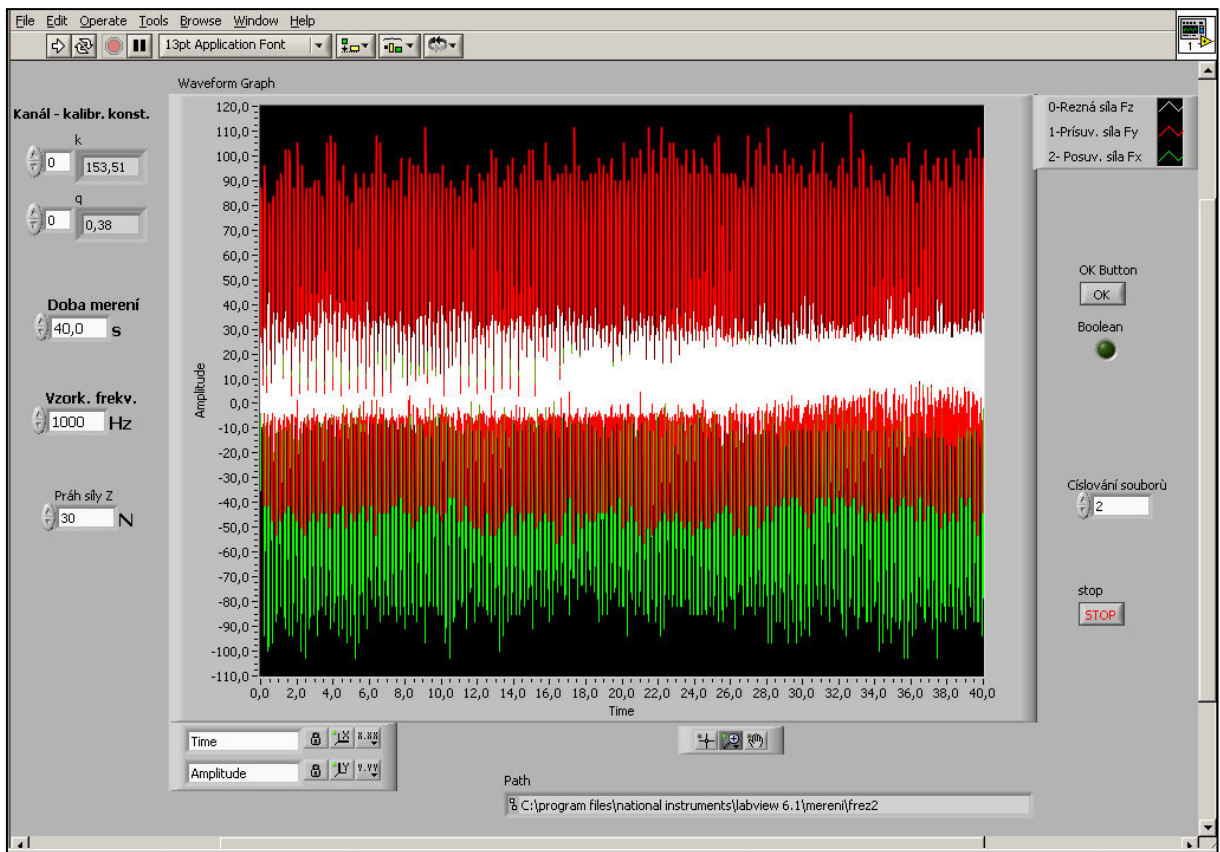
Náboj z piezoelektrického snímače musí být zesilován. K tomuto účelu byl použit nábojový zesilovač (obr. 23). Signál ze zesilovače vstupuje do počítače, kde byl následně vyhodnocen v softwaru LabVIEW, kde byla data převedena na grafy jednotlivých složek sil. Z tohoto grafu byly následně vybrány detaily pěti míst, ze kterých bylo odečteno 5 hodnot (viz. obr. 02).

Před počátkem měření musel být dynamometr patřičně přesně ustaven na stole frézky a zkalibrován. Ustaven byl pomocí číselníkového úchylkoměru a zkalibrován pomocí siloměru (obr. 22). Siloměrem se tlačilo ve směru os frézky (x, y, z) a na každou osu si software dopočítal konstanty potřebné k přesnému měření.

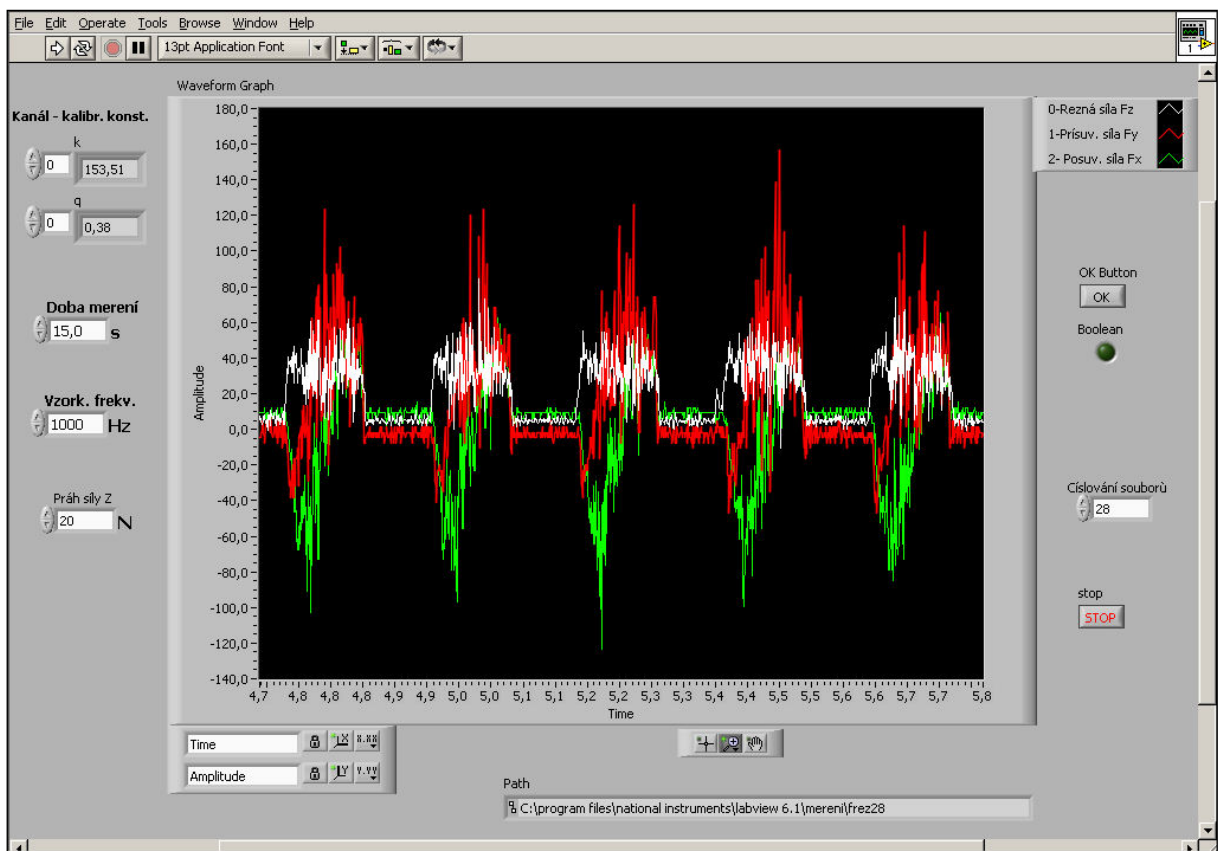


Obr. 22 Siloměr

Obr.23 Dynamometr KISTLER a nábojový zesilovač



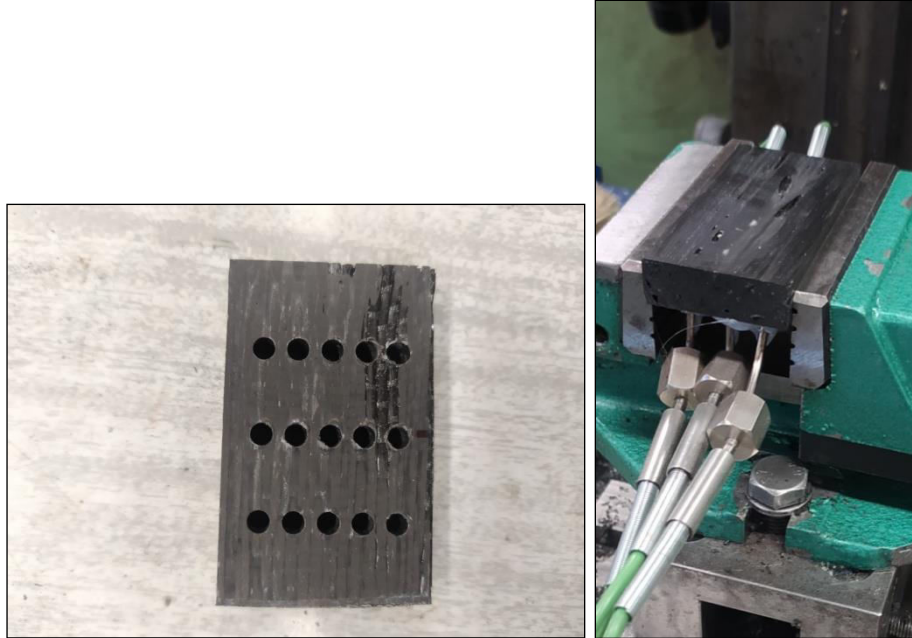
Obr.24 Výstup ze softwaru LabVIEW



Obr.25 Detail pěti hodnot

3.3.2 Měření teplot

Pro měření teplot zkoumaného materiálu byly použity termočlánky typu K, které byly vloženy a připevněny do děr, vyvrtaných ve vzorcích (obr. 26). Termočlánky byly připevněny pomocí tavné pistole.



Obr. 26 Vzorek pro měření teplot

Do každého vzorku bylo v řadě vyvrtáno 5 děr, do kterých byly připevněny termočlánky. Teplota byla měřena 0,5 mm pod místem řezu. Teplota byla měřena při různých řezných podmínkách, s použitím řezné kapaliny a bez ní.

Termočlánky byly připojeny do sběrnice, která byla připojena k řídicí jednotce (obr. 27), která následně převáděla mV na °C. Data byla následně přenesena na počítač a vyhodnocena pomocí softwaru Microsoft Excel.

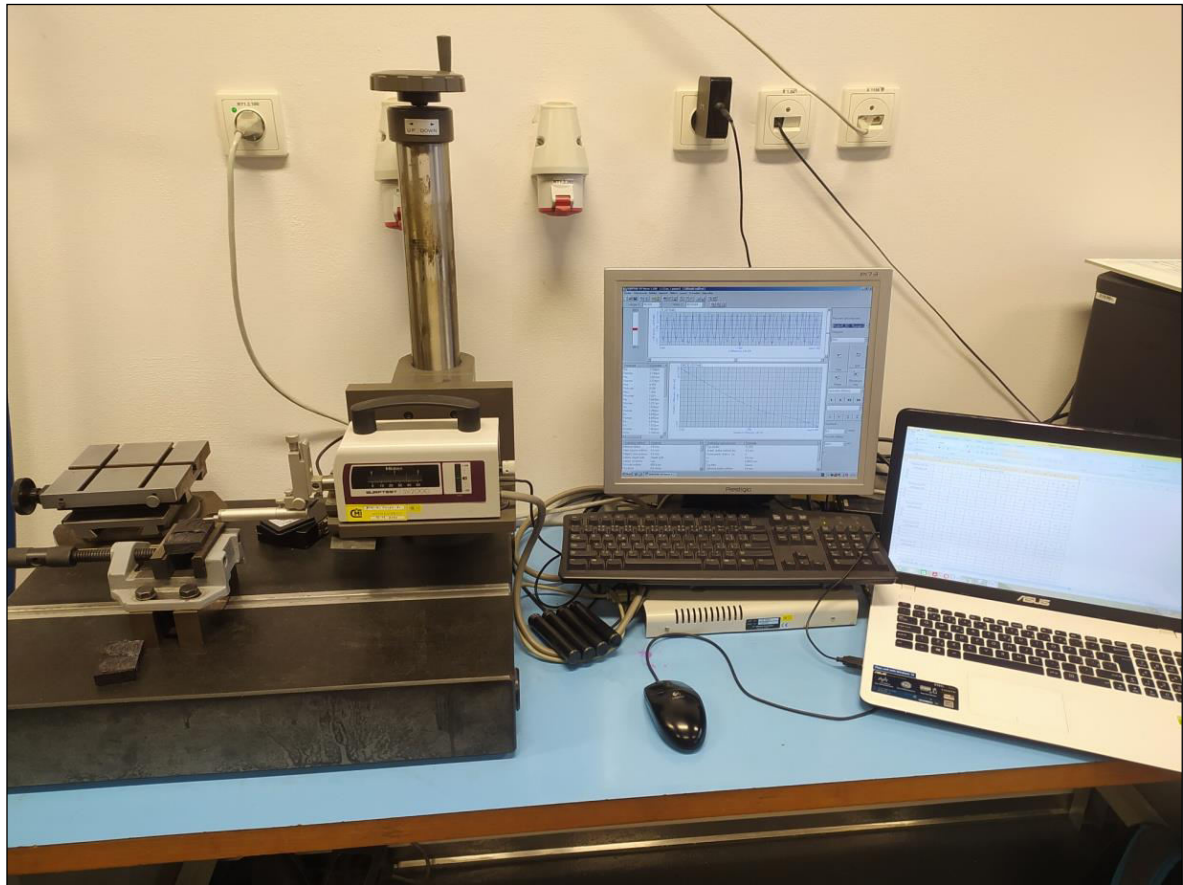


Obr. 27 Řídící jednotka

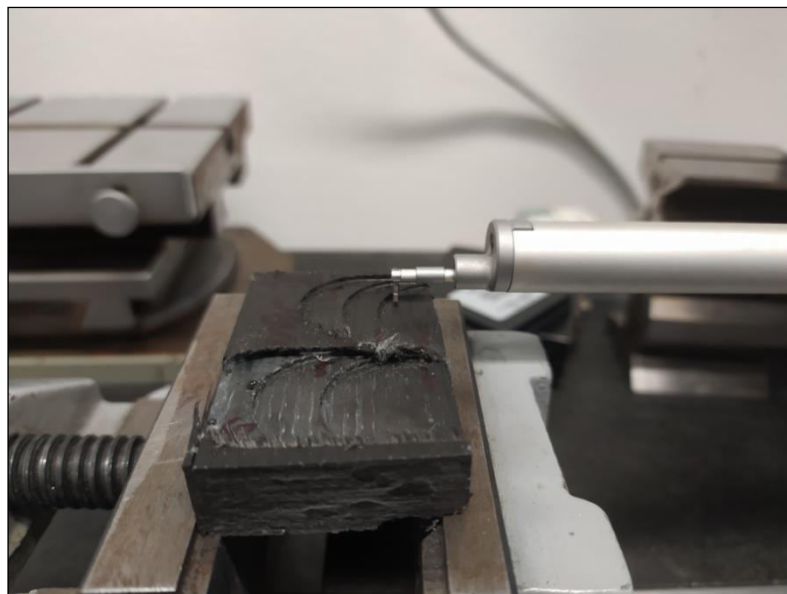
3.3.3 Měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu bylo realizováno na dotykovém profilometru MITUTOYO SV-2000N2 SURFTEST, zobrazeného na obr. 28. Profilometr se skládá z mechanické a elektronické části. Mechanická část v podobě diamantového hrotu snímá nerovnosti na povrchu. Vertikální pohyb hrotu je transformován na elektrický signál, který je následně zpracován pomocí softwaru Surfpack v připojeném PC. Software Surfpack je schopen měřit 26 parametrů drsnosti, které odpovídají normám ISO, DIN, ANSI a JIS.

Profilometr byl použit pro získání parametrů drsnosti R_a , R_z a R_t . Parametry drsnosti byly měřeny na povrchu otvorů po operaci frézování tak, že zkušební vzorek byl umístěn do držáku. Pomocí otočné kličky byla nastavena poloha diamantového hrotu profilometru tak, aby byl v kontaktu s obrobenu plochou viz obr. 29. Naměřené parametry drsnosti byly následně zobrazeny pomocí programu SURFPAK - SV-2000N2.



Obr. 28 Profilometr MITUTOYO SV-2000N2



Obr. 29 Detail měření drsnosti povrchu

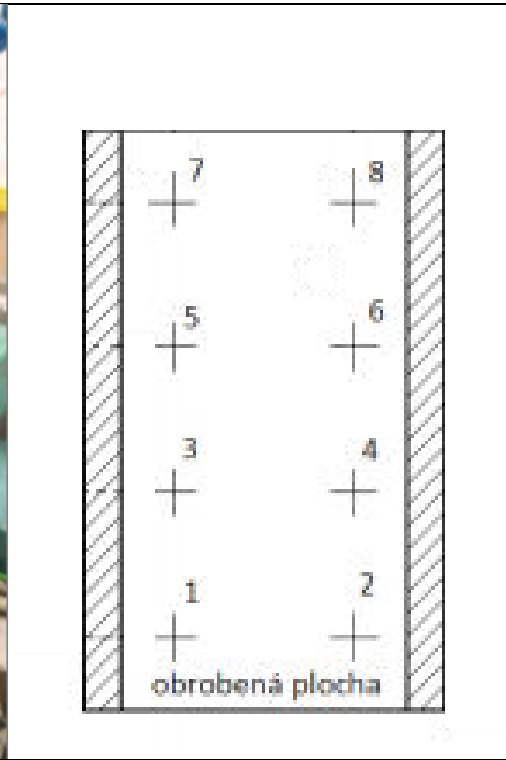
3.3.4 Měření rozměrové stability

Pro měření rozměrové přesnosti byl použit digitální mikrometr Mitutoyo s přesností 0,001 mm. (obr. 30). Vzorek byl upnut do svěráku, poté byla profrézována drážka, kterou se

zarovnal vzorek a tloušťka tohoto vzorku byla brána jako výchozí rozměrová hodnota. Vzorek byl přeměřen na 8 místech, dle obr. 31. Posléze byl materiál ofrézován s hloubkou řezu $a_p = 1$ mm a byly znovu přeměřeny hodnoty tloušťky mikrometrem. Takto byly měřeny 4 hloubky řezu po úběru 1 mm.



Obr. 30 Mikrometr Mitutoyo



Obr.31 Rozložení měřených míst

3.3.5 Měření opotřebení nástroje

Pro zjištění opotřebení břitové destičky byl použit dílenský mikroskop ZEISS (obr. 32). Díky nitkovému kříži v okuláru a mikrometrickým šroubům v posuvových osách X a Y bylo možné odečíst hodnotu opotřebení nástroje (obr. 34, 36).

V rámci experimentu byly zvoleny konstantní řezné podmínky: otáčky $n = 500$ ot/min, rychlost posuvu $v_f = 25$ m/min, hloubka záběru $a_p = 1$ mm.

Břitová destička byla přeměřena vždy po ujetí celé délky obrobku (60 mm). Celková ujetá dráha břitu destičky se rovnala 37 m. Výpočet dráhy nástroje:
Obvod kruhové výseče nástroje:

$$o = \pi \cdot R = \pi \cdot 12,5 = 39,27 \text{ mm}$$

Posuv na zub:

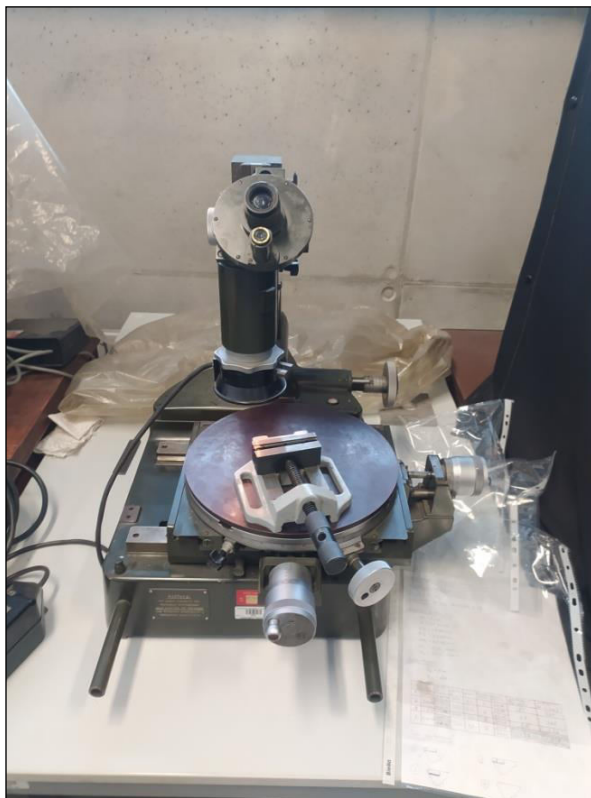
$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} = \frac{25}{500 \cdot 1} = 0,05 \text{ mm}$$

Celková ujetá vzdálenost nástroje (viz obr. 35):

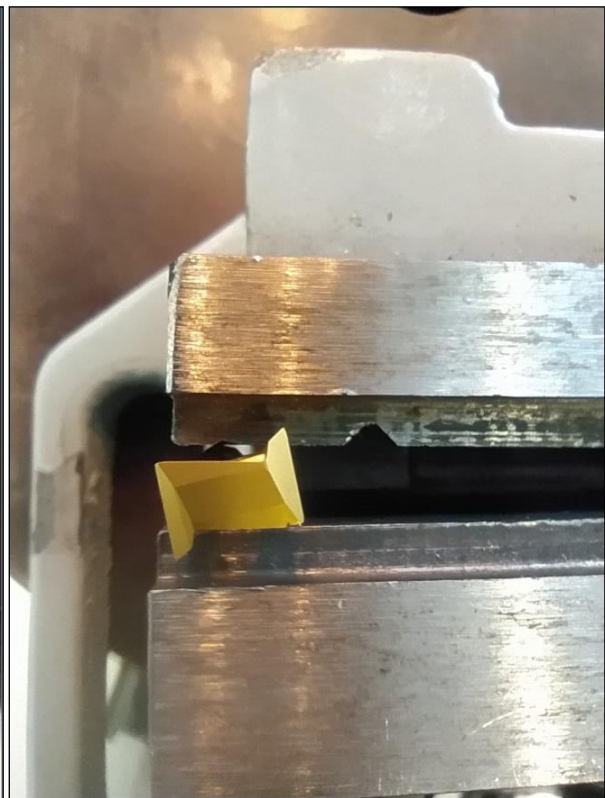
$$L = 47,5 \text{ mm}$$

Ujetá dráha nástroje po jednom úseku:

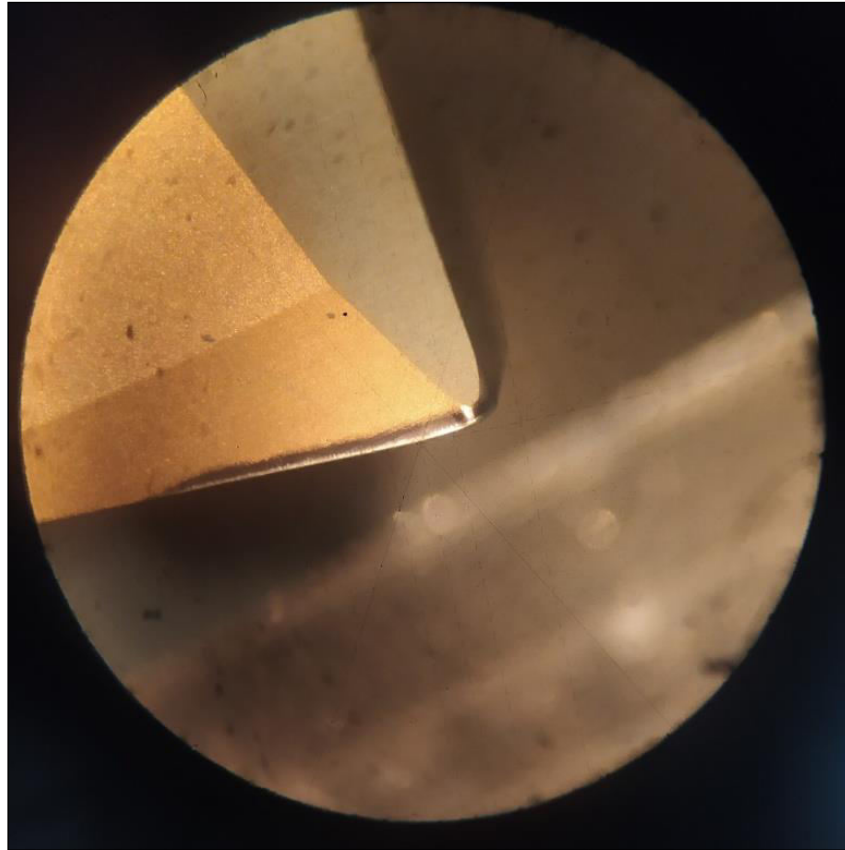
$$s = \frac{o \cdot L}{f_z} = \frac{39,27 \cdot 47,5}{0,05} = 37306,5 \text{ mm} \cong 37 \text{ m}$$



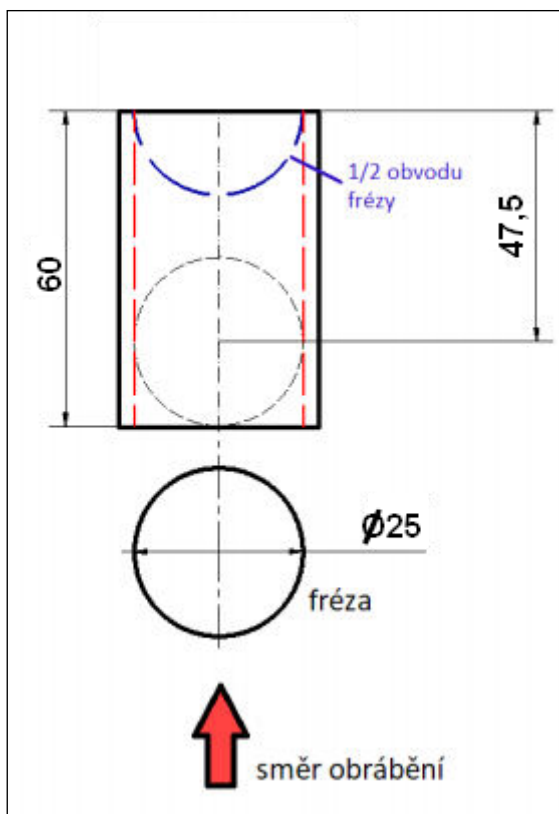
Obr. 32 Dílenský mikroskop ZEISS



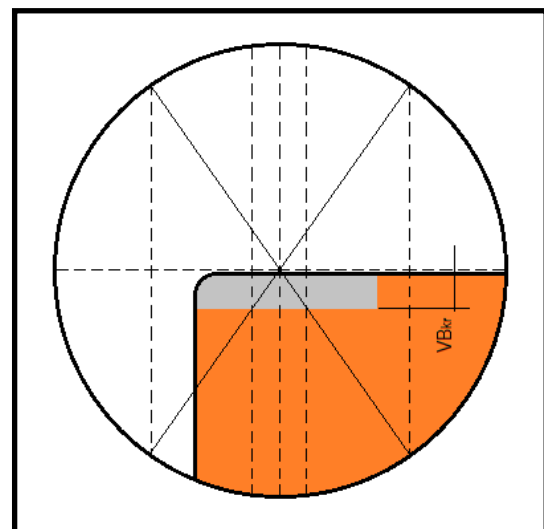
Obr. 33 Upnutí destičky do svěráku



Obr. 34 Detail velikosti opotřebení VB z mikroskopu



Obr. 35 Dráha frézy při obrábění vzorku



Obr. 36 Nitkový kříž v okuláru

Měření bylo provedeno 3x pro každý vzorek bez kapaliny a 3x s kapalinou po 5ti úsecích, kde postupně nástroj najel dráhu 37 m, 74 m, 111 m, 148 m a 185 m. Po uražení každého daného úseku byla destička odebrána z nástroje, upnuta do dílenského svěráku (obr. 33) a proměřeno opotřebení břitu pomocí mikroskopu.

4 Realizace experimentů

Tato kapitola obsahuje popis prováděných měření a shrnutí dosažených výsledků v oblasti naměřených sil při frézování, dosažených drsností povrchů, opotřebení nástroje, rozměrové přesnosti obrobku a vzniklých teplot při obrábění. Měření byla prováděna bez procesní kapaliny nebo s procesní kapalinou.

Prezentované výsledky jsou váženým aritmetickým průměrem a jejich statistickým intervalem spolehlivosti z dílčích výsledků, které jsou k dispozici na příloženém CD.

4.1 Řezná síla

Pro tento experiment byly zvoleny jako řezné podmínky zvoleny kombinace 3 různých otáček, 3 hloubek záběrů a 2 posuvů viz tab. 2.

řezné podmínky			
řezné podmínky	otáčky n [ot/min]	hloubka záběru a_p [mm]	rychlost posuvu v_f [mm/min]
1	250	1	25
2	250	1	75
3	250	2	25
4	250	2	75
5	250	3	25
6	250	3	75
7	500	1	25
8	500	1	75
9	500	2	25
10	500	2	75
11	500	3	25
12	500	3	75
13	1000	1	25
14	1000	1	75
15	1000	2	25
16	1000	2	75
17	1000	3	25
18	1000	3	75

Tab.2 Řezné podmínky

Měření sil bylo provedeno na 4 materiálech zmíněných v kapitole 3.1 za zvolených řezných podmínek s přítomností procesní kapaliny nebo bez ní. Byla měřena síla v ose X a

ose Z. Postup měření je uveden v metodice měření v kapitole 3.3.1. Při měření se postupovalo podle tohoto postupu. Tabulky byly vytvořeny pro jednotlivé materiály a jako výsledky sil byly použity statisticky vyhodnocené hodnoty z několika měření.

4.1.1 Řezná síla u čisté pryskyřice

Jako první a výchozí materiál byla zvolena čistá pryskyřice bez plniva. Výsledky sil v osách X a Z s procesní kapalinou nebo bez ní jsou v tab. 3

řezné síly u čisté pryskyřice				
řezné podmínky	F_x bez PK [N]	F_x s PK [N]	F_z bez PK [N]	F_z s PK [N]
n250, a_p1 , v_f25	22,694 ± 0,942	42,688 ± 1,052	24,584 ± 2,442	38,424 ± 1,914
n250, a_p1 , v_f75	58,496 ± 1,361	51,400 ± 1,772	40,008 ± 1,402	50,216 ± 0,630
n250, a_p2 , v_f25	49,144 ± 0,789	71,224 ± 0,735	26,032 ± 1,541	41,984 ± 0,672
n250, a_p2 , v_f75	81,592 ± 2,167	94,352 ± 2,604	46,312 ± 1,515	54,624 ± 1,719
n250, a_p3 , v_f25	73,264 ± 2,423	109,640 ± 1,650	27,184 ± 0,995	43,024 ± 1,317
n250, a_p3 , v_f75	111,608 ± 4,169	122,024 ± 4,048	51,088 ± 1,255	61,848 ± 1,738
n500, a_p1 , v_f25	18,608 ± 0,884	36,392 ± 1,024	28,856 ± 0,888	42,272 ± 1,183
n500, a_p1 , v_f75	30,864 ± 0,749	56,584 ± 1,995	39,376 ± 1,524	57,344 ± 1,603
n500, a_p2 , v_f25	41,168 ± 0,609	68,592 ± 1,230	26,648 ± 1,871	44,368 ± 3,879
n500, a_p2 , v_f75	64,928 ± 1,913	83,440 ± 1,912	42,624 ± 1,962	61,424 ± 1,394
n500, a_p3 , v_f25	86,848 ± 2,093	98,416 ± 2,097	34,760 ± 1,272	56,288 ± 1,312
n500, a_p3 , v_f75	95,992 ± 1,491	125,384 ± 2,359	47,200 ± 2,347	60,736 ± 1,888
n1000, a_p1 , v_f25	25,744 ± 1,653	45,512 ± 1,942	38,536 ± 0,883	75,600 ± 1,364
n1000, a_p1 , v_f75	29,504 ± 0,722	59,192 ± 1,254	54,272 ± 1,493	84,336 ± 1,668
n1000, a_p2 , v_f25	49,240 ± 2,080	72,024 ± 2,684	50,536 ± 0,735	64,008 ± 2,090
n1000, a_p2 , v_f75	37,872 ± 1,518	109,920 ± 2,106	43,352 ± 1,302	61,000 ± 1,274
n1000, a_p3 , v_f25	64,768 ± 1,441	90,624 ± 1,556	43,328 ± 1,361	70,328 ± 1,716
n1000, a_p3 , v_f75	72,592 ± 1,405	118,400 ± 1,915	40,344 ± 0,918	55,272 ± 2,128

Tab.3 Řezná síla u čisté pryskyřice

V tab. 3 jsou uvedeny hodnoty naměřených sil v ose X a ose Z u čisté pryskyřice.

Nejvyšší síla v ose X - 125,384 N byla naměřena při měření s procesní kapalinou a zvolených řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 75$ mm/min).

Nejnižší síla v ose X - 36,392 N byla naměřena při obrábění bez procesní kapaliny a při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min).

Nejvyšší síla při měření v ose Z - 84,336 N byla naměřena při obrábění s procesní kapalinou a při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 75$ mm/min).

Nejnižší síla v ose Z - 38,424 N vznikla při obrábění bez procesní kapaliny a při řezných podmínkách ($n = 250$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min).

4.1.2 Řezné síly u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken

řezné síly u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken				
řezné podmínky	F_x bez PK [N]	F_x s PK [N]	F_z bez PK [N]	F_z s PK [N]
n250, a_p1 , v_f25	98,424 ± 1,275	106,520 ± 3,305	31,160 ± 0,924	69,440 ± 1,012
n250, a_p1 , v_f75	138,848 ± 0,921	122,064 ± 2,207	40,248 ± 0,702	84,816 ± 2,544
n250, a_p2 , v_f25	157,240 ± 1,918	275,456 ± 1,544	24,896 ± 0,541	50,616 ± 2,708
n250, a_p2 , v_f75	231,824 ± 2,660	288,568 ± 5,696	48,600 ± 0,976	74,864 ± 1,426
n250, a_p3 , v_f25	234,552 ± 1,262	351,508 ± 15,247	35,224 ± 0,795	51,912 ± 1,486
n250, a_p3 , v_f75	283,760 ± 4,170	385,720 ± 5,485	46,000 ± 0,953	67,384 ± 4,489
n500, a_p1 , v_f25	97,896 ± 1,343	153,160 ± 3,248	34,400 ± 1,889	60,288 ± 1,909
n500, a_p1 , v_f75	93,696 ± 4,328	184,256 ± 4,143	52,128 ± 2,779	78,232 ± 1,356
n500, a_p2 , v_f25	137,848 ± 1,168	318,176 ± 5,998	34,672 ± 1,116	65,904 ± 2,990
n500, a_p2 , v_f75	182,248 ± 3,113	374,720 ± 4,986	43,992 ± 1,625	73,120 ± 1,189
n500, a_p3 , v_f25	221,128 ± 6,109	430,016 ± 7,575	40,544 ± 0,698	68,896 ± 2,108
n500, a_p3 , v_f75	293,624 ± 2,535	516,856 ± 13,442	66,680 ± 1,778	71,520 ± 2,948
n1000, a_p1 , v_f25	65,280 ± 4,558	93,344 ± 2,330	44,904 ± 1,886	60,912 ± 3,275
n1000, a_p1 , v_f75	123,696 ± 4,783	107,176 ± 3,733	55,216 ± 1,279	83,232 ± 2,286
n1000, a_p2 , v_f25	102,480 ± 2,361	277,684 ± 6,445	37,904 ± 1,281	75,408 ± 5,217
n1000, a_p2 , v_f75	129,912 ± 2,126	339,344 ± 7,970	58,208 ± 1,457	88,744 ± 5,099
n1000, a_p3 , v_f25	194,520 ± 12,573	374,936 ± 11,908	61,008 ± 1,803	80,984 ± 6,764
n1000, a_p3 , v_f75	299,232 ± 4,822	448,568 ± 7,513	57,456 ± 1,456	77,984 ± 3,706

Tab.4 Řezné síly u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken

V tab. 4 jsou uvedeny hodnoty naměřených sil v ose X a ose Z u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken.

Nejvyšší síla v ose X - 516,865 N byla naměřena s procesní kapalinou a při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 75$ mm/min).

Nejnižší řezná síla v ose X - 65,280 N byla naměřena bez použití procesní kapaliny a při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min).

Nejvyšší síla v ose Z - 88,744 N byla naměřena při použití procesní kapaliny a řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 75$ mm/min).

Nejnižší síla v ose Z - 24,896 N byla naměřena bez procesní kapaliny a při řezných podmínkách ($n = 250$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min).

4.1.3 Řezné síly u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken

řezná síla u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken				
řezné podmínky	F_x bez PK [N]	F_x s PK [N]	F_z bez PK [N]	F_z s PK [N]
n250, a_p 1, v_f 25	46,952 ± 1,056	78,776 ± 1,696	26,632 ± 0,785	47,248 ± 1,342
n250, a_p 1, v_f 75	96,824 ± 1,237	124,704 ± 4,351	53,320 ± 1,938	71,976 ± 1,146
n250, a_p 2, v_f 25	112,048 ± 1,859	146,392 ± 1,753	22,616 ± 1,064	40,096 ± 1,125
n250, a_p 2, v_f 75	180,184 ± 3,389	230,032 ± 8,960	39,372 ± 0,931	67,856 ± 1,529
n250, a_p 3, v_f 25	134,112 ± 2,835	248,496 ± 7,811	22,456 ± 0,566	59,344 ± 1,188
n250, a_p 3, v_f 75	178,016 ± 7,424	327,408 ± 5,504	29,048 ± 1,271	66,192 ± 2,498
n500, a_p 1, v_f 25	49,376 ± 1,991	102,728 ± 1,782	30,976 ± 0,970	69,400 ± 2,920
n500, a_p 1, v_f 75	50,704 ± 2,326	124,088 ± 3,941	37,368 ± 2,489	83,608 ± 3,053
n500, a_p 2, v_f 25	92,632 ± 2,220	222,720 ± 2,199	28,056 ± 1,400	65,072 ± 2,667
n500, a_p 2, v_f 75	113,096 ± 3,678	252,112 ± 7,681	36,600 ± 1,583	66,088 ± 3,946
n500, a_p 3, v_f 25	155,368 ± 3,829	320,080 ± 4,494	42,528 ± 0,822	62,056 ± 1,600
n500, a_p 3, v_f 75	211,120 ± 3,159	346,264 ± 7,237	41,472 ± 1,092	100,552 ± 3,404
n1000, a_p 1, v_f 25	69,096 ± 1,078	132,280 ± 3,623	29,384 ± 0,986	75,192 ± 2,275
n1000, a_p 1, v_f 75	86,536 ± 1,830	98,888 ± 1,925	37,952 ± 1,754	104,456 ± 2,010
n1000, a_p 2, v_f 25	73,0160 ± 1,722	260,920 ± 6,909	32,344 ± 1,488	75,720 ± 6,403
n1000, a_p 2, v_f 75	114,152 ± 2,496	258,504 ± 6,728	38,472 ± 1,404	87,784 ± 4,102
n1000, a_p 3, v_f 25	90,976 ± 5,151	291,944 ± 5,672	21,448 ± 1,162	85,848 ± 2,254
n1000, a_p 3, v_f 75	191,048 ± 5,956	377,104 ± 5,930	39,320 ± 0,872	117,232 ± 3,273

Tab.5 Řezné síly u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken

V tab. 5 jsou uvedeny hodnoty řezných sil v ose X a ose Z při obrábění s přítomností procesní kapaliny nebo bez ní a při nastavení různých řezných podmínek.

Nejvyšší síla v ose X - 377,104 N byla naměřena při použití procesní kapaliny a při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 75$ mm/min).

Nejnižší řezná síla v ose X - 78,776 N byla naměřena bez přítomnosti procesní kapaliny a při řezných podmínkách ($n = 250$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min).

Nejvyšší řezná síla v ose Z - 117,232 N byla naměřena při použití procesní kapaliny a při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 75$ mm/min).

Nejnižší řezná síla v ose Z - 21,448 N byla naměřena bez použití procesní kapaliny a při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 25$ mm/min).

4.1.4 Řezné síly u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny

řezné síly u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny				
řezné podmínky	F_x bez PK [N]	F_x s PK [N]	F_z bez PK [N]	F_z s PK [N]
n250, a_p1 , v_f25	46,368 ± 1,137	36,296 ± 1,224	28,384 ± 1,642	46,952 ± 2,292
n250, a_p1 , v_f75	61,240 ± 1,822	68,896 ± 1,138	40,760 ± 2,139	55,040 ± 1,301
n250, a_p2 , v_f25	65,872 ± 1,192	67,496 ± 1,331	28,256 ± 0,740	36,736 ± 1,804
n250, a_p2 , v_f75	89,456 ± 2,372	102,264 ± 2,373	36,256 ± 1,431	58,616 ± 1,301
n250, a_p3 , v_f25	90,192 ± 1,568	104,832 ± 2,486	31,600 ± 0,990	40,280 ± 0,979
n250, a_p3 , v_f75	134,912 ± 1,993	145,928 ± 3,145	41,760 ± 0,685	50,848 ± 0,883
n500, a_p1 , v_f25	37,752 ± 1,761	46,640 ± 2,830	26,648 ± 1,706	58,736 ± 1,609
n500, a_p1 , v_f75	51,648 ± 0,866	62,696 ± 1,605	31,968 ± 0,998	59,928 ± 1,496
n500, a_p2 , v_f25	58,672 ± 1,378	82,272 ± 1,899	29,168 ± 1,357	58,904 ± 1,160
n500, a_p2 , v_f75	75,720 ± 1,181	100,112 ± 2,564	37,320 ± 1,855	70,472 ± 1,945
n500, a_p3 , v_f25	86,264 ± 1,688	111,864 ± 1,814	36,984 ± 1,723	41,768 ± 1,182
n500, a_p3 , v_f75	97,320 ± 3,481	117,488 ± 1,942	40,120 ± 0,967	77,576 ± 1,581
n1000, a_p1 , v_f25	24,616 ± 1,006	56,456 ± 1,346	29,864 ± 1,479	55,152 ± 2,050
n1000, a_p1 , v_f75	58,672 ± 1,626	72,088 ± 2,081	33,440 ± 0,853	73,992 ± 2,055
n1000, a_p2 , v_f25	45,008 ± 1,439	122,024 ± 3,377	39,616 ± 1,655	66,752 ± 1,355
n1000, a_p2 , v_f75	58,528 ± 1,695	120,336 ± 3,469	41,824 ± 0,939	74,632 ± 2,236
n1000, a_p3 , v_f25	59,096 ± 1,226	150,728 ± 2,428	32,944 ± 0,868	68,592 ± 2,532
n1000, a_p3 , v_f75	75,216 ± 1,722	149,328 ± 1,759	36,080 ± 1,996	76,832 ± 1,730

Tab.6 Řezné síly u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny

V tab.6 jsou uvedeny hodnoty řezných sil v ose X a ose Z při obrábění s přítomností procesní kapaliny nebo bez ní a při nastavení různých řezných podmínek.

Nejvyšší síla v ose X - 150,728 N byla naměřena při použití procesní kapaliny a při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 25$ mm/min).

Nejnižší řezná síla v ose X - 24,616 N byla naměřena bez přítomnosti procesní kapaliny a při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min).

Nejvyšší řezná síla v ose Z - 77,576 N byla naměřena při použití procesní kapaliny a při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 75$ mm/min).

Nejnižší řezná síla v ose Z - 26,648 N byla naměřena bez použití procesní kapaliny a při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min).

4.2 Teplota

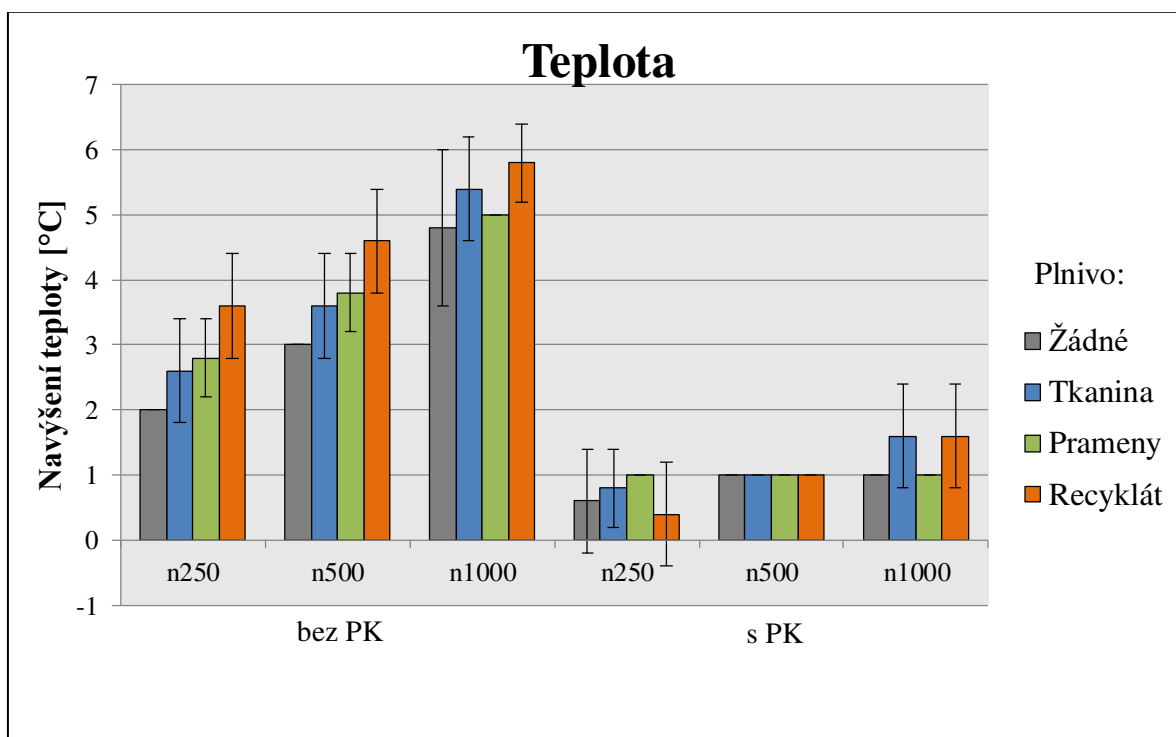
Pro experiment byly jako řezné podmínky zvoleny v kombinaci 3 různé otáčky ($n = 250$ ot/min, $n = 500$ ot/min, $n = 1000$ ot/min), 1 hloubka záběru ($a_p = 1$ mm) a jedna rychlost posuvu ($v_f = 25$ mm/min). Měření se provádělo s použitím procesní kapaliny a bez ní.

Zkoumal se nárůst teploty při frézování v místě měření pomocí termočlánků. Postup měření je popsán v kapitole 3.3.2. Byly zkoumány materiály, které jsou popsány v kapitole 3.1.

V tab. 7 jsou jako výsledky průměry naměřených hodnot se statistickým intervalem spolehlivosti. Hodnoty pro přehlednost byly dále vyneseny do grafu.

Teplota [°C]						
Plnivo	bez PK			s PK		
	n250	n500	n1000	n250	n500	n1000
Žádné	2 ± 0	3 ± 0	4,8 ± 1,2	0,6 ± 0,8	1 ± 0	1 ± 0
Tkanina	2,6 ± 0,8	3,6 ± 0,8	5,4 ± 0,8	0,8 ± 0,6	1 ± 0	1,6 ± 0,8
Prameny	2,8 ± 0,6	3,8 ± 0,6	5 ± 0	1 ± 0	1 ± 0	1 ± 0
Recyklát	3,6 ± 0,8	4,6 ± 0,8	5,8 ± 0,6	0,4 ± 0,8	1 ± 0	1,6 ± 0,8

Tab.7 Nárůst teplot při frézování



Graf 2 Teploty

Z tabulky a grafu je patrné, že nejvyšší nárůst teploty u všech zkoumaných materiálů byl při $n = 1000$ ot/min, kde mezi materiály měla nejvyšší nárůst teploty pryskyřice plněná recyklovanými uhlíkovými vlákny. Při obrábění s procesní kapalinou lze vidět, že nárůsty

teplot byly minimální. Nejmenší nárůst teploty u všech řezných podmínek měla čistá pryskyřice.

4.3 Drsnost povrchu

Pro tento experiment byly použity stejné řezné podmínky jako při měření řezných sil (viz tab. 2). Měření bylo provedeno s použitím procesní kapaliny a bez ní. Zkoumány byly 4 materiály viz. kapitola 3.1. Postup měření je popsán v kapitole 3.3.3. Byly zkoumány 3 parametry drsnosti povrchu (R_a , R_z , R_t). Byly vytvořeny tabulky obsahující výsledky měření k jednomu zkoumanému materiálu viz tab. 8.

4.3.1 Drsnost povrchu čisté pryskyřice

drsnost povrchu čisté pryskyřice [μm]						
řezné podmínky	Ra bez PK	Rz bez PK	Rt bez PK	Ra s PK	Rz s PK	Rt s PK
n250, a _p 1, v _f 25	1,003 ± 0,066	7,508 ± 0,480	10,160 ± 0,823	1,042 ± 0,047	7,308 ± 0,514	9,653 ± 0,927
n250, a _p 1, v _f 75	1,112 ± 0,108	8,715 ± 0,917	15,519 ± 4,960	0,967 ± 0,057	7,750 ± 1,030	11,818 ± 2,437
n250, a _p 2, v _f 25	0,735 ± 0,087	6,132 ± 1,329	10,473 ± 3,576	1,078 ± 0,111	8,385 ± 1,108	13,307 ± 3,880
n250, a _p 2, v _f 75	1,103 ± 0,137	8,331 ± 1,052	12,683 ± 2,025	2,164 ± 0,356	15,141 ± 1,966	23,611 ± 4,520
n250, a _p 3, v _f 25	1,165 ± 0,106	9,496 ± 0,637	13,703 ± 1,945	2,785 ± 0,786	18,138 ± 4,215	29,703 ± 8,409
n250, a _p 3, v _f 75	2,991 ± 1,019	20,696 ± 6,967	37,124 ± 14,191	2,034 ± 0,361	13,854 ± 2,171	22,882 ± 7,085
n500, a _p 1, v _f 25	0,367 ± 0,037	3,272 ± 0,423	5,905 ± 1,560	0,836 ± 0,031	6,171 ± 0,428	8,356 ± 0,736
n500, a _p 1, v _f 75	0,832 ± 0,031	6,580 ± 0,698	9,453 ± 1,651	0,860 ± 0,045	6,407 ± 0,368	8,727 ± 0,937
n500, a _p 2, v _f 25	0,853 ± 0,082	6,677 ± 0,687	10,624 ± 2,478	0,888 ± 0,040	5,982 ± 0,310	7,465 ± 0,557
n500, a _p 2, v _f 75	1,533 ± 0,254	11,480 ± 1,736	19,862 ± 6,013	0,907 ± 0,062	6,269 ± 0,468	8,398 ± 0,725
n500, a _p 3, v _f 25	1,255 ± 0,145	9,606 ± 1,253	16,844 ± 5,609	1,163 ± 0,212	8,589 ± 1,600	15,268 ± 5,918
n500, a _p 3, v _f 75	1,452 ± 0,550	11,093 ± 3,663	19,080 ± 11,496	1,453 ± 0,132	11,117 ± 1,182	17,694 ± 3,772
n1000, a _p 1, v _f 25	0,377 ± 0,017	2,907 ± 0,226	3,957 ± 0,549	0,631 ± 0,109	4,796 ± 1,217	10,280 ± 5,843
n1000, a _p 1, v _f 75	0,453 ± 0,021	3,575 ± 0,447	4,900 ± 1,039	0,533 ± 0,028	4,185 ± 0,316	6,342 ± 0,859
n1000, a _p 2, v _f 25	0,478 ± 0,025	4,100 ± 0,419	5,940 ± 0,870	0,465 ± 0,070	3,614 ± 0,386	5,481 ± 1,581
n1000, a _p 2, v _f 75	0,713 ± 0,104	4,988 ± 0,793	8,702 ± 3,704	0,532 ± 0,030	4,096 ± 0,318	5,367 ± 0,577
n1000, a _p 3, v _f 25	0,741 ± 0,173	5,742 ± 1,572	9,923 ± 3,818	0,855 ± 0,083	7,430 ± 1,853	13,576 ± 5,681
n1000, a _p 3, v _f 75	0,581 ± 0,078	4,624 ± 0,767	7,250 ± 2,586	0,733 ± 0,089	5,545 ± 0,638	8,610 ± 2,816

Tab.8 Drsnost povrchu čisté pryskyřice

V tab. 8 jsou uvedeny hodnoty drsností Ra , Rz , Rt , u čisté pryskyřice.

Drsnost Ra byla nejmenší u řezných podmínek ($n = 500$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $0,367 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

Drsnost Rz byla nejmenší u řezných podmínek ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $2,907 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

Drsnost Rt byla nejmenší u řezných podmínek ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $3,957 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny. Drsnosti povrchu u čisté pryskyřice mohli být nepříznivě ovlivněny malými bublinkami na povrchu materiálu viz obr. 37.



Obr. 37 Bublínky v čisté pryskyřici

4.3.2 Drsnost povrchu pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken

drsnost povrchu pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken [μm]						
řezné podmínky	Ra bez PK	Rz bez PK	Rt bez PK	Ra s PK	Rz s PK	Rt s PK
n250, a _p 1, v _f 25	0,908 ± 0,047	6,830 ± 0,340	9,812 ± 1,009	1,251 ± 0,178	8,513 ± 0,975	12,660 ± 3,377
n250, a _p 1, v _f 75	1,030 ± 0,053	7,637 ± 0,658	11,107 ± 2,348	1,145 ± 0,078	7,691 ± 0,568	10,801 ± 1,803
n250, a _p 2, v _f 25	1,054 ± 0,068	8,041 ± 0,554	12,097 ± 1,630	1,147 ± 0,056	8,072 ± 0,537	11,518 ± 1,735
n250, a _p 2, v _f 75	1,015 ± 0,056	7,175 ± 0,365	9,745 ± 0,798	1,084 ± 0,045	7,726 ± 0,587	10,931 ± 1,390
n250, a _p 3, v _f 25	0,989 ± 0,057	7,378 ± 0,559	10,126 ± 1,111	1,126 ± 0,063	8,460 ± 0,654	11,148 ± 1,827
n250, a _p 3, v _f 75	1,126 ± 0,090	7,890 ± 0,671	11,221 ± 1,599	1,156 ± 0,048	8,544 ± 0,514	12,466 ± 1,689
n500, a _p 1, v _f 25	0,703 ± 0,040	5,586 ± 0,356	7,895 ± 0,593	1,231 ± 0,101	8,811 ± 0,592	13,063 ± 1,905
n500, a _p 1, v _f 75	0,617 ± 0,041	5,101 ± 0,394	7,422 ± 0,688	1,195 ± 0,165	8,922 ± 1,207	14,512 ± 4,810
n500, a _p 2, v _f 25	0,770 ± 0,062	6,527 ± 0,548	9,981 ± 1,777	1,119 ± 0,068	8,268 ± 0,726	13,627 ± 2,420
n500, a _p 2, v _f 75	0,792 ± 0,029	5,888 ± 0,220	8,273 ± 0,552	1,304 ± 0,092	9,699 ± 0,750	13,850 ± 1,394
n500, a _p 3, v _f 25	0,884 ± 0,066	6,490 ± 0,439	8,845 ± 0,684	1,121 ± 0,131	8,604 ± 1,120	13,205 ± 4,515
n500, a _p 3, v _f 75	0,995 ± 0,152	7,385 ± 1,185	11,949 ± 3,663	1,168 ± 0,118	8,856 ± 1,370	13,862 ± 5,421
n1000, a _p 1, v _f 25	0,807 ± 0,075	6,804 ± 0,691	10,665 ± 0,958	1,806 ± 0,248	11,825 ± 1,839	17,537 ± 5,015
n1000, a _p 1, v _f 75	0,793 ± 0,132	6,669 ± 1,269	11,188 ± 4,258	1,385 ± 1,040	10,622 ± 0,959	15,565 ± 1,958
n1000, a _p 2, v _f 25	0,767 ± 0,094	6,371 ± 0,739	9,926 ± 1,319	1,594 ± 0,207	11,626 ± 1,107	19,867 ± 5,269
n1000, a _p 2, v _f 75	0,755 ± 0,044	5,821 ± 0,443	8,420 ± 0,850	1,221 ± 0,109	9,323 ± 1,244	14,633 ± 4,159
n1000, a _p 3, v _f 25	0,723 ± 0,062	5,415 ± 0,359	7,797 ± 0,752	1,257 ± 0,126	9,469 ± 1,143	14,673 ± 3,953
n1000, a _p 3, v _f 75	0,794 ± 0,130	6,501 ± 0,963	9,540 ± 2,013	0,842 ± 0,067	6,373 ± 0,751	11,099 ± 2,926

Tab.9 Drsnost povrchu pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken

V tab. 9 jsou uvedeny hodnoty drsností Ra , Rz , Rt , u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken.

Drsnost Ra byla nejmenší u řezných podmínek ($n = 500$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $0,617 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

Drsnost Rz byla nejmenší u řezných podmínek ($n = 500$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $5,101 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

Drsnost Rt byla nejmenší u řezných podmínek ($n = 500$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $7,422 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

4.3.3 Drsnost povrchu pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken

drsnost povrchu pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken [μm]						
řezné podmínky	Ra bez PK	Rz bez PK	Rt bez PK	Ra s PK	Rz s PK	Rt s PK
n250, a _{p1} , v _{f25}	0,906 ± 0,026	7,403 ± 0,378	9,588 ± 0,876	0,788 ± 0,062	5,868 ± 0,899	9,182 ± 2,191
n250, a _{p1} , v _{f75}	0,831 ± 0,031	6,210 ± 0,437	8,575 ± 0,888	0,790 ± 0,041	6,104 ± 0,601	7,889 ± 0,991
n250, a _{p2} , v _{f25}	0,931 ± 0,072	7,252 ± 0,552	10,101 ± 1,446	0,842 ± 0,033	6,839 ± 0,560	10,088 ± 2,048
n250, a _{p2} , v _{f75}	0,940 ± 0,038	7,183 ± 0,536	9,974 ± 1,037	1,374 ± 0,222	10,396 ± 1,519	15,576 ± 3,580
n250, a _{p3} , v _{f25}	1,032 ± 0,077	7,943 ± 0,649	11,428 ± 2,148	1,437 ± 0,134	9,931 ± 1,424	16,312 ± 5,228
n250, a _{p3} , v _{f75}	1,059 ± 0,094	7,704 ± 0,830	11,012 ± 2,223	1,411 ± 0,200	10,182 ± 1,360	15,073 ± 3,237
n500, a _{p1} , v _{f25}	0,824 ± 0,066	6,597 ± 0,507	8,825 ± 0,903	1,372 ± 0,072	10,275 ± 0,658	15,288 ± 1,349
n500, a _{p1} , v _{f75}	0,705 ± 0,060	5,534 ± 0,628	7,892 ± 1,076	0,944 ± 0,067	8,077 ± 1,247	14,174 ± 3,709
n500, a _{p2} , v _{f25}	0,687 ± 0,026	5,067 ± 0,516	8,062 ± 1,449	1,233 ± 0,068	8,971 ± 0,625	12,304 ± 1,615
n500, a _{p2} , v _{f75}	0,820 ± 0,053	6,348 ± 0,347	8,969 ± 0,725	0,852 ± 0,074	6,566 ± 0,654	9,530 ± 1,259
n500, a _{p3} , v _{f25}	0,736 ± 0,038	5,603 ± 0,443	8,003 ± 1,087	1,246 ± 0,081	10,151 ± 1,083	15,293 ± 2,633
n500, a _{p3} , v _{f75}	0,938 ± 0,058	6,756 ± 0,643	10,121 ± 1,494	1,140 ± 0,067	8,873 ± 0,797	12,474 ± 1,888
n1000, a _{p1} , v _{f25}	0,538 ± 0,026	5,224 ± 0,513	7,840 ± 1,008	1,246 ± 0,107	10,001 ± 0,993	13,764 ± 2,212
n1000, a _{p1} , v _{f75}	0,420 ± 0,035	4,159 ± 0,405	6,337 ± 0,789	1,544 ± 0,099	11,767 ± 0,864	16,307 ± 1,728
n1000, a _{p2} , v _{f25}	0,644 ± 0,080	6,239 ± 0,790	9,421 ± 1,587	1,635 ± 0,076	12,552 ± 1,077	16,908 ± 1,792
n1000, a _{p2} , v _{f75}	0,641 ± 0,071	5,553 ± 0,659	8,732 ± 1,719	0,975 ± 0,069	8,234 ± 1,089	12,805 ± 3,983
n1000, a _{p3} , v _{f25}	0,586 ± 0,048	5,524 ± 0,592	8,319 ± 2,152	1,213 ± 0,088	9,154 ± 0,962	14,000 ± 2,916
n1000, a _{p3} , v _{f75}	0,749 ± 0,048	6,706 ± 0,817	10,932 ± 2,218	0,905 ± 0,034	7,769 ± 0,471	10,736 ± 1,235

Tab.10 Drsnost povrchu pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken

V tab. 10 jsou uvedeny hodnoty drsností Ra , Rz , Rt , u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken.

Drsnost Ra byla nejmenší u řezných podmínek ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $0,420 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

Drsnost Rz byla nejmenší u řezných podmínek ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $4,159 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

Drsnost Rt byla nejmenší u řezných podmínek ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $6,337 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

4.3.4 Drsnost povrchu pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny

U tohoto materiálu nebylo provedeno kompletní měření, protože výsledky drsnosti byly významně ovlivněny bublinami na povrchu materiálu viz obr. 38. Proto nebylo měření provedeno, jelikož výsledky tohoto měření nebyly vypovídající a byly velice ovlivněny touto vadou materiálu.



Obr. 38 Bublínky na povrchu pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny

4.4 Rozměrová stabilita

Pro toto měření byly nastaveny konstantní řezné podmínky ($n = 500$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min). Postup měření je popsán v kapitole 3.3.4. Byla zkoumána rozměrová přesnost 4 zkoumaných materiálů při použití procesní kapaliny a bez ní. Z výsledků byla vytvořena tabulka a následně pro lepší přehled hodnot i graf. Tab. 11 obsahuje průměrné hodnoty výsledků se statistickým intervalem spolehlivosti.

Rozměrová stabilita [mm]		
Plnivo	bez PK	s PK
Žádné	$1,004 \pm 0,013$	$1,008 \pm 0,007$
Tkanina	$0,999 \pm 0,004$	$0,994 \pm 0,006$
Prameny	$0,997 \pm 0,006$	$1,006 \pm 0,009$
Recyklát	$1,002 \pm 0,005$	$1,000 \pm 0,006$

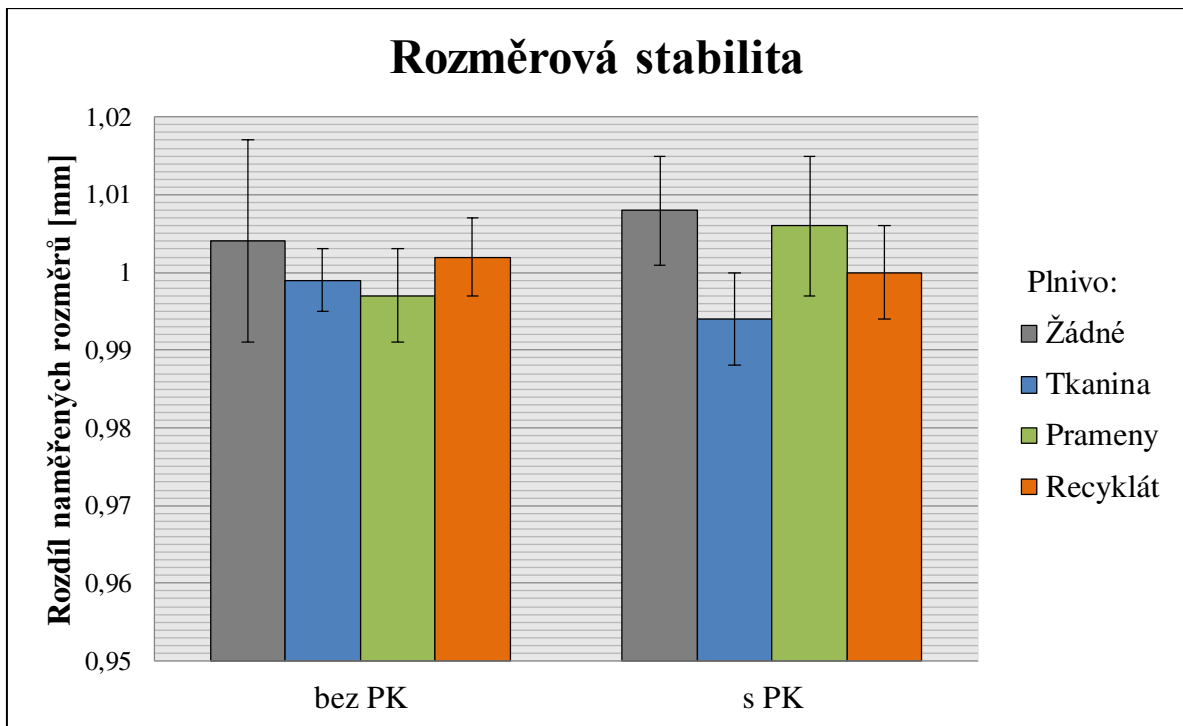
Tab.11 Rozměrová stabilita

Z tabulky a grafu je patrné, že nejlepší rozměrové stability při obrábění bez procesní kapaliny dosáhla pryskyřice plněná tkaninou z uhlíkových vláken - $0,999 \pm 0,004$.

Nejhorší rozměrové stability při obrábění bez procesní kapaliny dosáhla čistá pryskyřice - $1,004 \pm 0,013$.

Při obrábění s procesní kapalinou dosáhla nejlepší rozměrové stability pryskyřice plněná recyklovanými uhlíkovými vlákny - $1,000 \pm 0,006$.

Nejhorší rozměrové stability při obrábění s procesní kapalinou dosáhla pryskyřice plněná prameny z uhlíkových vláken - $1,006 \pm 0,009$.



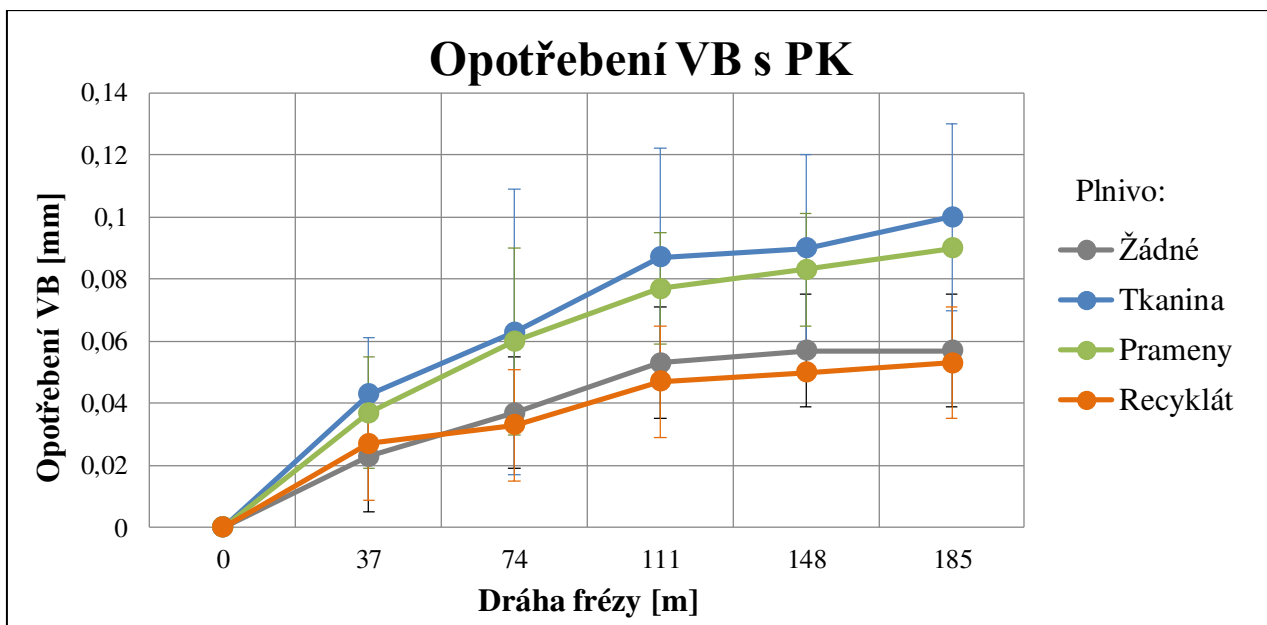
Graf 3 Rozměrová stabilita

4.5 Velikost opotřebení VB

Pro tento experiment byly zvoleny konstantní řezné podmínky ($n = 500$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min). Měření bylo provedeno za použití procesní kapaliny a bez ní. Zkoumalo se opotřebení řezného nástroje při obrábění 4 daných vzorků. Postup měření je popsán v kapitole 3.3.5. Pro změřené hodnoty byly vytvořeny tabulky obsahující průměr naměřených hodnot se statistickým intervalem spolehlivosti. Následné byly tabulky zpracovány do grafů pro lepší přehlednost.

Velikost opotřebení VB s PK				
Plnivo	Žádné	Tkanina	Prameny	Recyklát
Dráha frézy [m]	Opotřebení VB [mm]			
37	0,023 ± 0,018	0,043 ± 0,018	0,037 ± 0,018	0,027 ± 0,018
74	0,037 ± 0,018	0,063 ± 0,046	0,060 ± 0,030	0,033 ± 0,018
111	0,053 ± 0,018	0,087 ± 0,035	0,077 ± 0,018	0,047 ± 0,018
148	0,057 ± 0,018	0,090 ± 0,030	0,083 ± 0,018	0,050 ± 0,000
185	0,057 ± 0,018	0,100 ± 0,030	0,090 ± 0,000	0,053 ± 0,018

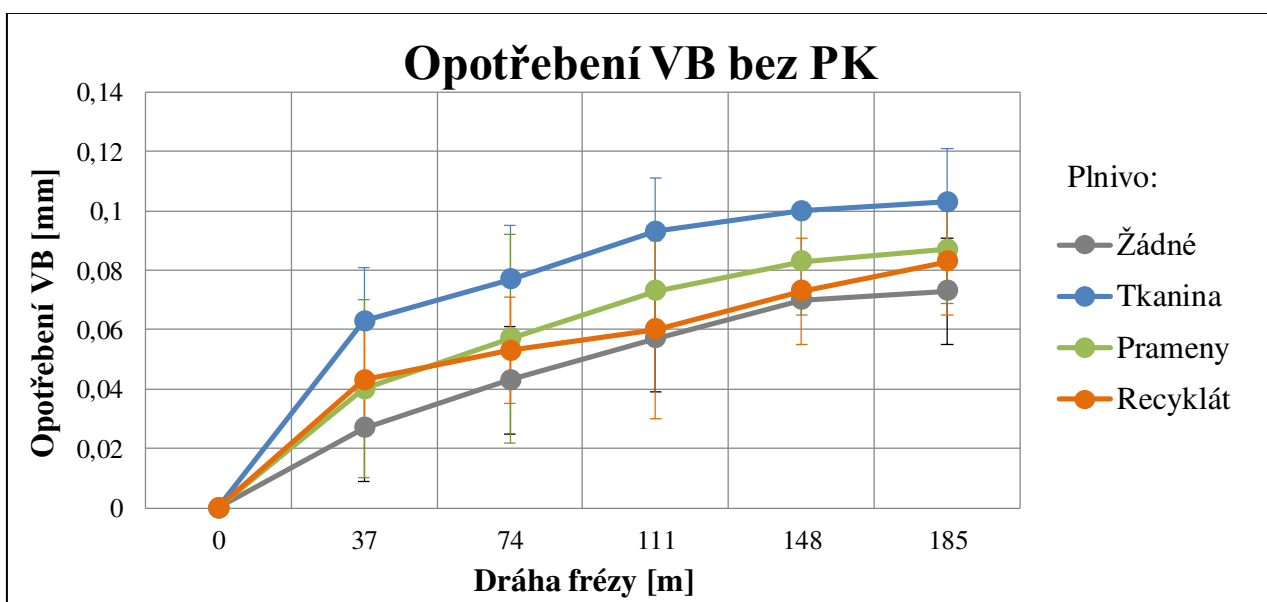
Tab.12 Velikost opotřebení VB s PK



Graf 4 Opotřebení VB s PK

Velikost opotřebení VB bez PK				
Plnivo	Žádné	Tkanina	Prameny	Recyklát
Dráha frézy [m]	Opotřebení VB [mm]			
37	0,027 ± 0,018	0,063 ± 0,018	0,040 ± 0,030	0,043 ± 0,018
74	0,043 ± 0,018	0,077 ± 0,018	0,057 ± 0,035	0,053 ± 0,018
111	0,057 ± 0,018	0,093 ± 0,018	0,073 ± 0,018	0,060 ± 0,030
148	0,070 ± 0,000	0,100 ± 0,000	0,083 ± 0,018	0,073 ± 0,018
185	0,073 ± 0,018	0,103 ± 0,018	0,087 ± 0,018	0,083 ± 0,018

Tab.13 Velikost opotřebení VB bez PK



Graf 5 Opotřebení VB bez PK

Z tabulek a grafů je patrné, že nejmenší opotřebení bylo dosaženo u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny s použitím procesní kapaliny. Největší opotřebení bylo naměřeno u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken bez použití procesní kapaliny.

5 Diskuze

Hlavním cílem předkládané práce bylo navrhnout a ověřit vhodné řezné podmínky pro frézování kompozitních materiálů na bázi reaktoplastu zpevněných uhlíkovými vlákny.

K dosažení vytyčeného cíle bylo nutné nejprve vytvořit kompletní metodiku pro stanovení řezných podmínek pro frézování kompozitních materiálů na bázi reaktoplastu s procesní kapalinou a bez ní, dále metodiku pro měření opotřebení řezného nástroje, teplot a sil při obrábění, drsnosti povrchu, rozměrové stability a celkové integrity obrobeneho povrchu včetně celkového vyhodnocení naměřených výsledků.

Informace ohledně problematiky obrábění kompozitních materiálů na bázi reaktoplastů zpevněných uhlíkovými vlákny jsou uvedeny v teoretické části v kapitole 2. Tato kapitola obsahuje shrnutí dosavadních znalostí o problematice obrábění těchto materiálů, volbě řezných podmínek a vhodných nástrojů pro obrábění těchto materiálů.

Přípravě vzorků a metodice prováděných experimentů se věnuje kapitola 3. Tato kapitola obsahuje výrobu a přípravu zkoumaných vzorků, metodiku a postupy vybraných experimentů, popisy strojů a nástrojů, které byly použity během provádění experimentů.

Jako zkoumané vzorky byly zvoleny následující materiály:

1. čistá epoxidová pryskyřice,
2. epoxidová pryskyřice plněná tkaninou z uhlíkových vláken,
3. epoxidová pryskyřice plněná prameny z uhlíkových vláken,
4. epoxidová pryskyřice plněná recyklovanými uhlíkovými vlákny.

Recyklovaná uhlíková vlákna byla v množství materiálové směsi 40 dsk. Frézování bylo prováděno bez procesní kapaliny a s procesní kapalinou. Jako procesní kapalina byla zvolena emulze složená z vody a mazací látky Blasocut BC 25 MD.

Měřené parametry byly:

1. řezná síla,
2. drsnost povrchu,
3. velikost opotřebení nástroje,
4. rozměrová stabilita vzorků,
5. teplota.

Řezná síla

Řezná síla byla měřena piezoelektrickým dynamometrem KISTLER (obr. 23). Postup měření a popis zařízení je v kapitole 3.3.1.

Nejnižší řezné síly v ose X u čisté pryskyřice byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - **18,608 N bez použití procesní kapaliny**.

Nejvyšší řezné síly v ose X u čisté pryskyřice byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 75$ mm/min) - **125,384 N s použitím procesní kapaliny**.

Nejnižší řezné síly v ose Z u čisté pryskyřice byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 250$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - **24,584 N bez použití procesní kapaliny**.

Nejvyšší řezné síly v ose Z u čisté pryskyřice byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 75$ mm/min) - **84,336 N s použitím procesní kapaliny**.

Nejnižší řezné síly v ose X u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - **65,280 N bez použití procesní kapaliny**.

Nejvyšší řezné síly v ose X u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 75$ mm/min) - **516,856 N s použitím procesní kapaliny**.

Nejnižší řezné síly v ose Z u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 250$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - **24,896 N bez použití procesní kapaliny**.

Nejvyšší řezné síly v ose Z u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 75$ mm/min) - **88,744 N s použitím procesní kapaliny**.

Nejnižší řezné síly v ose X u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 250$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - **46,952 N bez použití procesní kapaliny**.

Nejvyšší řezné síly v ose X u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 75$ mm/min) - **377,104 N s použitím procesní kapaliny**.

Nejnižší řezné síly v ose Z u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - **21,448 N bez použití procesní kapaliny.**

Nejvyšší řezné síly v ose Z u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 75$ mm/min) - **117,232 N s použitím procesní kapaliny.**

Nejnižší řezné síly v ose X u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - **24,616 N bez použití procesní kapaliny.**

Nejvyšší řezné síly v ose X u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - **150,728 N s použitím procesní kapaliny.**

Nejnižší řezné síly v ose Z u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - **26,648 N bez použití procesní kapaliny.**

Nejvyšší řezné síly v ose Z u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 75$ mm/min) - **77,576 N s použitím procesní kapaliny.**

Z výsledků je patrné, že **procesní kapalina výrazně navyšuje** u všech zkoumaných vzorků **řezné síly**. To je možné vysvětlit tak, že díky chladicímu účinku kapaliny se snižuje teplota obráběného materiálu a tím se zvyšuje řezný odpor a proto je potřeba vyvinout větší sílu při odebrání třísky.

Drsnost povrchu

Drsnost povrchu frézovaných vzorků byla zkoumána pomocí dotykového profilometru MITUTOYO SV-2000N2 (obr. 28). Pomocí tohoto zařízení byly měřeny 3 parametry drsnosti (R_a , R_z , R_t).

Drsnost R_a u čisté pryskyřice byla nejmenší při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - **0,367 μm bez použití procesní kapaliny.**

Drsnost R_z u čisté pryskyřice byla nejmenší při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - **2,907 μm bez použití procesní kapaliny.**

Drsnost R_t byla nejmenší u čisté pryskyřice při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - **3,957 μm bez použití procesní kapaliny.**

Drsnost povrchu u čisté pryskyřice nebyla procesní kapalinou zdatně ovlivněna. Nejmenší hodnoty drsnosti byly naměřeny při vyšších otáčkách. Hloubka řezu a rychlost posuvu hodnoty drsnosti prakticky neovlivňovali.

Drsnost R_a byla nejmenší u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $0,617 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

Drsnost R_z byla nejmenší u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $5,101 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

Drsnost R_t byla nejmenší u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $7,422 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

Drsnost povrchu u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken při obrábění s procesní kapalinou naměřena vždy vyšší než při obrábění bez procesní kapaliny. Procesní kapalina tedy nepříznivě ovlivňuje drsnost povrchu. Posuv a hloubka řezu neovlivňují kvalitu povrchu. Lepší povrch byl naměřen při vyšších otáčkách.

Drsnost R_a byla nejmenší u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $0,420 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

Drsnost R_z byla nejmenší u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $4,159 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

Drsnost R_t byla nejmenší u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min) - $6,337 \mu\text{m}$ bez použití procesní kapaliny.

Drsnost povrchu u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken byla naměřena většinou větší při použití procesní kapaliny než bez ní. Nejnížší hodnoty drsnosti byly naměřeny při vyšších otáčkách. Posuv a hloubka záběru neovlivňovali drsnost povrchu.

Při měření drsnosti povrchu u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny nebylo měření dokončeno, protože povrch tohoto materiálu obsahoval spoustu povrchových

vad (bublin) viz obr. 38. Provedlo se několik zkušebních měření drsnosti, ale výsledky byly zatíženy velkou chybou a proto nebyli nijak dál vyhodnocováni.

Rozměrová stabilita

Pro měření rozměrové stability byl použit digitální třmenový mikrometr Mitutoyo viz obr. 30. **Rozměrová stabilita u čisté pryskyřice bez procesní kapaliny byla $1,004 \pm 0,013$ mm a s procesní kapalinou byla $1,008 \pm 0,007$ mm.**

Rozměrová stabilita u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken bez procesní kapaliny byla $0,999 \pm 0,004$ mm a s procesní kapalinou byla $0,994 \pm 0,006$ mm.

Rozměrová stabilita u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken bez procesní kapaliny byla $0,997 \pm 0,006$ mm a s procesní kapalinou byla $1,006 \pm 0,009$ mm.

Rozměrová stabilita u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny bez procesní kapaliny byla $1,002 \pm 0,005$ mm a s procesní kapalinou byla $1,000 \pm 0,006$ mm.

V porovnání se všemi zkoumanými materiály dosáhla nejhorší rozměrové stability čistá pryskyřice jak s procesní kapalinou tak bez ní. Nejlepší rozměrové stability bez procesní kapaliny dosáhla pryskyřice plněná tkaninou z uhlíkových vláken a s procesní kapalinou pryskyřice plněná recyklovanými uhlíkovými vlákny.

Velikost opotřebení VB

Velikost opotřebení řezného nástroje bylo měřeno pomocí dílenského mikroskopu ZEISS. Měření bylo prováděno vždy, když nástroj ujel danou dráhu 37 m, 74 m, 111 m, 148 m, 185 m. Obrábění probíhalo za konstantních řezných podmínek.

Velikost opotřebení u čisté pryskyřice po ujetí dráhy 185 m bez použití procesní kapaliny bylo $0,073$ mm a s použitím procesní kapaliny $0,057$ mm.

Velikost opotřebení u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken po ujetí dráhy 185 m bez použití procesní kapaliny bylo $0,103$ mm a s použitím procesní kapaliny $0,100$ mm.

Velikost opotřebení u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken po ujetí dráhy 185 m bez použití procesní kapaliny bylo $0,087$ mm a s použitím procesní kapaliny $0,090$ mm.

Velikost opotřebení u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny po ujetí dráhy 185 m bez použití procesní kapaliny bylo $0,083$ mm a s použitím procesní kapaliny $0,053$ mm.

Procesní kapalina měla u všech zkoumaných vzorků kromě pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken pozitivní vliv na velikost opotřebení. Největší opotřebení nástroje vzniklo při obrábění pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken bez použití procesní kapaliny. Nejmenší opotřebení nástroje vzniklo při obrábění čisté pryskyřice s použitím procesní kapaliny.

Teplota

Pro měření teploty při frézování byly použity termočlánky typu K. Měření teploty probíhalo při různých otáčkách ($n = 250$ ot/min, $n = 500$ ot/min, $n = 1000$ ot/min), hloubka záběru a posuv byly konstantní ($a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min). Měření bylo prováděno bez procesní kapaliny a s procesní kapalinou.

Nárůst teploty u čisté pryskyřice byl při frézování **bez procesní kapaliny** při $n = 250$ ot/min - **2 °C**, při $n = 500$ ot/min - **3 °C** a při $n = 1000$ ot/min - **4,8 °C**.

Nárůst teploty u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken byl při frézování **bez procesní kapaliny** při $n = 250$ ot/min - **2,6 °C**, při $n = 500$ ot/min - **3,6 °C** a při $n = 1000$ ot/min - **5,4 °C**.

Nárůst teploty u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken byl při frézování **bez procesní kapaliny** při $n = 250$ ot/min - **2,8 °C**, při $n = 500$ ot/min - **3,8 °C** a při $n = 1000$ ot/min - **5 °C**.

Nárůst teploty u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny byl při frézování **bez procesní kapaliny** při $n = 250$ ot/min - **3,6 °C**, při $n = 500$ ot/min - **4,6 °C** a při $n = 1000$ ot/min - **5,8 °C**.

Nárůst teploty u čisté pryskyřice byl při frézování **s procesní kapalinou** při $n = 250$ ot/min - **0,6 °C**, při $n = 500$ ot/min - **1 °C** a při $n = 1000$ ot/min - **1 °C**.

Nárůst teploty u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken byl při frézování **s procesní kapalinou** při $n = 250$ ot/min - **0,8 °C**, při $n = 500$ ot/min - **1 °C** a při $n = 1000$ ot/min - **1,6 °C**.

Nárůst teploty u pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken byl při frézování **s procesní kapalinou** při $n = 250$ ot/min - **1 °C**, při $n = 500$ ot/min - **1 °C** a při $n = 1000$ ot/min - **1 °C**.

Nárůst teploty u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny byl při frézování **s procesní kapalinou** při $n = 250$ ot/min - **0,4 °C**, při $n = 500$ ot/min - **1 °C** a při $n = 1000$ ot/min - **1,6 °C**.

Procesní kapalina měla pozitivní účinek při měření teploty. Teplota s procesní kapalinou u všech zkoumaných materiálů vzrostla nepatrně. Nejvyšší teplota byla u všech vzorků naměřena nejvyšší při 1000 ot/min bez použití procesní kapaliny. Nejvyšší nárůst teploty byl naměřen u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny u všech řezných podmínek. Nejmenší nárůst teploty byl naměřen při frézování čisté pryskyřice.

Shrnutí

Procesní kapalina měla negativní účinek u všech zkoumaných materiálů při měření řezných sil.

Drsnost povrchu při frézování čisté pryskyřice procesní kapalina zřetelně neovlivnila, avšak u obrábění pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken drsnost povrchu ovlivnila negativně. U pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken měla procesní kapalina většinou negativní účinek.

Při měření teploty procesní kapalina minimalizovala nárůst teploty u měřených vzorků. U velikosti opotřebení řezného nástroje měla procesní kapalina kladný vliv a velikost opotřebení nástroje snižovala. Procesní kapalina by tedy byla vhodná pro použití ve variantě, kdy by byla žádoucí delší životnost nástroje. Z pohledu zvyšování řezných sil a tím způsobem zvyšování zatížení celé soustavy SNOP (stroj, nástroj, obrobek, přípravek) by nebylo vhodné použití procesní kapaliny. Také by nebylo vhodné použití procesní kapaliny z hlediska jakosti povrchu u vlákných plněných reaktoplastů.

Velikost otáček dle výsledků zřetelně neovlivňovala velikost naměřených sil, proto by byly voleny vyšší otáčky z důvodu větší efektivity výroby. Větší hloubka záběru měla za následek navýšení řezných sil, stejně tak větší posuv. Proto by byly jako řezné podmínky z pohledu řezných sil navrhnuti vyšší otáčky a nižší posuvy a hloubky záběru. Avšak z hlediska efektivity a rychlosti výroby budou i tyto dva negativní parametry navyšovány na hranici únosnosti a tuhosti soustavy SNOP. Efektivní a univerzální řezné podmínky pro plněné reaktoplasty uhlíkovými vlákny nelze jednoznačně stanovit, ale tato diplomová práce může potenciálnímu uživateli těchto materiálů pomoci k vhodné volbě řezných podmínek.

6 Závěr

Diplomová práce zpracovává téma "Stanovení vhodných řezných podmínek pro frézování kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny z hlediska řezného nástroje a obráběného materiálu".

Práce byla rozdělena do třech hlavních částí.

Teoretická část pojednává o problematice obrábění kompozitních materiálů na bázi reaktoplastů plněných uhlíkovými vlákny. Je zde seznámení s těmito materiály, vhodnými nástroji pro frézování těchto materiálů, volba řezných podmínek a popis obecného frézování.

Metodika experimentů, kterou obsahuje druhá část, nastiňuje postupy provedených experimentů, popis použitých strojů a nástrojů.

Třetí část je věnována samotným experimentům, výsledkům měření a grafickým zobrazením. Nedílnou součástí je diskuze a závěr, kde jsou prezentovány poznatky a výsledky práce.

Z rozsáhlého souboru naměřených hodnot a výsledků lze shrnout následující poznatky:

1. U experimentu měření řezných sil byla u všech měřených vzorků vyšší síla v ose X a Z při použití procesní kapaliny. Řezná síla v ose Z u všech zkoumaných vzorků nevykazovala vysoké změny při různých řezných podmínkách. Nejvíce u všech materiálů ovlivňovala velikost síly hloubka záběru a posuv. Čím vyšší hloubka záběru nebo posuv, tím vyšší hodnoty řezných sil v ose X.
2. Drsnost povrchu u čisté pryskyřice nebyla ovlivněna procesní kapalinou. Nejlepší hodnota drsnosti Ra vyšla při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 25$ mm/min) bez procesní kapaliny, Rz při ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 3$ mm, $v_f = 25$ mm/min) bez procesní kapaliny, Rt při stejných podmínkách jako Rz . Drsnost povrchu u pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken byla negativně ovlivněna procesní kapalinou. Nejlepší hodnoty drsnosti Ra , Rz a Rt byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 500$ ot/min, $a_p = 2$ mm, $v_f = 25$ mm/min). Drsnost povrchu pryskyřice plněné prameny z uhlíkových vláken byla ve většině případech negativně ovlivněna procesní kapalinou. Nejlepší hodnoty drsnosti Ra , Rz a Rt byly naměřeny při řezných podmínkách ($n = 1000$ ot/min, $a_p = 2$ mm,

$v_f = 25$ mm/min). Drsnost povrchu u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny nebyla naměřena z důvodu vad na povrchu vzorku v podobě bublin.

3. Nejlepší hodnoty rozměrové stability při obrábění bez procesní kapaliny dosáhla čistá pryskyřice. Nejlepší hodnoty při obrábění s procesní kapalinou dosáhla pryskyřice plněná recyklovanými uhlíkovými vlákny.
4. Velikost opotřebení VB bylo u všech zkoumaných vzorků menší při použití procesní kapaliny. K nejmenšímu opotřebení nástroje došlo při obrábění pryskyřice s recyklovanými uhlíkovými vlákny s použitím procesní kapaliny a k největšímu opotřebení nástroje došlo při obrábění pryskyřice plněné tkaninou z uhlíkových vláken bez použití procesní kapaliny.
5. U měření teplot při frézování měla procesní kapalina u všech vzorků pozitivní vliv. Teplota u frézování s procesní kapalinou vzrostla nejvíce u pryskyřice plněné recyklovanými uhlíkovými vlákny při $n = 1000$ ot/min. Nejvíce teplota vzrostla u stejného materiálu bez použití procesní kapaliny a při $n = 1000$ ot/min. Nárůst teplot tedy i bez použití procesní kapaliny nebyl velký.

Ze získaných výsledků lze vyvodit závěr takový, že procesní kapalina pozitivně působí pouze u nárůstu teploty při frézování a velikosti opotřebení nástroje, ale i nárůst teploty bez procesní kapaliny nebyl nijak výrazný, proto lze tvrdit, **že procesní kapalina je vhodná pouze při obrábění, u kterého se bude klást nárok na dlouhou životnost nástroje.**

Z pohledu řezných sil nejmenší zatížení při frézování vykazovala malá hloubka řezu a malé posuvy, velikost otáček velmi neovlivňovala velikost sil. Avšak z důvodu efektivní a rychlé výroby budou řezné podmínky voleny tak, aby zatížení nepřekonal tuhost soustavy SNOF.

Z výsledků obsáhlých v diplomové práci lze z hlediska řezných sil, drsnosti povrchu, nárůstu teploty, rozměrové stability a opotřebení nástroje **doporučit řezné podmínky pro frézování reaktoplastů plněných uhlíkovými vlákny: $n = 1000$ ot/min, $a_p = 1$ mm, $v_f = 25$ mm/min bez přítomnosti procesní kapaliny.**

Seznam použité literatury

- [1] SEDLÁČEK, Jan. *Efektivní obrábění vláknově vyztužených kompozitních materiálů*. Brno, 2010. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [2] JUNEK, Adam. *Chování kompozitních materiálů různého materiálového složení na bázi reaktoplastů při vybraných technologiích obrábění*. Liberec. 2017. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní.
- [3] *Obrábění kompozitních materiálů*. [online]. [cit. 4. 4. 2021]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/47029>
- [4] *Frézování a vrtání houževnatých materiálů - Technika a trh*. Časopis T+T Technika a trh .[online]. [cit. 6. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/obrabeni/frezovani-a-vrtani-houzevnaty-ch-materialu>
- [5] *Obrábění kompozitních materiálů*. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 5. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-kompozitnich-materialu>
- [6] *Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů*. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 8. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu>
- [7] ŠILAR, Miroslav. *Obrábění dílů z uhlíkových kompozitů*. Ostrava 2013. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní.
- [8] NEJMAN, Dominik. *Studie vhodných řezných nástrojů pro vrtání do kompozitních materiálů zpevněných uhlíkovými vlákny*. Liberec 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci
- [9] *Cesty ke zvýšení efektivity obráběcích strojů*. Technický týdeník [online]. [cit. 2. 4. 2021]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumneho-centra/cesty-ke-zvyseni-efektivnosti-obrabecich-stroju_36427.html
- [10] JAMAL Y. Sheikh-Ahmad. *Machining of polymer composites*. 1. vyd. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2009 ISBN 978-0-387-35539-9
- [11] KROUPA, Tomáš. *Obrábění kompozitních materiálů*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní.
- [12] *Kompozity*. [online]. Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc. [cit. 7. 4. 2021]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz>

- [13] MAŠEK, Petr. *Frézování kompozitních materiálů s termoplastickou maticí*. Disertační práce. Praha, 2019. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní.
- [14] MACHALOVÁ, Veronika. *Řezné síly při frézování vláknové vyztužených kompozitů*. Diplomová práce. Brno, 2008. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [15] *Efektivní frézování kompozitů s termoplastickou maticí*. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 11. 4. 2021].
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/efektivni-frezovani-kompozitu-s-termoplastickou-matici>
- [16] MARTÉNEK, Libor. *Řezné síly při frézování vláknové vyztužených kompozitů*. Diplomová práce. Brno, 2009. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [17] *Matrice*. [online]. Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc. [cit. 7. 4. 2021].
Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz>
- [18] *Vlákná*. [online]. Doc. Ing. Zdeněk Kořínek, CSc. [cit. 7. 4. 2021].
Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz>
- [19] NOVOTNÝ, Vojtěch. *Vliv technologických parametrů na jakost obrobené plochy při CNC frézování kompozitů*. Diplomová práce. Zlín, 2016. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta strojní.
- [20] *Kompozitní materiály*. [online]. [cit. 15. 4. 2021]. Dostupné z:
https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
- [21] TRČKA, Tomáš. *Analýza silového zatížení stopkových fréz s PCD s ohledem na jejich ostření*. Diplomová práce. Brno, 2017. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [22] *Sandvik Coromant*. [online]. [cit. 9. 4. 2021].
Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/composite-solutions/pages/edge-milling.aspx>
- [23] *Frézování čelem a obvodem frézy*. ELUC [online]. [cit. 7. 4. 2021].
Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1226>

Seznam příloh

Příloha č.1

- 1CD: tabulky a grafy všech naměřených hodnot