

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Frézování FRTC materiálů – vliv řezných podmínek na teplotu v řezu

Milling of FRTC materials – Influence of Cutting Conditions on
Temperature in the Cutting Zone

Adam Třešňák

2017

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Mašek

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Maškovi, za jeho trpělivost, ochotu a cenné rady, které mi věnoval při zpracování této práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v příloze této práce.

V Praze dne

Podpis.....

Abstrakt

Tématem této práce je vliv řezných podmínek na teplotu v řezu při frézování FRTC materiálů. Práce je rozdělena na dvě části. Teoretická část je věnována úvodu do kompozitních materiálů, kde jsou pak více popsány materiály použité v experimentální části. Dále jsou popsány poznatky ohledně frézování vlákniny vyztužených materiálů a možnosti měření teploty v místě řezu. V experimentální části jsou provedeny tři experimenty. První experiment se zabývá statistickou významností řezných podmínek, druhý závislostí řezné rychlosti na teplotě a poslední vlivem řezných úhlů speciálních nástrojů na teplotu v místě řezu.

Abstract

The subject of this work is influence of cutting conditions on temperature in the cutting zone during milling of FRTC materials. The work is divided into two parts. The introductory theoretical part describe the composite materials, milling fiber reinforced materials and measuring temperature in the cutting zone. The experimental part is divided into three parts. The first experimental is about statistical significance of cutting conditions, the second is about cutting speed dependence and the last on is about influence cutting tool geometry on temperature in the cutting zone.

Použité zkratky a symboly:

Označení	Legenda	Jednotka
FRTC	Vlákny vyztužený termoplastický kompozit	-
C/PPS	Polypropylensulfid vyztužený uhlíkovými vlákny	-
G/PA12	Polyamid vyztužený skleněnými vlákny	-
RTC	Teplota odražené záření	°C
F_c	Tangenciální složka řezné síly	N
Q	Celkové množství tepla	J.min ⁻¹
Q_d	Teplo vzniklé deformací materiálu	J.min ⁻¹
Q_t	Teplo vzniklé z odvodu třísky	J.min ⁻¹
Q_p	Teplo vzniklé v důsledku tření hřbetu a plochy řezu	J.min ⁻¹
Q_e	Teplo vzniklé elastickou deformací	J.min ⁻¹
Q_{disp}	Teplo potřebné na rozdělení materiálu	J.min ⁻¹
T_g	Teplota skelného přechodu	°C
I	Intenzita záření	W·m ⁻²
T	Termodynamická teplota	K
σ	Stefan-Boltzmanova konstanta	-
ε	Emisivita	-
ρ	Reflexe	-
τ	Stupeň přenosu	-
E	Youngův modul pružnosti	Mpa
v_c	Řezná rychlost	m/min
f_z	Posuv na zub	mm
a_e	Pracovní záběr	mm
a_p	Hloubka řezu	mm
ω	Úhel šroubovice	°
γ	Úhel čela	°
R^2	Koeficient determinace	-
CVD	Nízkotlaká diamantová syntéza	-
PCD	Polykrystalický diamant	-
DF	Počet stupňů volnosti	-
Seq SS	Součet čtverců	-
Adj SS	Průměrná suma čtverce	-
Adj MS	Průměrný čtverec	-
F	Hodnota testovaného kritéria	-
P	Hladina významnosti	-

Θ_s	Teplota řezání	°C
C_{Θ}	Empirická konstanta	-
z_{Θ}	Empirický koeficient	-

Obsah

1. Úvod	9
2. Cíl práce.....	9
3. Obráběný materiál	10
3.1. Definice kompozitu.....	10
3.2. Rozdělení kompozitních materiálů podle materiálu matrice	11
3.3. Rozdělení kompozitních materiálů podle tvaru výztuže:.....	11
3.4. Kompozity s termoplastovou maticí	12
3.4.1. C/PPS.....	14
3.4.2. G/PA12.....	15
4. Frézování kompozitních materiálů	16
4.1. Volba nástrojů	18
4.1.1. Materiály nástroje	18
4.1.2. Opotřebení nástroje	18
4.1.3. Kompresní frézy	19
5. Tepelné jevy při obrábění	20
5.1. Tepelná bilance	20
5.2. Teplota skelného přechodu – mezní teplota.....	21
6. Měření teplot při frézování	21
6.1. Měření termoelektrickými články	22
6.2. Termistory	24
6.3. Tepelné záření	24
6.4. Teplotní indikátory.....	28
7. Návrh přípravku pro upnutí obráběného materiálu	29
7.1. Návrh konstrukčních řešení přípravku	29
7.1.1. Upínání pomocí upínek	29
7.1.2. Upínání pomocí desky.....	30

7.1.3.	Upínání pomocí mostu	31
7.1.4.	Volba vhodného upnutí	31
7.2.	Výroba přípravku	31
8.	Experimentální část	36
8.1.	Uspořádání experimentu	36
8.2.	Měřicí technika.....	37
8.3.	Návrh experimentu.....	38
8.4.	Popis experimentu.....	40
8.5.	Vyhodnocení měření	41
8.6.	Výsledky měření	44
8.7.	Vliv opotřebení nástroje na zvýšení teploty během experimentu	54
9.	Závěr.....	56
10.	Citovaná literatura	57
11.	Přílohy	60

1. Úvod

Kompozitní materiály a technologie jejich zpracování posunují hranice, na které jsme byli zvyklí při používání klasických konstrukčních materiálů. V některých oblastech jsou svými ojedinělými vlastnostmi nepřekonatelné. Využití naleznou tam, kde jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti překonávají poměrně vysoké náklady na pořízení. Dnes se kompozitní materiály běžně používají nejen ve strategických odvětvích jako je kosmonautika a vojenský průmysl, ale také v ostatních oblastech jako je automobilový a letecký průmysl. [1]

V porovnání s ostatními běžnými materiály, které jsou dnes používány, jako jsou kovy, plasty a dřevo, kompozity poskytují výraznou výhodu. Primární výhodou je jejich poměr hmotnosti a pevnosti. V dopravě, nižší hmotnost znamená vyšší úsporu paliva a lepší zrychlení. Ve sportu, lehké kompozitní materiály umožňují delší odpaly v golfu, rychlejší podání v tenisu a přesnější výstřely v lukostřelbě. V energetickém průmyslu, čím méně lopatka větrné elektrárny váží, tím více energie může turbína produkovat. [2]

Kromě nižší hmotnosti oproti ostatním konstrukčním materiálům, mezi další výhody kompozitních materiálů patří především: poměr tuhosti a hmotnosti v mnoha případech lepší odolnost proti korozi, odolnost proti únavě, tepelná a akustická izolace. Mezi jejich nevýhody patří malá produktivita výrobních metod, složitost jejich výrobních procesů, vysoké pořizovací náklady. Z důvodu vystavení se možné zvýšené koncentrace prachu při jejich opracování, je nutné dbát zvýšené pozornosti na bezpečnost práce a ochranu zdraví. [3]

2. Cíl práce

Hlavní úkoly a cíle bakalářské práce lze shrnout do následujících bodů:

- shrnutí současného stavu poznání FRTC materiálů z dostupné odborné literatury a vědeckých článků
- návrh, konstrukce a výroba univerzálního přípravku pro frézování tenkých desek kompozitních materiálů
- posouzení vlivu řezných podmínek na teplotu při frézování FRTC v místě řezu – volba metodiky měření, měření a vyhodnocení experimentu

Praktická část této práce je věnována výrobě univerzálního přípravku a dále je rozdělena do tří experimentů, kde se zabývám:

- statistickou významností řezných podmínek na teplotu v místě řezu
- určením závislosti řezné rychlosti na teplotu v místě řezu
- vlivem řezných úhlů speciálních nástrojů na teplotu v místě řezu.

Motivací k provedení této bakalářské práce je vyrobení přípravku pro frézování tenkých desek kompozitních materiálů, který bude sloužit i na další experimenty nad rámec této bakalářské práce. Prohloubení dosavadních poznání FRTC materiálů při frézování z hlediska teploty v místě řezu.

3. Obráběný materiál

Historie kompozitních materiálů sahá až do starověku. V minulosti se jako stavební materiál používala směs slámy a bahna. Sláma tvořila strukturu a přenášela sílu, zatímco bahno působilo jako pojivo, držící celek pohromadě. Od té doby, se použití kompozitních materiálu velmi vyvinulo a posunulo. V posledních desetiletích jsou velmi používané vlákna vyztužené kompozity [2].

3.1. Definice kompozitu

Kompozitní materiály se skládají ze směsí dvou nebo více nebo více odlišných složek, nebo fází odděleným odlišným rozhraním. Tvrdší, tužší a pevnější nespojitá složka, dodávající pevnost a tuhost, blokující vznik a růst trhlin ve struktuře se nazývá výztuž, spojitá a obvykle poddajnější složka, která zastává funkci pojiva výztuže, zajišťuje přenos sil mezi všemi výztužnými vlákny a dává materiálu potřebné fyzikální a chemické vlastnosti se nazývá matrice. Spojením dochází k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností, kterých nedosahují jednotlivé složky [3], [4].

3.2. Rozdělení kompozitních materiálů podle materiálu matrice

Matrice u kompozitů může být [4]:

- polymerní
- kovová
- uhlíková
- skleněná
- sklokeramická
- keramická

Matrice má za úkol spojovat vyztužující fázi a chránit ji před okolními vlivy. I pro prvních poruchách výtzuže, by si měla matrice udržet funkci pojiva. Při tahovém namáhání by mezní poměrné prodloužení matrice mělo být větší než mezní prodloužení vláken. To splňují pouze polymerní a kovové matrice.

Polymerní matrice se dále dělí na [4]:

- termoplasty-polypropylen (PP), polyamid (PA), polypropylensulfid (PPS) nebo polyetereterketon (PEEK)
- termosety-epoxidová pryskyřice, polyesterová pryskyřice, fenolformaldehydová pryskyřice a vinylesterová pryskyřice

3.3. Rozdělení kompozitních materiálů podle tvaru výtzuže:

1. vláknové kompozity

- s kontinuálními vlákny
- s krátkými vlákny

2. částicové kompozity

- sférické částice (izometrické)
- destičkovité částice (anizometrické)

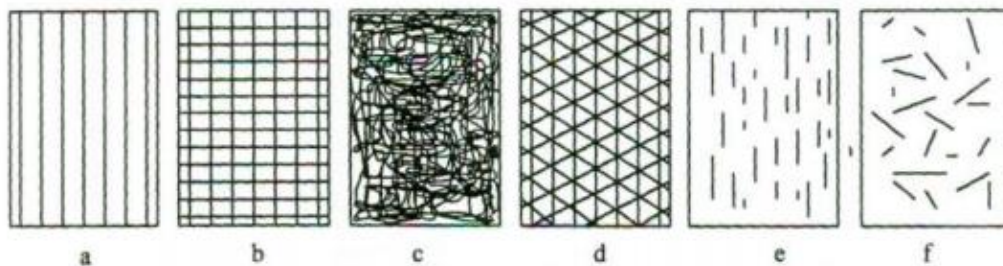
Pro vláknové kompozity se používají vlákna [4]:

- skleněná
- uhlíková
- aramidová (kevlar)
- přírodní vlákna
- čedičové

Kompozity s kontinuálními vlákny mohou mít různě orientovanou výztuž [4]:

- jednosměrně
- dvouosé
- víceosé
- nahodilě uspořádání

Příklady uspořádání vláknové výztuže mohou být jako na obrázku 1:



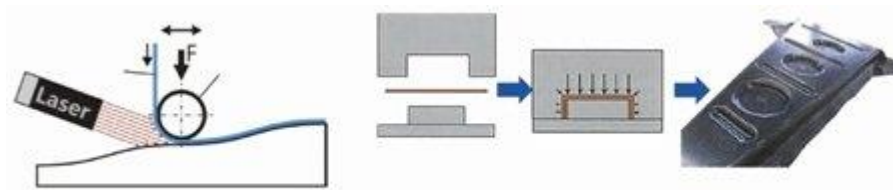
Obrázek 1 Uspořádání vláknové výztuže [4]

a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací [4].

3.4. Kompozity s termoplastovou maticí

Kompozity s termoplastovou maticí (Fibre Reinforced Thermoplastics – FRTC) a vláknovou výztuží jsou materiály, jejich uplatnění v konstrukci lehkých dílců bude stále větší. Nejčastěji používanou maticí jsou PEEK, PEKK, PPS a PA12. Matrice může být vyztužená jednosměrnými vlákny nebo tkaninou nejčastěji z uhlíkových nebo skelných vláken [5].

Tyto kompozity jsou nejčastěji zpracovávány jako tenké pásy s jednosměrnými vlákny nebo jako desky o různých tloušťkách vyztužených tkaninami. Počátek technologie výroby dílců z FRTC materiálů spočívá v zahřátí polotvaru nad teplotu tavení matrice, aby změkla a stala se lepivou. Toho lze využít pro spojení matrice s dalším materiálem nebo přetváření polotvaru do požadovaného tvaru. Výrobní proces je tak závislý na rychlosti ohřevu a chladnutí matrice, kde záleží na jejím materiálu. Obrázek 2 znázorňuje technologie zpracování FRTC materiálů [5].



Obrázek 2 Technologie zpracování FRTC materiálů, vpravo zpracování pomocí laseru, vlevo za pomoci lisování [5]

FRTC kompozity lze po ohřátí na pracovní teplotu (vyšší než teplota tavení matrice) tvářet pomocí forem, při lokálním ohřátí, je možné do nich vsadit různé kovové a nekovové vložky. Technologií laserového svařování materiály lze spojovat lokálním natavením matrice.

Dají se třískově obrábět, lze provádět ořezy materiálu frézováním, řezáním laserem, vodním paprskem nebo vibračním nožem [5].

Pro praktickou část této práce jsem zvolil FRTC materiály s polyfenylsulfidovou maticí a uhlíkovými vlákny – C/PPS a polyamidovou maticí se skleněnými vlákny G/PA12, které zde budou popsány více.

3.4.1. C/PPS

PPS je semikrystalický termoplastický polyfenylensulfid. Nabízející vynikající houževnatost, chemickou odolnost proti rozpouštědlům, chemikáliím, olejům. Hodí se pro použití u dílů, které mají vysoké mechanické a teplotní požadavky [6].

Chemickou odolnost si udržuje i při zvýšených teplotách, odolává [6]:

- kyselinám/zásadám ve stupnici pH od 2 do 12
- silným bělidlům
- provozním kapalinám u automobilů – chladicí kapalinám, převodovým olejům a brzdové kapalině
- plynu a alternativním palivům (methanol, ethanol).

Mezi jeho hlavní výhody patří [6]:

- odolnost proti hoření
- extrémně nízká absorpce vlhkosti – 0,02%
- vysoká tvrdost a tuhost
- odolnost vůči tečení
- je vhodný pro obrábění
- nízká hmotnost v kombinaci s vysokou rozměrovou stálostí

Tabulka 1 Fyzikální a mechanické vlastnosti C/PPS [7]

Typ vlákna	T300B
Typ tkaniny	4H satin
Pevnost v tahu [MPa]	3530
Prodloužení do přetržení [%]	1,5
Modul pružnosti v tahu [Gpa]	230
Hustota [g/cm ³]	1,76
Typ matrice	Krystalická
Teplota skelného přechodu	90 °C
Teplota tavení	258 °C
Chemická odolnost	výborná
Absorbce vlhkosti (23 °C, 50 % RH)	0,03 %
Aplikace	aero

Použití [6]:

- Primární a sekundární letecké konstrukce
- Motorové gondoly
- Automobilový průmysl– díly vodní pumpy, tělesa škrťící klapky
- Zásobníky plynových pecí, díly dávkovacích čerpadel

3.4.2. G/PA12

PA12 někdy nazývaný také jako nylon 12 je lineární, polokrystalický-krystalický termoplast odvozený od butadienu. Polyamidy jsou polymery s dlouhým řetězcem obsahující amidové jednotky (N-H-C=O). Získávají se polymerizací kyseliny s amidem. Má vlastnosti podobné PA11, ale jeho krystalová struktura je odlišná. PA12 je dobrý elektrický izolátor a jeho vlastnosti nejsou tak citlivé na vlhkost jako jiné polyamidy. Má dobrou odolnost proti nárazu a odolává mnoha chemikáliím Vyniká dlouhodobým konstantním chováním. Je výjimečně silný i když teploty klesají pod bod mrazu. Vskutku vynikající mechanické vlastnosti, které materiál nabízí, se často používají k nahrazení typických vstřikovacích plastů. Vysoká odolnost proti oděru umožňuje realizaci pohyblivých dílů, jako jsou ozubená kola nebo závěsy [8], [9].

Mezi jeho hlavní výhody patří [9]:

- chemická, tepelná odolnost
- tlumí hluk a vibrace
- vysoký stupeň zpracovatelnosti
- vysoká rozměrová stabilita
- nízká hustota
- odolnost proti stárnutí při vysokých teplotách a dlouhé době expozice
- vysoká tuhost a pevnost i při nízkých teplotách
- odolnost vůči chemikáliím včetně hydraulických kapalin, oleje, pohonných hmot, mastnoty, slané vody a rozpouštědel

Tabulka 2 Fyzikální a mechanické vlastnosti G/PA12 [7]

Typ vlákna	EC11
Typ tkaniny	4H satin
Pevnost v tahu [MPa]	1900
Prodloužení do přetržení [%]	3,7
Modul pružnosti v tahu [Gpa]	73
Hustota [g/cm ³]	2,65
Typ matrice	Krystalická
Teplota skelného přechodu	50 °C
Teplota tavení	170 °C
Chemická odolnost	dobrá
Absorbce vlhkosti (23 °C, 50 % RH)	1,50 %
Aplikace	automotive

Použití [9]:

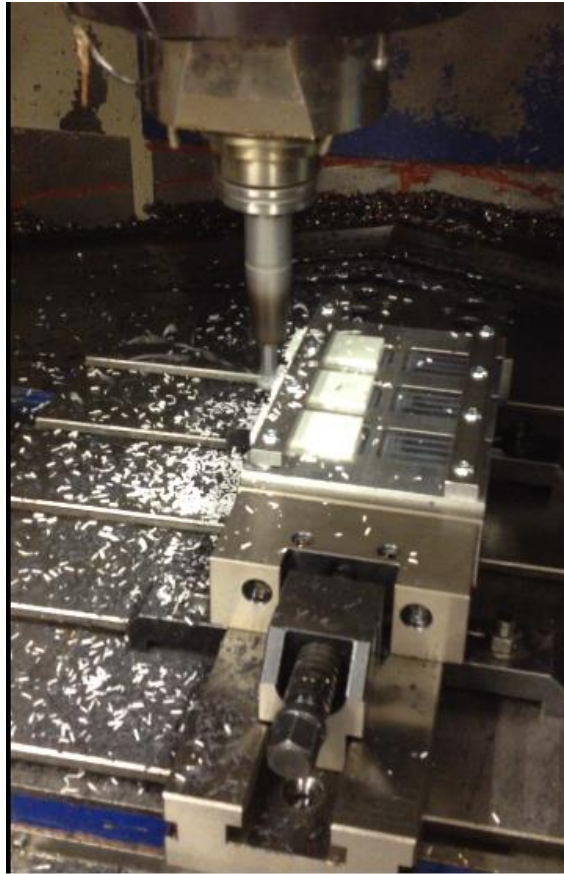
- Automobilový průmysl – vzduchové potrubí, kryty kol
- Elektrotechnika – vypínače, spínací zařízení nízkého napětí, kryty a vnitřní díly el. zařízení
- Průmyslová potrubí
- Lékařské aplikace – protézy
- Sportovní průmysl – lyžařské vázání

4. Frézování kompozitních materiálů

Frézování je jedna z nejpoužívanějších technologií při odstraňování materiálu u součástek vláknou vyztužených kompozitních materiálů. Frézování kovů se vyznačuje velkými úběry materiálu, u frézování vláknou vyztužených materiálů dochází k malým úběrům. Důvodem je to, že polotvar pro výrobu bývá podobný konečné součástce. Nejčastěji se frézování využívá k dokončení přesného tvaru obrysu, výroby drážek, zaoblení hran a k odstraňování otřepů. Použití řezných kapalin závisí na druhu kompozitu. Kompozity se řadí k obtížně obrobitelným materiálům [3].

Je nutné dbát důraz na zdravotní a hygienické limity pracovního prostředí při frézování vláknou vyztužených kompozitů s polymerní maticí na bázi pryskyřic. Tříská ve formě drobných částí se v podobě prachu šíří z místa obrábění do okolí. Proto je nutné aplikovat výkonné odsávací zařízení [10].

V našem případě nebyla polymerní matrice na bázi pryskyřice ale termoplastu. Tříška nebyla ve formě prachu, ale utvářela se plynulá krátká tříška jako je znázorněno na obrázku 3.



Obrázek 3 Pracovní prostor stroje pokrytý třískami při obrábění G/PA12

Problematika technologie obrábění, dokončovacích operací a dokončování funkčních ploch je stále předmětem výzkumu. Od běžně užívaných obráběných materiálů je obrábění vláknou vyztužených kompozitů odlišné. Jedná se o poměrně složitou operaci, vzhledem k rozmanitosti a počtu problémů, které mohou nastat. Různá směrová orientace vyztužujících vláken vykazuje rozdílné mechanické vlastnosti ve směru podél vláken a napříč vláken. U kompozitů se během obrábění často vyskytuje delaminace, praskání, vytrhávání vláken a překročení mezní teploty, kdy může dojít ke spálení kompozitu. Problémy, které při obrábění nastávají souvisí s vlastnostmi materiálu, nastavenými reznými parametry a volbou vhodného nástroje [11], [12].

4.1. Volba nástrojů

Při frézování vlákný vyztužených kompozitů jsou kladeny velké nároky na materiál nástroje a geometrii řezné části. Nástroj musí odolávat intenzivnímu opotřebení. [3]

4.1.1. Materiály nástroje

Při frézování vlákný vyztužených kompozitů se velmi málo používají materiály z rychlořezné oceli. Kvůli své dlouhodobější trvanlivosti a lepší tepelné vodivosti, která je pro obrábění vlákný vyztužených kompozitních materiálu velmi důležitá, je vhodnější použití nástrojů ze slinutého karbidu opatřených otěruvzdornými tenkými vrstvami. Nástroje tak mají vyšší tepelnou vodivost oproti nástrojům z rychlořezné oceli. Nízká tepelná vodivost obráběného materiálu má za následek, že vzniklé teplo přechází v malém množství do třísky a obráběného materiálu, ale většina tepla z místa řezu se odvádí především nástrojem [3], [12].

Polykrystalický diamant (PCD) pro svoji dobrou tepelnou vodivost a nízký koeficient tření zajišťuje delší životnost a větší produktivitu při obrábění vlákný vyztužených kompozitů. Vysoká tvrdost těchto materiálů zajišťuje dobrou odolnost proti otěru. Jejich nevýhodou je vysoká pořizovací cena [3].

Nízkotlaková diamantová syntéza (CVD) umožňuje zpracování diamantu pro povlakování nástroje. Nanesená tloušťka několika μm je složená z čistého diamantu a v zásadě poskytuje lepší tvrdost a houževnatost než slinutý diamant. Používá se na nástroje složitějšího tvaru jako jsou vrtáky a dokončovací frézy. Problémem je špatná přilnavost diamantového povlaku k podkladu. Provádějí se předúpravy povrchu nástroje. Mechanické zdrsnění povrchu nebo chemická úprava, kde dochází k naleptání kobaltového pojiva slinutého karbidu [3].

4.1.2. Opotřebení nástroje

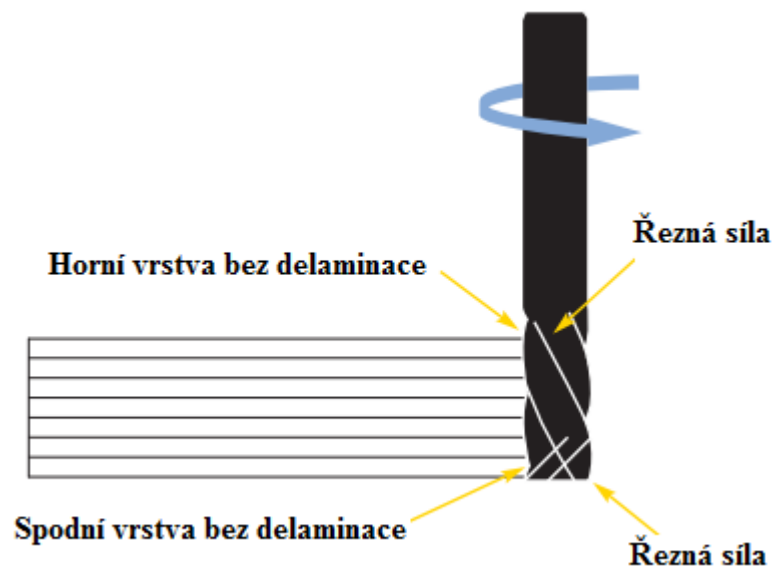
U řezných nástrojů je při frézování vlákný vyztužených kompozitů vyžadována vysoká lomová houževnatost a odolnost proti otěru. Kromě adhezivního účinku zde nastává ještě abraze vzniklá díky přítomnosti tvrdých částic u vláken [3].

Abraze má za následek postupné obrušování břitu, kdy může dojít až k vydrolování břitu. To má za následek intenzivní namáhání břitu. Schopnost břitu odolávat abrazivnímu otěru souvisí s jeho tvrdostí [12].

U měkkých materiálů se vyskytuje adheze, která souvisí s nalepováním materiálu na břit. Adhezní otěr se vyskytuje při nízkých teplotách obrábění na čele břitu nástroje, kde vzniká při nižší řezné rychlosti bodový styk mezi třískou a nástrojem [12].

4.1.3. Kompresní frézy

Při frézování obvodem jsou problémem axiální síly, které podporují separaci povrchových vrstev. Řešením je použití kompresních fréz. Kompresní frézy mají zuby uspořádané ve šroubovicích opačného směru. Oba vnější povrchy jsou axiální složkou řezné síly stlačovány k sobě a tím lze zamezit separaci vrstev jako je vyobrazeno na obrázku 4 [13].



Obrázek 4 Frézování za pomoci kompresní frézy zamezující separaci vrstev [14]

5. Tepelné jevy při obrábění

Teplota v řezu je ovlivňována hloubkou řezu, rychlostí posuvu, nástrojem, materiálem obrobku a řeznou rychlostí. Při obrábění kompozitů se nesmí překročit mezní teplota, aby nedošlo k tavení nebo rozkladu polymerní matrice. Na povrchu obrobku se začnou objevovat spálené oblasti, to by mělo za následek změnu vlastností kompozitu [3].

5.1. Tepelná bilance

Odřezáváním vrstvy materiálu břitem nástroje se tvoří tříska. Při obrábění v místě řezu, kde dochází k tvorbě třísky vzniká teplo. Celkové množství tepla se vypočítá stejně jako výkon obrábění. Prakticky veškerý výkon obrábění se mění v teplo. Navíc teplo má přímý vliv na rychlost opotřebení nástrojů. Proto je velmi důležité je sledovat. U kompozitů ještě navíc mezní teplotu [15], [16].

Výpočet celkového množství tepla vzniklého při obrábění určuje následující vztah [15]:

$$Q = F_c \cdot v_c \quad (5.1.1)$$

Kde: Q je celkové množství tepla vzniklého při obrábění v $J \cdot \text{min}^{-1}$,

F_c je tangenciální složka řezné síly v N ,

v_c řezná rychlost $m \cdot \text{min}^{-1}$

Celkové množství tepla vzniklého při obrábění lze rozdělit na následující složky [15]:

$$Q = Q_d + Q_t + Q_p + Q_e + Q_{\text{disp}} \quad (5.1.2)$$

Kde: Q_d je množství tepla vzniklého deformací materiálu v oblasti primární plastické deformace v $J \cdot \text{min}^{-1}$

Q_t – množství tepla vzniklé v důsledku odvodu třísky z místa řezu v $J \cdot \text{min}^{-1}$

Q_p – množství tepla vzniklé v důsledku tření hřbetu a plochy řezu, resp. plastické deformace povrchové vrstvy plochy řezu v $J \cdot \text{min}^{-1}$

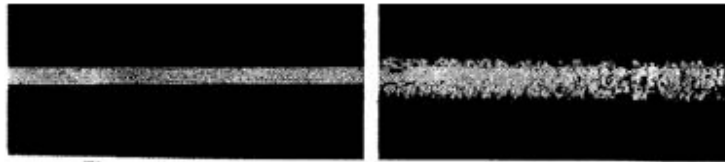
Q_e – množství tepla vzniklé elastickou deformací v oblasti tvoření třísky v $J \cdot \text{min}^{-1}$

Q_{disp} – množství tepla potřebné na rozdělení materiálu/ porušení meziatomárních sil/ v $J \cdot \text{min}^{-1}$

5.2. Teplota skelného přechodu – mezní teplota

U polymerů se v určité charakteristické oblasti teplot mění fyzikální vlastnosti. Tato charakteristická oblast se nazývá teplotou skelného přechodu T_g . Při překročení teploty skelného přechodu dochází k prudkým objemovým změnám a modulu pružnosti E . Tvrdá látka s vysokou tuhostí se mění v látku snadno deformovatelnou s malou tuhostí. U polymerů používaných v konstrukcích je žadáné, aby i při zvýšených teplotách byla jejich tuhost vysoká. [17]

Obrázek 5 znázorňující optimalizovaný řez a řez kdy dochází ke spálení matrice skelnými vlákny vyztuženého kompozitního materiálu vlivem vysoké řezné rychlosti.



Obrázek 5 Vlevo optimalizovaný řez, vpravo spálená matrice [18]

6. Měření teplot při frézování

Pro měření teplot se používá různých metod založených na fyzikálních a chemických jevech. Jedná se například o [19]:

- termoelektrický jev (termoelektrické články)
- změna elektrického odporu (termistory)
- tepelné záření (pyrometry, fotometrie, termovize)
- změna struktury (teploměrné barvy a křídly)

Experimentální metody měření teploty a teplotního pole při obrábění můžeme dělit [19]:

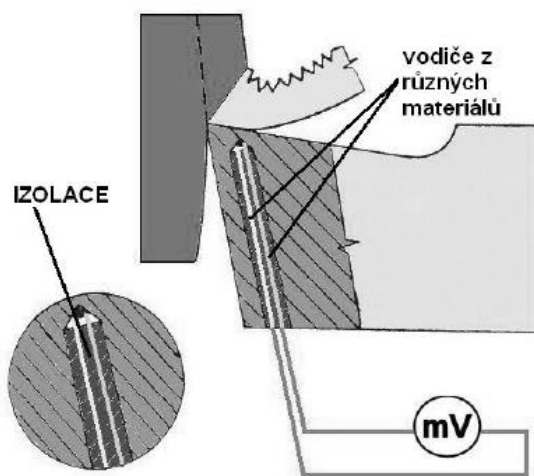
- měření teploty termoelektrickými články
- měření teploty termistory
- měření teploty pyrometry
- fotografické měření teplotního pole
- měření teplotního pole termovizí
- měření teplotního pole teplotními indikátory

6.1. Měření termoelektrickými články

Při měření teploty pomocí termočlánku se využívají termoelektrického jevu. Dva různé vodiče tvořící elektrický obvod, jsou vodivě spojeny na koncích. Pokud jsou oba spoje udržovány na vzájemně rozdílných teplotách, vznikne termoelektrické napětí. Měřicí spoj je umístěn do místa měření teploty a srovnávací spoj je udržován na známé teplotě (většinou teplotě okolí) a k nim se připojuje milivoltmetr [20]. Podle provedení se rozdělují na [20]:

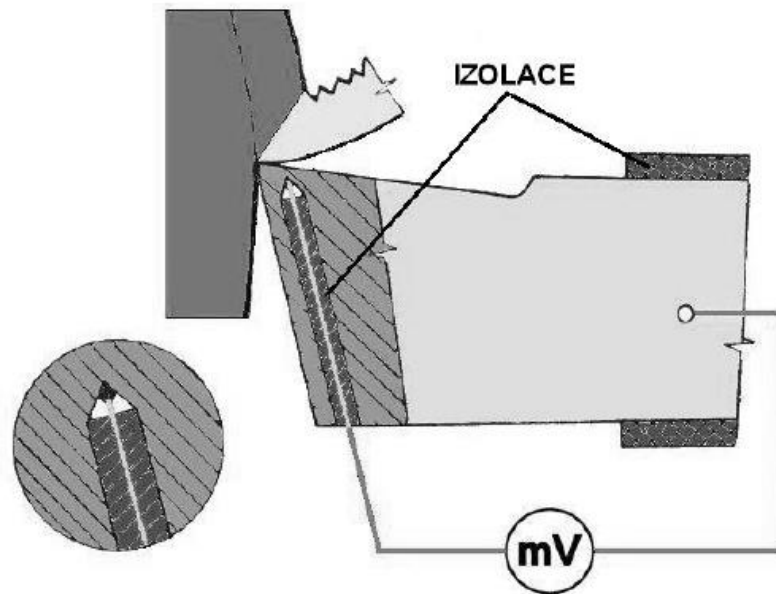
- umělý
- poloumělý
- přirozený
- termoduo

Umělý termočlánek bývá nejčastěji zabudován u dna nástroje s vyměnitelnou břitovou destičkou a používá se k měření bodové teploty na břitu nástroje. Metoda není vhodná pro malé obrobky. Obrázek 6 zobrazuje schéma zapojení umělého termočlánku [20].



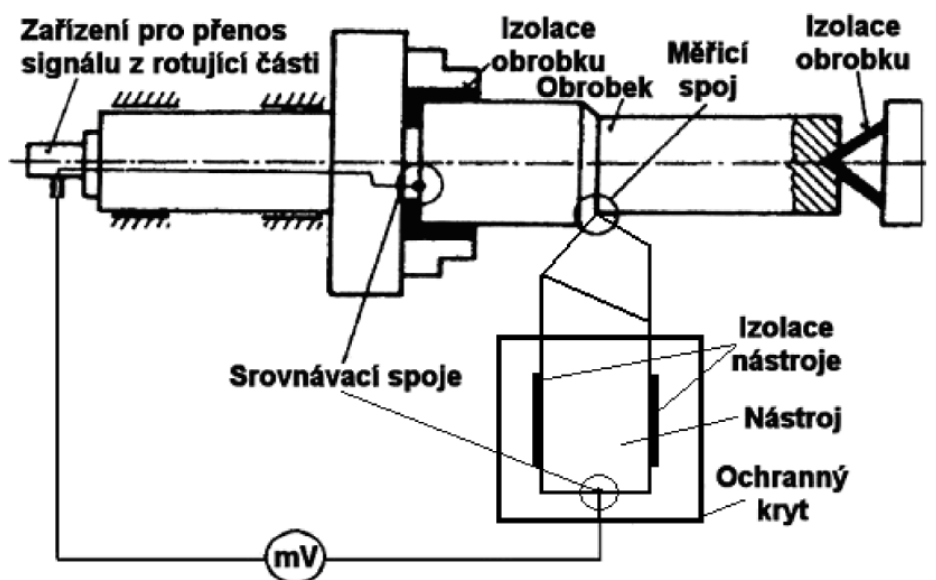
Obrázek 6 Schéma zapojení umělého termočlánku [20]

Poloumělý termočlánek se používají k měření teploty v oblasti styku třísky s čelem nástroje. Jeden vodič termočlánku tvoří materiál nástroje nebo obrobek a druhý cizí je vodivě spojený v místě řezu. Poloumělý termočlánek je více používaný než umělý termočlánek z důvodu malého rozměru cizího vodiče, který lze snadněji umístit do místa měření. Jeho použití závisí na možnosti umístění vodiče izolovaného vodiče do místa řezu a jeho vodivé spojení s nástrojem nebo materiálem obrobku. Zapojení poloumělého termočlánku zobrazuje obrázek 7 [20].



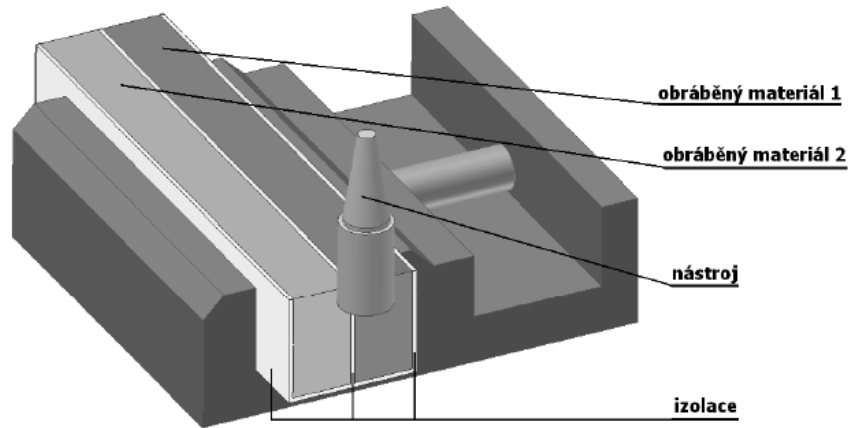
Obrázek 7 Schéma zapojení poloumělého termočláňku [20]

Přirozený termočlánek se liší tím, že nemá přídavný cizí vodič. Jeden z vodičů je materiál obrobku a druhý je materiál nástroje, měřící spoj je tak na ploše styku třísky s čelem a hřbetu s plochou řezu. Aritmetický průměr termoelektrických napětí těchto mikročláňků je výsledné napětí. Nevýhodou měření je nutnost cejchování pro každou novou materiálovou kombinaci nástroj-obrobek. Schéma zapojení přirozeného termočláňku je na obrázku 8 [20].



Obrázek 8 Schéma zapojení přirozeného termočláňku [20]

Termoduo využívá dvou materiálů obrobku a nástroje, který je vodivě spojuje. Používá se nástroj z rychlořezné oceli, slinutého karbidu a lze stanovit teplotu pro jakýkoliv elektricky vodivý materiál obrobku. Schéma zapojení termodua zobrazuje obrázek 9 [20].



Obrázek 9 Schéma zapojení termodua [20]

6.2. Termistory

Měření teploty pomocí termistorů využívá principu teplotní závislosti elektrického odporu kovů. Elektrický odpor u kovů roste s rostoucí teplotou, naopak u polovodičů klesá. Termistory výhradně používají polovodičových materiálů. Jedná se o nelineární elektrické součásti, které mají vysokou závislost elektrického odporu na teplotě. Jejich tvar bývá ve formě destiček, tyčinek a perliček. Čidla termistorů mají nízkou hmotnost a vysokou citlivost, což umožňuje měření malých a rychlých teplotních změn, bodové měření teploty a měření povrchových teplot. Jejich nedostatkem je malý teplotní rozsah do 250 °C a jejich časová nestálost [19], [20].

6.3. Tepelné záření

Intenzita elektromagnetického záření je závislá na povrchové teplotě objektu. Změřením intenzity záření, které objekt vydává, lze stanovit povrchovou teplotu objektu. Na tomto principu funguje bezdotykové měření teploty, tedy měření pyrometry a termokamerou. Všude kolem nás vyzařuje tepelné záření. Intenzitu záření, pokud známe emisivitu předmětu, který vydává záření, jeho teplotu v Kelvinech a velikost povrchu v metrech čtverečních, vyzařovaný výkon můžeme stanovit pomocí Stefanův-Boltzmanova zákona: [21]

$$I = \epsilon \sigma T^4 \quad (6.3.1)$$

kde: I – celková intenzita záření (podíl výkonu a plochy) [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

ε – emisivita

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ Stefanova-Boltzmannova konstanta

T – termodynamická teplota [K]

6.3.1. Pyrometry

Pyrometry patří mezi bezdotykové měřicí metody a měří teplotu na povrchu objektu v jisté tzv. měřicí oblasti. Nejčastější měřicí oblast je kruhová, pro měření teploty kovů během procesu lití se používají obdélníková. Výsledkem měření je průměrná hodnota teploty pro měřenou oblast, kterou dostává průměrováním intenzity tepelného záření v měřené oblasti. Při stanovení povrchové teploty je nutné nastavit parametr měření [22]:

- emisivitu (–),
- zdánlivou odraženou teplotu ($^{\circ}\text{C}$),
- teplotu atmosféry ($^{\circ}\text{C}$),
- relativní vlhkost atmosféry (%),
- vzdálenost mezi měřicím přístrojem a povrchem měřeného objektu (m).

Pyrometry lze brát jako specializované přístroje, termokamery jsou pro univerzálnější použití [22].

6.3.2. Termokamera

Termografie je bezdotyková, pasivní měřicí metoda, kde se k měření teploty využívá termokamery. Výsledkem je termogram. Termogram je snímek, který zobrazuje pomocí různých barev rozložení teploty na povrchu měřeného objektu. Termokamerou nelze změřit teplotu objektů v pozadí a vnitřní teplotu, umožňuje změřit pouze povrchovou teplotu.

Termokamera dopočítává teplotu měřeného objektu, pomocí změřeného infračerveného záření ve svém zorném poli. K výpočtu je nutné znát stupeň emisivity měřeného objektu a kompenzaci odražené teploty (RTC = Reflected Temperature Compensation). RTC v mnoha měřicích úlohách odpovídá teplotě okolí. Infračervené záření je lidským okem neviditelné a každý objekt s teplotou vyšší než absolutní nula ($0 \text{ Kelvinů} = -273,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$) vyzařuje infračervené záření [23].

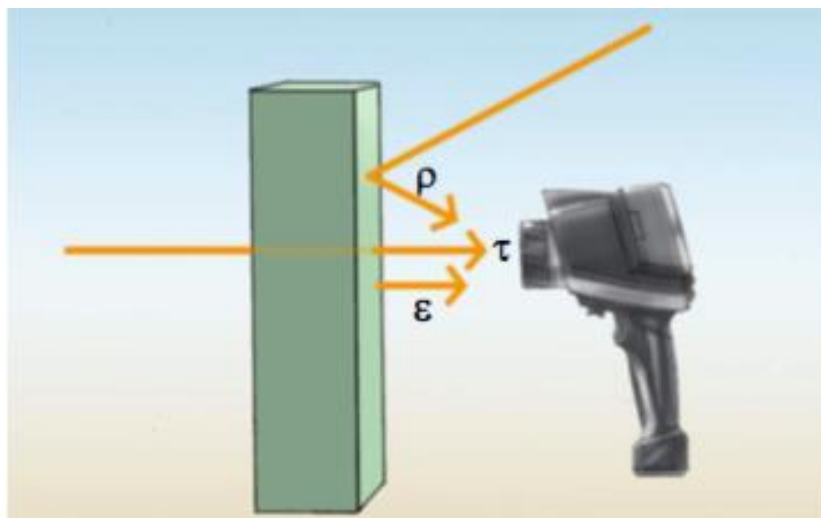
Výhody bezdotykového měření teploty [24]:

- měření je rychlé,
- umožňuje měření teploty pohybujících se součástí, nesnadno dostupných, vzdálených objektů i součástí pod elektrickým napětím,
- lze měřit i velmi vysoké teploty (nad 1300 °C),
- nedochází k ovlivnění měřeného objektu – při měření není odebírána žádná energie. V případě měření špatných vodičů tepla, jako jsou plasty nebo dřevo, je měření přesné, nedojde ke zkreslení měřených hodnot,
- při měření nedochází k poškrábání lakovaných předmětů, je možné měřit měkké povrchy, nejsou zde žádné mechanické účinky na povrchu měřeného objektu.

Omezení metody bezdotykového měření teploty [24]:

- měřený objekt musí být infračerveně opticky viditelný. Prach, kouř snižují přesnost měření,
- optická čidla se musí chránit před prachem a kapalinami,
- lze měřit pouze povrchovou teplotu.

Záření, které vstupuje do termokamery zobrazené na obrázku 10 se skládá z – vyzářené, odražené a přenesené složky infračerveného záření, které vychází z objektů v zorném poli termokamery [23].



Obrázek 10 Záření vstupující do kamery [23]

Emisivita ε je schopnost daného materiálu pohlcovat a vyzařovat infračervené záření. Maximální hodnotu emisivity má černé těleso $\varepsilon=1$ (100%), jedná se o ideální stav, který ve skutečnosti nikdy nenastane.

Reflexe (ρ) je konstanta, specifická pro každý materiál. Udává schopnost tělesa odrážet záření. Záleží na povrchu materiálu. Teplotu odraženého záření, označující se jako RTC lze na kameře zvolit a v mnoha měřicích úlohách odpovídá teplotě okolí.

Stupeň přenosu (τ) je schopnost materiálu propouštět infračervené záření.

Prostup v praxi nehraje žádnou roli, součinitel prostupu τ ve vzorci zanedbáme, vzorec se zjednoduší se na [23]:

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (6.3.2)$$

kde: ε je emisivita

ρ je reflexe

Existují různé metody pro stanovení emisivity. Pro často používané materiály se dá emisivita vyhledat v tabulkách. Tabulky emisivity mohou také pomoci ke zvolení správného měřicího zařízení, protože obsahují pásmo vlnových délek pro daný materiál. V případě kovů, by se hodnoty v těchto tabulkách měly používat pouze orientačně, protože povrchové podmínky (leštěné, zoxidované, nebo zvrásněné povrchy) mohou emisivitu ovlivnit více než materiály samy o sobě [24].

Metody stanovení emisivity [24]:

- Zahřátím materiálu na známou teplotu, která se dá určit velmi přesným dotykovým teploměrem, porovnáním této teploty s teplotou změřenou infračerveným teploměrem, emisivitu měnit do doby, dokud si dané teploty neodpovídají.
- Při nižších teplotách (do 260 °C) nalepením speciální plastové samolepky se známou emivitou na měřený objekt. Na termovizní kameře se tato emisivita nastaví a změří se správná teplota objektu. Poté se změří povrchová teplota objektu bez samolepky a přenastaví se emisivita tak, aby odpovídala předcházejícímu měření.

- Pokud je možné objekt natřít matnou černou barvou, která má emisivitu 0,95. Poté se změří teplota tohoto černého objektu.

6.4. Teplotní indikátory

Pomocí teplotních indikátorů se dají určovat místa se stejnou teplotou. Měření teploty, resp. teplotního pole pomocí teplotních indikátorů je založeno na změně barvy nebo změny skupenství při dosažení určité teploty. Měření není náročné na přípravu, nedochází k poškození nástroje či obrobku a teplotní pole lze získat poměrně rychle. Nevýhodou tohoto měření je malý teplotní rozsah a nemožnost získání přehledu o teplotě v místě styku obráběcího nástroje s třískou [20].

Nejpoužívanější indikátory jsou [20] :

1. teploměrné barvy
2. teploměrné tužky
3. teploměrné křídly a vosky

Teploměrné barvy se používají v prášku a před aplikováním na povrch se se rozmíchají v těkavé látce nebo jsou dodávány v tekutém stavu, případně i ve spreji. Při dosažení určité teploty (tzv. teploty zvratu) mění svoji teplotu. V místě obrábění, se obráběná plocha prohřeje a kde bylo dosaženo teploty zvratu se změní barva nanesené látky. Teplotní rozsah je obvykle od 50 °C do 1500 °C [19].

Teploměrné tužky se rozdělují na jednozvratné nebo dvojzvratné. Jednozvratné vykazují jedno teplotu zvratu, dvojzvratné vykazují dvě barevné změny při dvou teplotách zvratu. Teplotní rozsah bývá do 1400°C. Nanášejí se až na ohřátý povrch [19].

Teploměrné křídly se používají k měření změny skupenství při dosažení určité teploty. Nanášejí se také na ohřátý povrch a dodávají se v sadách pro určitý teplotní rozsah [19].

Pro měření teploty jsem jako nejvhodnější variantu zvolil měření pomocí termokamery, která mi umožňuje změřit oba dva materiály v oblasti blízké místě řezu. Měření pomocí termočládku je nevhodné, protože obráběný materiál musí být vodivý, skleněnými vlákny vyztužený kompozit je nevodivý. Termistory není kam umístit a jsou časově nestálé. Pyrometry měří průměrnou teplotu v oblasti měření. Teplotní indikátory mají malý teplotní rozsah.

7.Návrh přípravku pro upnutí obráběného materiálu

Jako první bylo nutné udělat přípravek od návrhu řešení až po výrobu, aby se mohlo přejít k následnému experimentu. Přípravek měl určité omezení a požadavky, které musel splňovat.

7.1. Návrh konstrukčních řešení přípravku

Při návrhu vhodného přípravku se vycházelo z nutnosti upnutí rozdílných tloušťek destiček. Přípravek tak musel být kompatibilní pro 3 mm a 6 mm destičky, které jsem použil v mém experimentu a také pro 1 mm, které byly použity v jiných experimentech, pro které měl být přípravek také použit. Musel být vhodně navržen tak, aby eliminoval posunutí destičky při frézování, dal se snadno upnout do svěráku stroje, umožnil snadnou výměnu destiček, byl přístupný pro měření termokamerou. Přípravek měl sloužit i na ostatní měření, konkrétně na měření řezných sil na dynamometru. Vzorky o rozměru 40 x 70 mm se musely vejít na dynamometr mezi piezoelektrické snímače, které jsou od sebe vzdáleny 160 mm. Mezi vzorky musela být mezera alespoň o velikosti průměru nástroje, aby se dalo frézování zastavit, a mohlo se počkat na vychladnutí nástroje a změnu otáček před dalším frézováním. Dynamometr umožňuje upnutí pouze 3 destiček v řadě rozměr a z jeho velikosti vyplývá maximální rozměr polotvaru 216 mm x 150 mm. Materiál jsem zvolil slitinu hliníku 6063, která splňovala požadavky na upnutí.

7.1.1. Upínání pomocí upínek

Můj první návrh spočíval v upínání destiček pomocí upínek, která je zobrazená na obrázku 11. Upínka by zajišťovala destičku na místě. Na přípravku by byla uchycena upínka a pomocí páky by přichytila destičku.

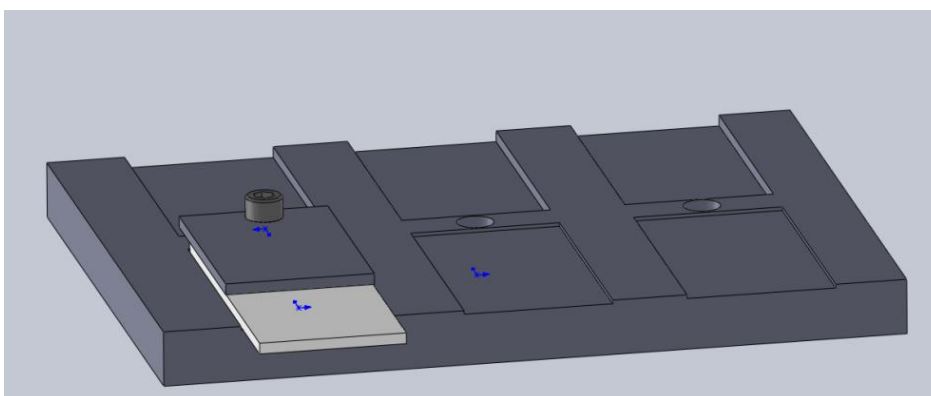


Obrázek 11 Upínka na zajištění destičky [25]

Problém byl v jejich umístění na polotvar. Bylo jich nutné 6, pro každou destičku vlastní a ty nebylo možné na předložený polotvar poskládat. Umožnila by upnutí pouze 3 destiček v jedné řadě. Bylo by nutné vyrábět dva přípravky pro různé tloušťky destiček. Tuhost upnutí by nemusela být dostatečně veliká. Výhodou by byla rychlost upínání.

7.1.2. Upínání pomocí desky

Další možnost, byla upínat destičky pomocí desky, která by přitlačovala vzorek a zabráňovala by jeho uvolnění. Materiál pro výrobu desky by byl zvolen z konstrukční oceli třídy 11. Varianta neumožňuje současně upnout vzorky do protilehlých drážek.

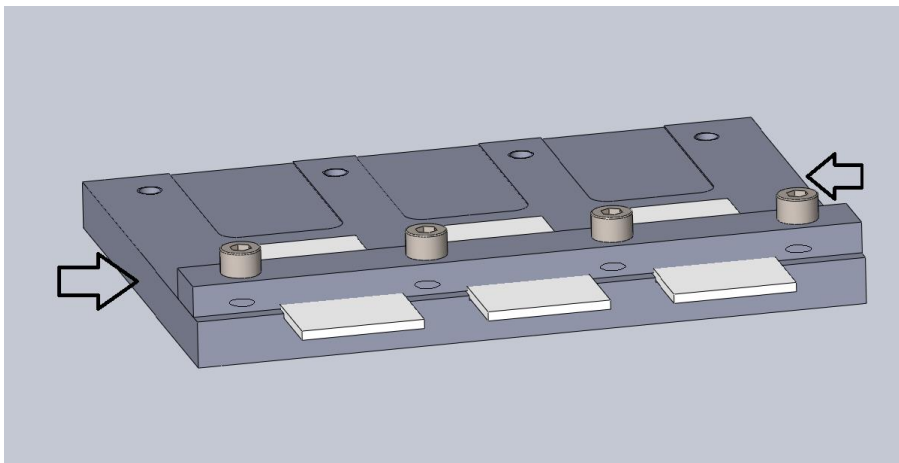


Obrázek 12 Přípravek s deskou na upnutí

Každá deska by byla stažena šroubem. Otočením desky, by byla kompatibilní jak pro 3 mm tak pro 6 mm destičku. Celkově by tak byly potřeba 3 proti desky. Nevýhoda této metody je v pracnosti upínání destiček a malé tuhosti upnutí.

7.1.3. Upínání pomocí mostu

Poslední možnost, která se mi jevila vhodná pro upínání, byla pomocí mostu, který by přichytil destičku blíž k místu řezu.



Obrázek 13 Přípravek s upnutím pomocí mostu

Most by byl přichycen pomocí 4 šroubů k přípravku, ve kterém by byli vyříznuté závity. Umožnil by tak na jedno upnutí rychlou výměnu 3 destiček. Přípravek by se umístil do čelistí svěráku na místě znázorněných šipkami.

7.1.4. Volba vhodného upnutí

Jako nejvhodnější řešení jsem zvolil upnutí pomocí mostu. Cena jedné upínky je okolo 300 Kč, bylo by nutné pořídit jich 6 a vyrábět dva přípravky. U upínání deskou by byla nutná kontrola, aby každá destička byla doražená. Deska by ji ale z velké části zakrývala. Výroba mostu by nebyla nijak složitá. Ze všech variant by výměna destiček při upnutí pomocí mostu byla nejrychlejší. Nebylo by nutné vyrábět dva přípravky jako v případě upínek.

Výkres navrženého přípravku se nachází v přílohách s názvem příloha č.1, mostu v přílohách č.2, výkres sestavy v přílohách č.3.

7.2. Výroba přípravku

K výrobě lůžek přípravku byl použit jednoduchý NC program napsaný ručním programováním. NC kód se nachází v příloze č.3. K frézování byla použita stopková fréza Ø12 mm, kterou došlo k zafrézování lůžek pro destičky. K vyvrtání děr byl použit vrták Ø6,8 mm. Ve výrobě bylo postupováno dle tabulky výrobního postupu. Polotvar byl už předem připravený, uříznutý na rozměr 216 x 150 mm.

Tabulka 3 Výrobní postup k výrobě lůžek přípravku

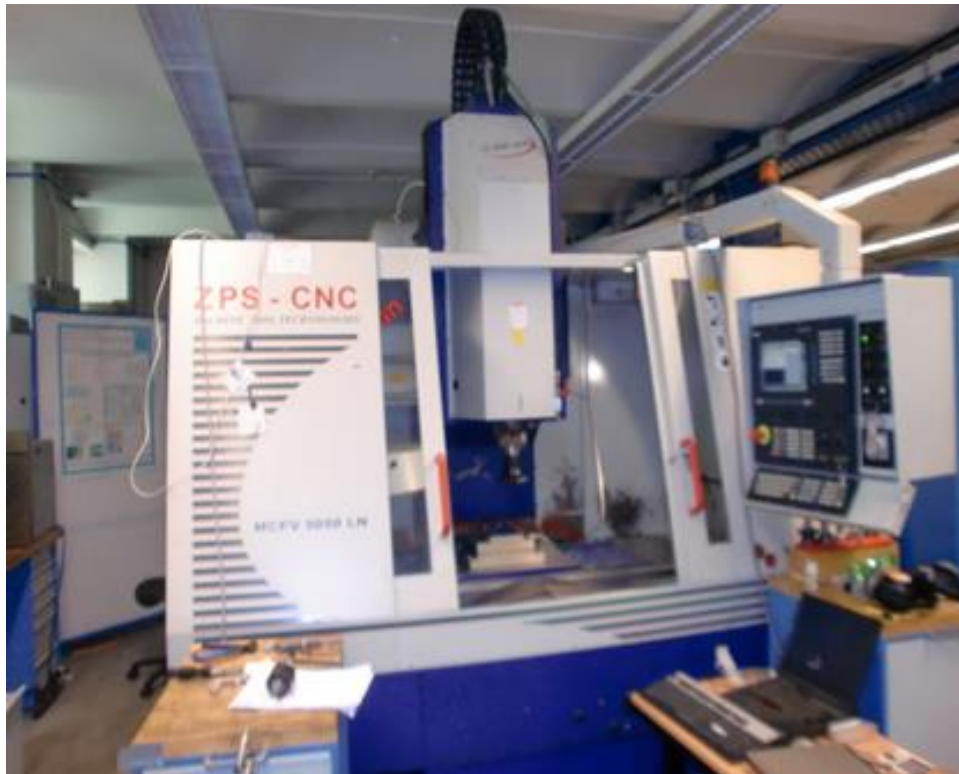
č.op	stroj	úsek	popis práce	nářadí	řezné podmínky			
					n	f	a _p	i
5	MCFV 5050	a	Upnout materiál do čelistí svěráku za rozměr 150 mm					
		b	Vyfrézovat 3 kapsičky s hl. 0,5 mm	F12	6635	1858	0,5	
		c	Vyfrézovat 3 kapsičky s hl. 1,5mm	F12	6635	1858	1,5	
		d	Vyvrtnat díru pr.6,8 mm	V6,8	250	350		
10	Ruční výroba	a	Vyřezat závit M8	Z8				

Použitý NC kód k vyvrtání mostu se nachází v příloze č.4. K vyvrtání děr byl použit vrták Ø9 mm. Polotvar předem připravený, uříznutý na rozměr 216x 20 mm.

Tabulka 4 Výrobní postup výroby mostu

č.op	stroj	úsek	popis práce	nářadí	řezné podmínky			
					n	f	a _p	i
5	MCFV 5050	a	Upnout materiál do čelistí svěráku za rozměr 20 mm					
		b	Vyvrtnat 4 díry pr.9 mm	V9	530	53	4,3	3
10	Ruční výroba	a	Odjehlit ořepy po vrtání					

Na výrobu přípravku a mostu jsem použil obráběcího centra MCFV 5050 LN znázorněného na obrázku 14.



Obrázek 14 MCFV 5050 LN

Parametry stroje jsou v následující tabulce:

Tabulka 5 Parametry stroje MCFV 5050 LN

Počet os	3
Pracovní rozjezdy	X:500 mm; Y:400 mm; Z:400 mm
Pracovní posuv	80 m/min
Rychloposuv	80 m/min
Zrychlení	X/Y/Z 20/20/15 m/s ²
Vřeteno	Výkon: 18 kW
	Max. otáčky 15 000 min ⁻¹
Výměna nástrojů	Stranový talířový zásobník s 20 nástroji
Upínací kužel	SK 40
CNC řídicí systém	Sinumerik 840D

Vertikální seřizovací přístroj BMD 310_vHSC, byl používán k zaměření špičky vrtáku a délky fréz.



Obrázek 15 Vertikální seřizovací přístroj BMD 310

Použité nástroje vrták HSS Ø6,8 mm k předvrtání díry pro závit M8, stopková fréza Iscar ECA-H4 Ø12 mm -18/60C12CFR0, strojní závitník Narex M8 6H a HSS Ø9 mm k provrtání mostu.



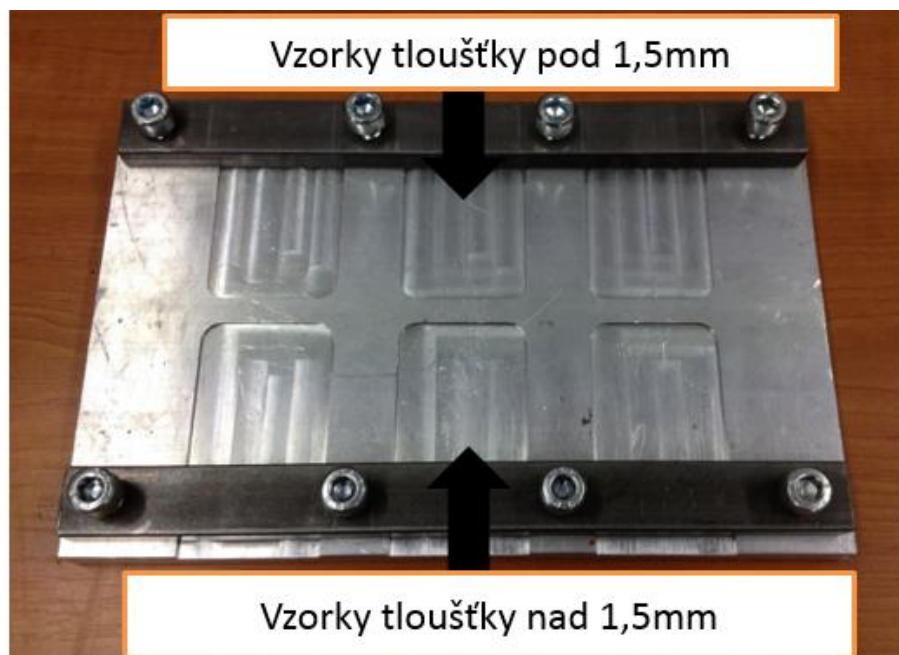
Obrázek 16 Nástroje použité při výrobě přípravku vrták HSS Ø6,8 mm, stopková fréza Iscar ECA-H4 Ø12 mm -18/60C12CFR0, strojní závitník Narex M8 6H a vrták HSS Ø9 mm

Závit M8 byl vyřezán strojním závitníkem upnutým v ručním vratidle. Nástroj při řezání závitu byl mazán pomocí řezné kapaliny.



Obrázek 17 Řezání závitu M8 do přípravku

Pro 6 mm a 3 mm destičky bylo navrženo hlubší vybrání 1,5mm, aby destička více zapadla. Pro menší tloušťky pod 1,5 mm pouze 0,5mm vybrání, které umožnilo přesné ustanovení polohy vzorku. Vybrání pro menší tloušťky jsem nevyužíval, ale přípravek slouží jako univerzální i pro jiná měření.



Obrázek 18 Vyrobený přípravek pro upínání destiček pomocí mostu

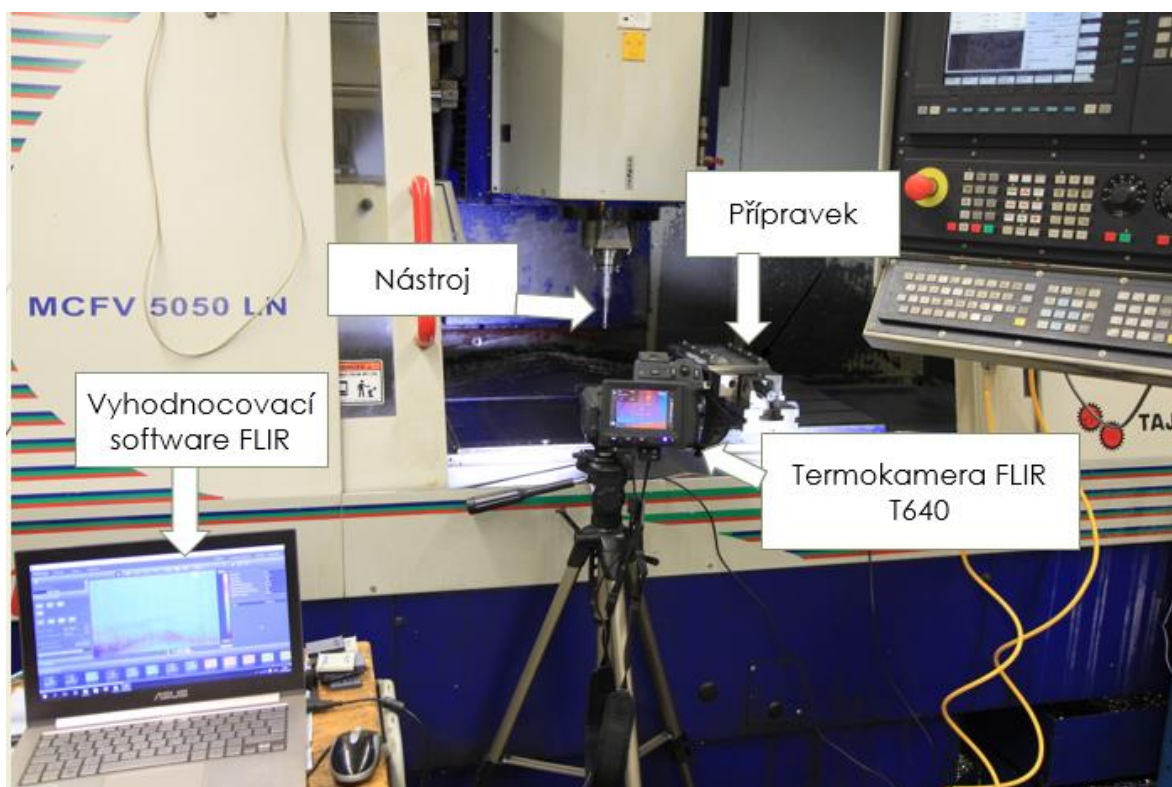
8. Experimentální část

K prohloubení dosavadních poznání FRTC materiálů při frézování z hlediska teploty v místě řezu byly navrženy tři experimenty:

- statistická významnost řezných podmínek na teplotu v místě řezu
- určení závislosti řezné rychlosti na teplotu v místě řezu
- vliv řezných úhlů speciálních nástrojů na teplotu v místě řezu

8.1. Uspořádání experimentu

Rozmístění pracoviště v experimentu vypadalo podle obrázku 19:



Obrázek 19 Pracoviště

Termokamera Flir T640 byla umístěna na pevném stativu tak, aby byl obraz ostrý, po celou dobu měření snímal přípravek ve stejném místě a zároveň umožňoval pohyb obsluhy k blízkosti stroje, kde bylo nutné provádět výměnu destiček v přípravku. Notebook byl připojený k termokameře opatřený speciálním softwarem Flir tool od výrobce kamery na kontrolu a vyhodnocování záznamu pořízené natáčením. Vyroběný přípravek byl upnutý ve svěráku stroje MCFV 5050 LN. Ve vřetenu stroje byl v tepelném upínači upnutý nástroj od firmy Gühring.

8.2. Měřicí technika

Měření experimentu stejně jako frézování přípravku proběhlo na tříosé CNC frézce MCFV 5050 LN. K měření teploty byla použita termokamera FLIR T640 zapůjčená z Ústavu technologie. Termokamera měří s přesností ± 2 °C a umožňuje propojení s notebookem, kde pořízený záznam je možné sledovat na obrazovce notebooku nebo na LCD displeji termokamery.

Pro vyhodnocování dat byl použit software od výrobce kamery FLIR Tools a dále Excel. Během režimu editace v softwaru Flir Tools je možné přidávat libovolné množství měřících bodů, oblastí pro vyhodnocování teploty. Zobrazuje základní informace o snímku jako je datum a čas pořízení. Umožňuje nastavení emisivity pro stanovení správné teploty.



Obrázek 20 FLIR T640 [26]

Tabulka 6 Technické parametry termokamery FLIR T640 [26]

Rozlišení detektoru	640 x 480
Typ detektoru	nechlazený mikrobolometr
Frekvence	30 Hz
Teplotní rozsah	-40 °C až +120 °C +100 °C až 650 °C +300 °C až +2000 °C
Citlivost detektoru	0.04°C
Přesnost	± 2 °C nebo ± 2 %
Obrazovka	4.3“ barevné LCD
Ostření	Automatické nebo manuální
Bluetooth, wifi	ano
Zoom	1-8x digitální zoom
Tvorba reportu	v kameře nebo v PC
Váha	1.3 kg s baterií
Stupeň krytí	IP54

8.3. Návrh experimentu

Celkově byly provedeny tři experimenty. Statistická významnost řezných podmínek, závislost řezné rychlosti na teplotě a vliv řezných úhlů speciálních nástrojů na teplotu.

8.3.1. Statistická významnost řezných podmínek

K frézování byl použit nástroj od firmy Gühring zobrazený na obrázku 21:

- průměr nástroje 12
- počet zubu 2
- PCD – polykrystalický diamant
- úhel čela 0°
- úhel šroubovice 2°



Obrázek 21 Nástroj od firmy Gühring

Jednotlivé měření bylo navrženo následovně:

Tabulka 7 Návrh experimentu statistická významnost řezných podmínek

v_c [mm/min]	f_z [mm]	a_e [mm]	a_p [mm]
100	0,05	1	3
300	0,1	3	6

8.3.2. Závislost řezné rychlosti na teplotě

Měření bylo provedeno stejným nástrojem od firmy Gühring a pouze s tloušťkou materiálu 6 mm.

Tabulka 8 Návrh experimentu závislost řezné rychlosti na teplotě

v_c [mm/min]	f_z [mm]
100	0,05
200	0,1
300	
400	
500	

8.3.3. Vliv řezných úhlů speciálních nástrojů

Pro potřebu určení vlivu řezných úhlů nástroje byla zvolena pouze změna parametru řezné rychlosti $v_c = 100$ m/min a $v_c = 300$ m/min. Použito bylo 6 různých nástrojů s odlišným úhlem šroubovice ω a úhlem čela γ viz obrázek 22.

Tabulka 9 Řezné úhly speciálních nástrojů

Úhel čela [°]	Úhel šroubovice [°]
15	5
25	15
	28



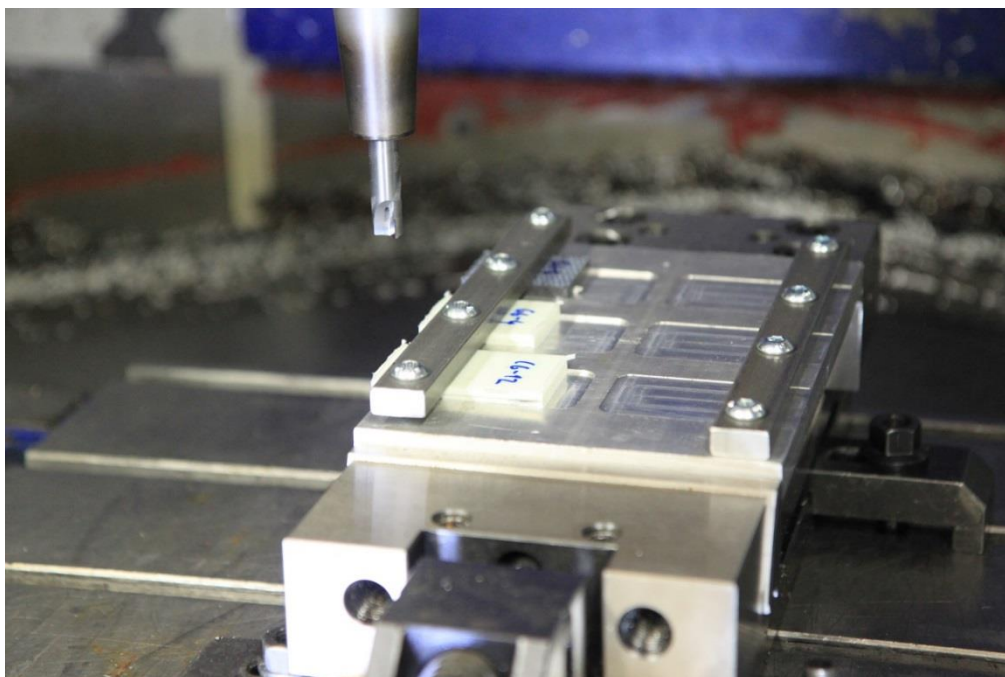
Obrázek 22 Speciální nástroje s různým řezným úhlem

- Materiál nástroje – slinutý karbid
- Povlakování: CVD diamant
- Průměr nástroje: 12 mm
- Počet zubů: 5
- Kompresní šroubovice

8.4. Popis experimentu

Nejdříve byly jednotlivé destičky upnuty do přípravku pomocí mostu a šroubů, které byly dotaženy imbus klíčem. Tím byla zajištěna stálá pozice destiček. Po upnutí bylo nutné zajistit, aby každá destička byla stejně vysunutá a nemohlo dojít k ovlivnění měření. Nástroj na jedno přejetí zarovnal všechny destičky, tím bylo zajištěno jejich stejné vysunutí. Ve stroji byly zadány řezné podmínky dle určitého experimentu. Byla zvolena metoda parametrického programování tak, abych se daly řezné podmínky lehce měnit. Program měl vymezené dráhy pro první, druhou a třetí kapsu. Pro jednotlivé kapsy byla nastavena řezná rychlost, posuv na zub a radiální hloubka řezu. Axiální hloubku řezu udávala tloušťka materiálu.

Program obsahoval první blok, který zarovnal všechny destičky na jedno přejetí. Druhý blok už obsahoval řezné parametry pro jednotlivé kapsy, které byly měněny. Před začátkem měření bylo nutné kameru nastavit tak, aby správně zaostřila a obraz byl ostrý v požadované oblasti. Poté se mohlo přejít k měření. Na obrázku 23 nástroj Gühring a upnuté vzorky v přípravku.



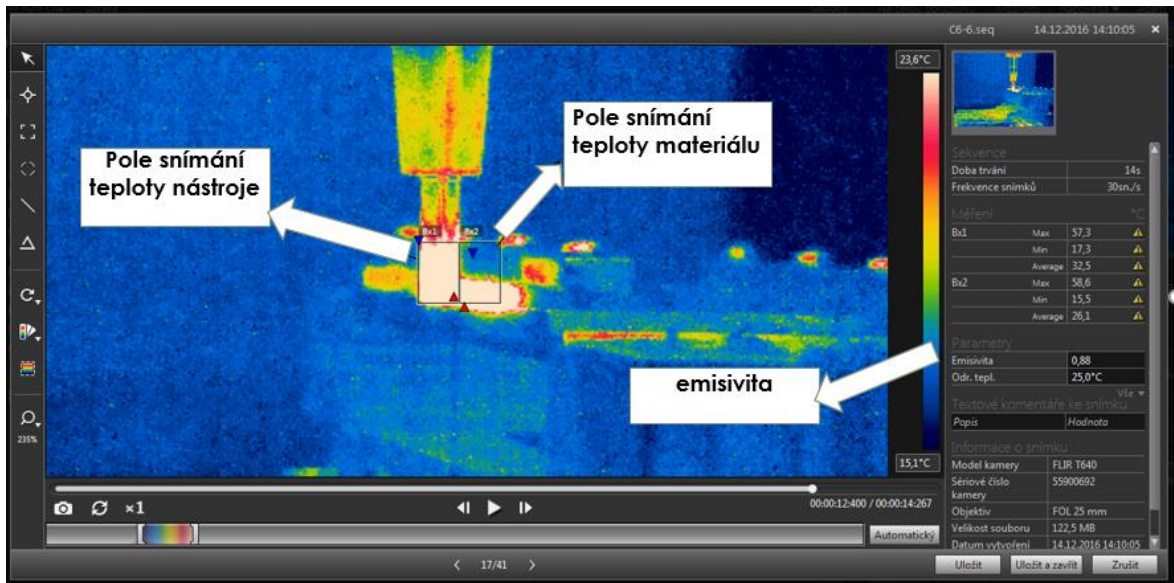
Obrázek 23 Nástroj Gühring a upnuté vzorky v přípravku

Nejdříve byla spuštěna kamera, program došlo k zafrézování jedné destičky a program se vypnul. Pokud byl pořízený záznam v pořádku, přešlo se k druhému měření, které probíhalo stejným způsobem. Na jedno upnutí bylo možné provést celkem tři měření.

Stejný postup experimentu byl zvolen pro oba materiály. Každé měření se jednou opakovalo. Pokud se měření od sebe výrazně lišila, provedlo se další opakování. Časová náročnost jednoho měření byla 5 minut. Celkový počet naplánovaných měření byl 122. Celé měření se muselo stihnout během jednoho dne, protože zapůjčení termokamery je finančně velmi náročné a stroj je kapacitně velmi vytížený. Nemohlo se tak provádět u každého měření více opakování.

8.5. Vyhodnocení měření

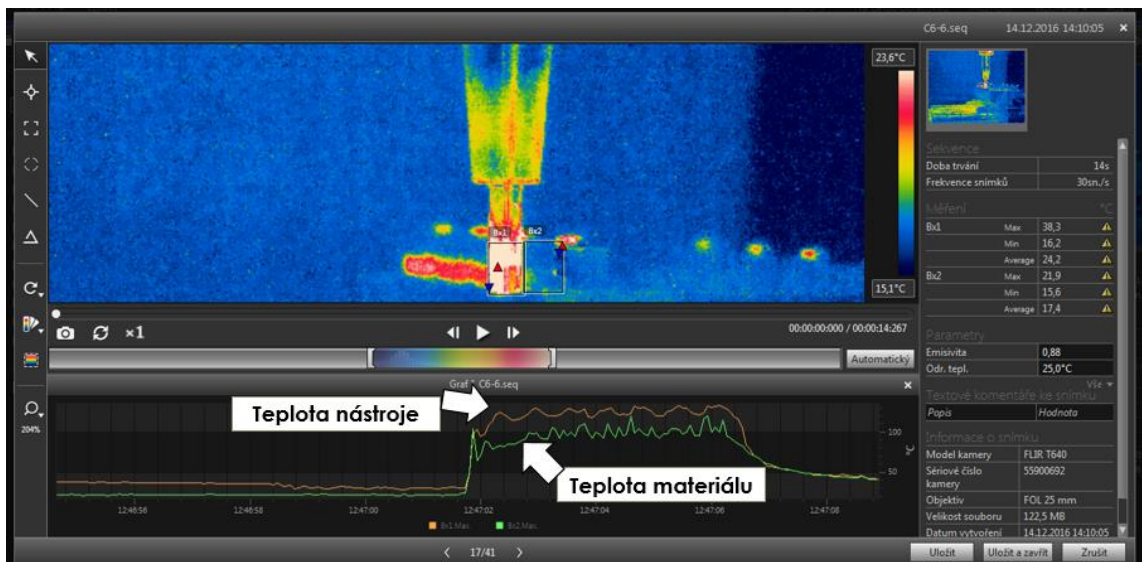
Orientační vyhodnocení bylo provedeno hned v době měření. Záznam dat byl zpracováván v softwaru FLIR Tools. U každého zpracování záznamu bylo nutné nejdříve vyplnit parametr emisivity dle daného materiálu, který byl právě měřen. Následně označit pole, které snímalo teplotu v oblasti nástroje a pole, které snímalo teplotu na materiálu. Tyto dvě oblasti jsou blízké teplotě v místě řezu.



Obrázek 24 Záznam pořízený z měření

Hodnoty emisivity pro měření materiálu C/PPS= 0,89 a G/PA12= 0,88 byly použity z dokumentu [27]. Podle frézovaného materiálu byla před vyhodnocením zadána emisivita do softwaru. Dále bylo nutné dostat jednotlivé průběhy teplot z programu.

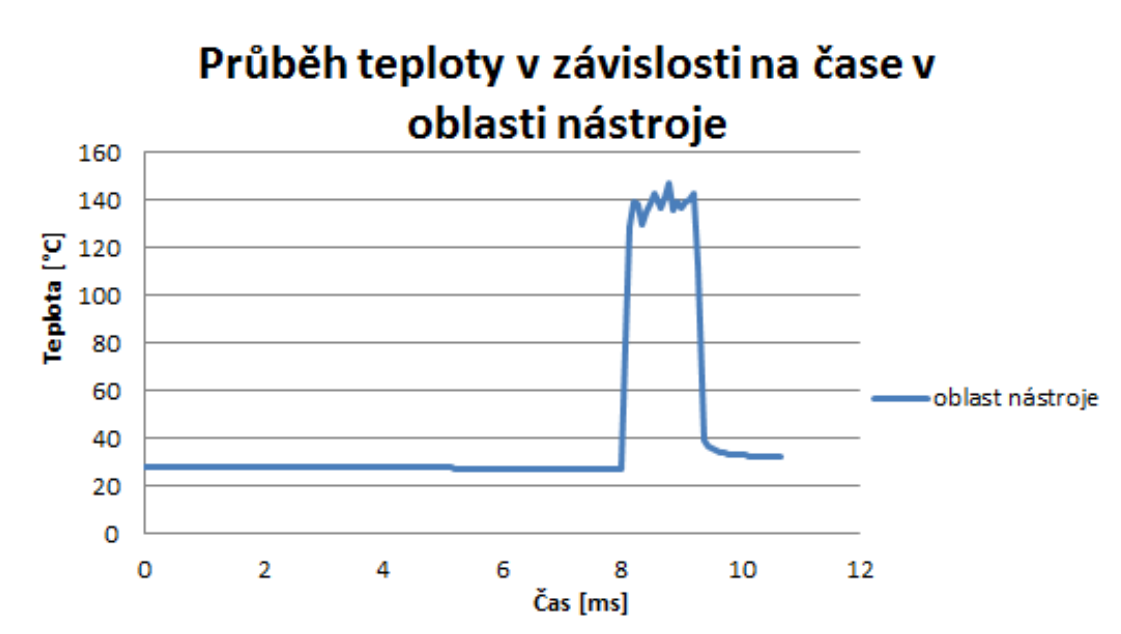
Hodnotu emisivity jsem podle frézovaného materiálu zadal před vyhodnocováním do softwaru. Dále bylo nutné dostat jednotlivé průběhy teplot z programu. K tomu jsem použil funkce vykreslit graf. Graf je znázorněn na obrázku 25.



Obrázek 25 Graf vyhodnocování záznamu měření

Teplota nástroje je průměrná teplota ve snímaném poli na nástroji. Teplota materiálu je průměrnou teplotou ve snímaném poli na materiálu. Z daného průběhu je patrné, že pole, které snímalo teplotu na nástroji má menší rozptyl hodnot než pole, které snímalo teplotu na materiálu. Pravděpodobně došlo k ovlivnění odlétající třískou od obrobku. Odlétající tříška mohla být zachycena oblastí, kterou snímalo zvolené pole na materiálu.

Z vykresleného grafu, byly data exportovány do excelu, kde pomocí speciálních funkcí došlo k vyhodnocování průběhu teplot v místě řezu.



Graf 1 Průběh teploty v programu Excel

Termokamera snímala průběh po celou dobu, když nástroj teprve přejížděl do místa řezu, a i když už nefrézoval a z místa řezu odjížděl. Tyto oblasti jsou znázorněné konstantní teplotou. Naprogramovaná funkce v Excelu dle zvoleného času, vyřadila konstantní teploty a zpracovávala teploty pouze kdy nástroj frézoval. Zvolený čas bylo nutné pro každé měření zvolit a ručně zadat do funkce podle grafu jednotlivého průběhu teplot.

Pro statistickou významnost řezných podmínek byl použit ANOVA test pro analýzu rozptylů v programu Minitab. Minitab je statistický software pro návrh experimentů a jejich analýzu. Umožňuje se vyjádřit, zda na hodnotu náhodné veličiny má statisticky významný vliv hodnota některého jeho znaku. Vyjadřuje se k platnosti nulové hypotézy H_0 , zda jsou rozptyly stejné. Pro analýzu je nejdůležitější p hodnota, pokud se nachází pod hodnotou 5 % zamítá nulovou hypotézu a daný faktor je statisticky významný [28].

8.6. Výsledky měření

Výsledky měření jsou rozdělené do podkapitol daného experimentu.

- Statistická významnost řezných podmínek
- Vliv řezné rychlosti na teplotu v místě řezu
- Vliv řezných úhlů speciálních nástrojů na teplotu v místě řezu

8.6.1. Statistická významnost řezných podmínek

Cílem experimentu je určit, který faktor (v_c, f_z, a_e, a_p) je významný a ovlivňuje teplotu v místě řezu nejvíce a který významný není. K tomu nám slouží ANOVA, analýza rozptylů v programu Minitab, která pro jednotlivé měření v oblasti nástroje vyšla následovně:

U materiálu C/PPS se všechny faktory nacházejí pod hranicí 0,05, všechny jsou významné. Na základě F testu má největší vliv na teplotu v místě řezu řezná rychlost.

Tabulka 10 Anova z programu Minitab pro materiál C/PPS v oblasti nástroje

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
ae	1	851.5	851.5	851.5	75.91	0.000
ap	1	212.7	212.7	212.7	18.96	0.001
fz	1	249.8	249.8	249.8	22.27	0.001
vc	1	4942.7	4942.7	4942.7	440.63	0.000
Error	11	123.4	123.4	11.2		
Total	15	6380.1				

Jednotlivé sloupce mají následující význam [28]:

Source je zdroj měnlivosti, kolik znaků je navíc oproti jednoduššímu modelu.

DF-značí stupně volnosti, kolik parametrů navíc se ve složitějším modelu používá.

Seq SS– součet čtverců.

Adj SS – průměrná suma čtverců.

Adj MS – průměrné čtverce.

F-je hodnota testovaného kritéria, čím větší hodnota, tím statisticky významnější faktor.

Jako P-hodnota značí sílu testu.

P-určuje hodnotu na základě které se rozhoduje zamítnutí hypotézy o shodě rozptylů. Pokud je menší jak 0,05 zamítá se rovnocennost modelů.

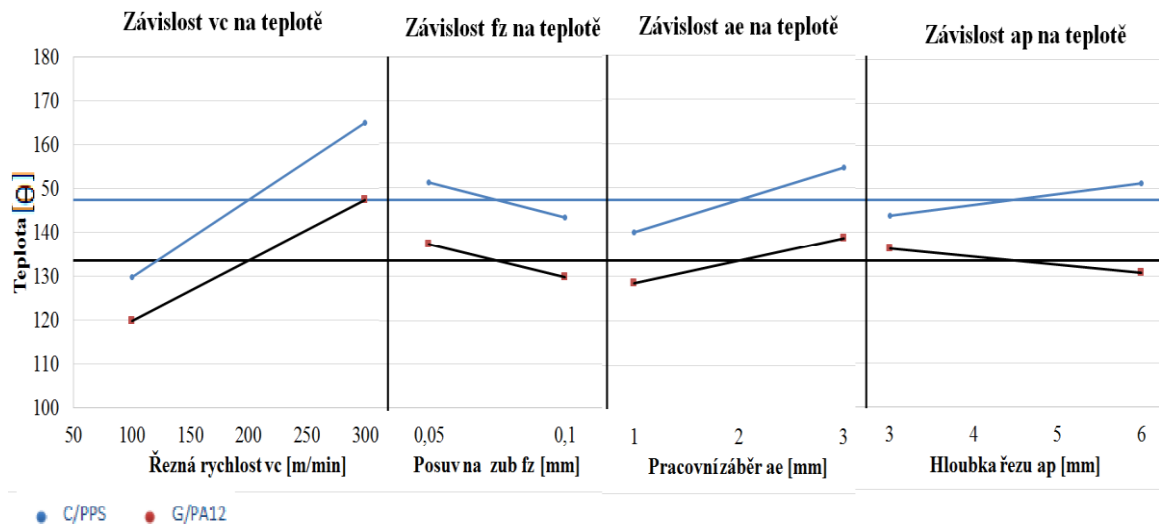
Error – reziduální rozptyl.

Total – celkový rozptyl.

Tabulka 11 Anova z programu Minitab pro materiál G/PA12 v oblasti nástroje

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
ae	1	430.62	430.62	430.62	22.06	0.001
ap	1	124.72	124.72	124.72	6.39	0.028
fz	1	230.75	230.75	230.75	11.82	0.006
vc	1	3058.80	3058.80	3058.80	156.70	0.000
Error	11	214.71	214.71	19.52		
Total	15	4059.60				

Materiál G/PA 12 má všechny spočtené P-hodnoty hladiny významnosti pod 0,05. Největší vliv na teplotu v místě řezu má řezná rychlost.



Graf 2 Středních hodnot pro hlavní faktory měřená v oblasti nástroje

Z grafu je patrné, že největší vliv na teplotu má řezná rychlost. S rostoucí řeznou rychlostí roste i teplota. Teplota se snižuje s rostoucím posuvem na zub. Vliv posuvu a pracovního záběru je podobný. Zvyšující se pracovní záběr zvyšuje teplotu. Hloubka řezu má u obou materiálů odlišný vliv. Rostoucí hloubka řezu u materiálu C/PPS teplotu zvyšuje, naopak u G/PA12 teplotu snižuje. Předpoklad byl, že trend bude u obou materiálů stejný. Více opakování by mohlo vyloučit, zda se jedná o chybu měření nebo vlastnost materiálu.

Analýza v programu Minitab v oblasti měřené na materiálu.

Tabulka 12 Anova z programu minitab pro materiál C/PPS v oblasti materiálu

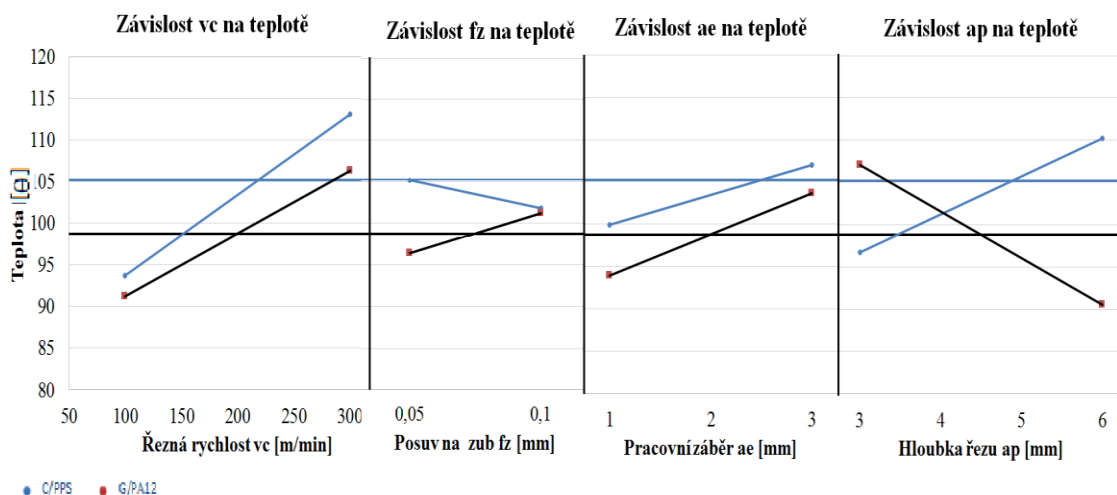
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
ae	1	204.21	204.21	204.21	3.29	0.097
ap	1	723.70	723.70	723.70	11.67	0.006
fz	1	43.80	43.80	43.80	0.71	0.419
vc	1	1503.71	1503.71	1503.71	24.25	0.000
Error	11	682.01	682.01	62.00		
Total	15	3157.44				

Materiál C/PPS má posuv na zub a pracovní záběr nad hranicí významnosti 0,05, pro měření vycházejí jako faktory nevýznamné. Největší vliv na teplotu má řezná rychlost

Tabulka 13 Anova z programu minitab pro materiál G/PA12 v oblasti materiálu

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
ae	1	376.60	376.60	376.60	6.33	0.029
ap	1	1088.27	1088.27	1088.27	18.31	0.001
fz	1	93.52	93.52	93.52	1.57	0.236
vc	1	915.05	915.05	915.05	15.39	0.002
Error	11	653.93	653.93	59.45		
Total	15	3127.35				

Materiál G/PA 12 má posuv na zub nad hranicí významnosti 0,05 a vychází jako jediný faktor nevýznamný pro měření. Největší vliv na teplotu v místě řezu má hloubka řezu.



Graf 3 Středních hodnot pro hlavní faktory v oblasti materiálu

Z grafu je patrné, že se zvyšující řeznou rychlostí se zvětšuje i teplota u obou materiálů. Vliv posuvu na zub se u obou materiálů liší. U C/PPS se vzrůstající hodnotou posuvu na zub teplota klesá, u G/PA12 roste.

Závislost pracovního záběru má pro oba materiály stejný trend, se zvyšující hodnotou mají rostoucí charakter. Hloubka řezu se pro jednotlivé materiály liší. U C/PPS s rostoucí hodnotou posuvu na zub roste a u G/PA12 se naopak teplota snižuje.

Rozdílné charakteristiky mohou být způsobeny chybou měření, která však nebyla prokázána opakovaným měřením nebo odlišnými vlastnostmi frézovaných materiálů. Záznam v oblasti materiálu mohl být více ovlivněný odlétající třískou, která mohla mít jinou teplotu než vyhodnocovaná oblast. Další opakování experimentu nebo jiná metodika měření v oblasti materiálu by mohly vyloučit, zda se jedná o chybu měření, odlišné vlastnosti materiálu. Rozdílné charakteristiky by mohly být námětem pro další zkoumání.

8.6.2. Vliv řezné rychlosti na teplotu v místě řezu

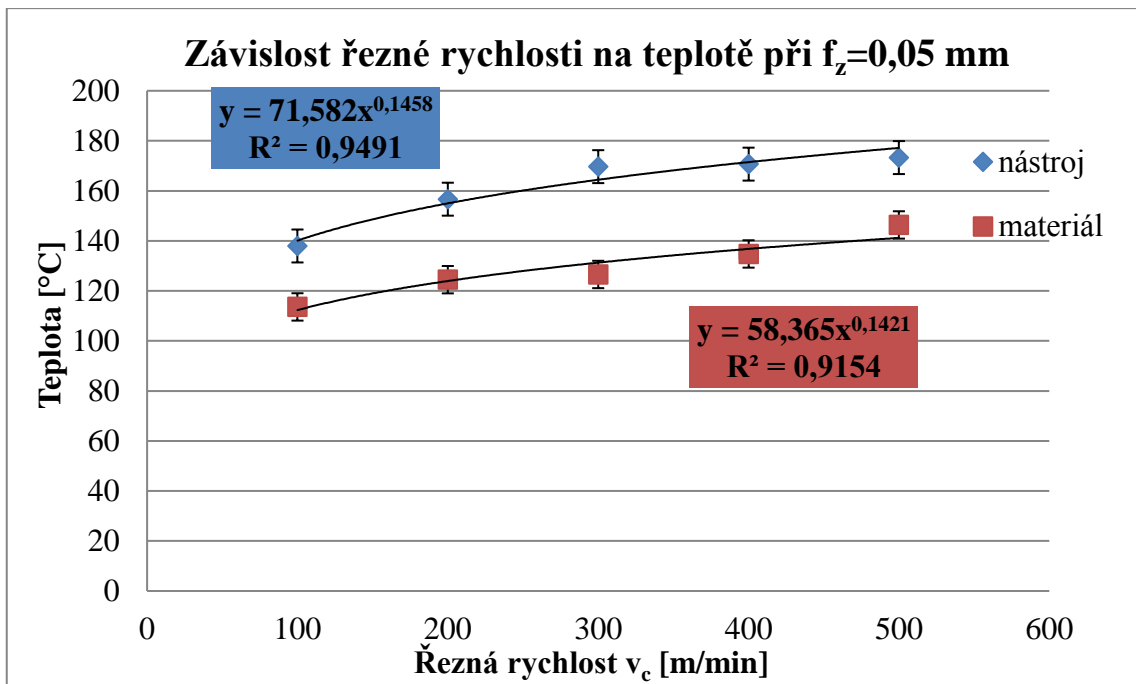
Cílem experimentu bylo ověření platnosti vztahu pro výpočet teploty řezání, která je dána [15]:

$$\Theta_s = C_\Theta v_c^{z_\Theta} \quad (8.6.2)$$

kde: Θ_s je teplota řezání ve °C

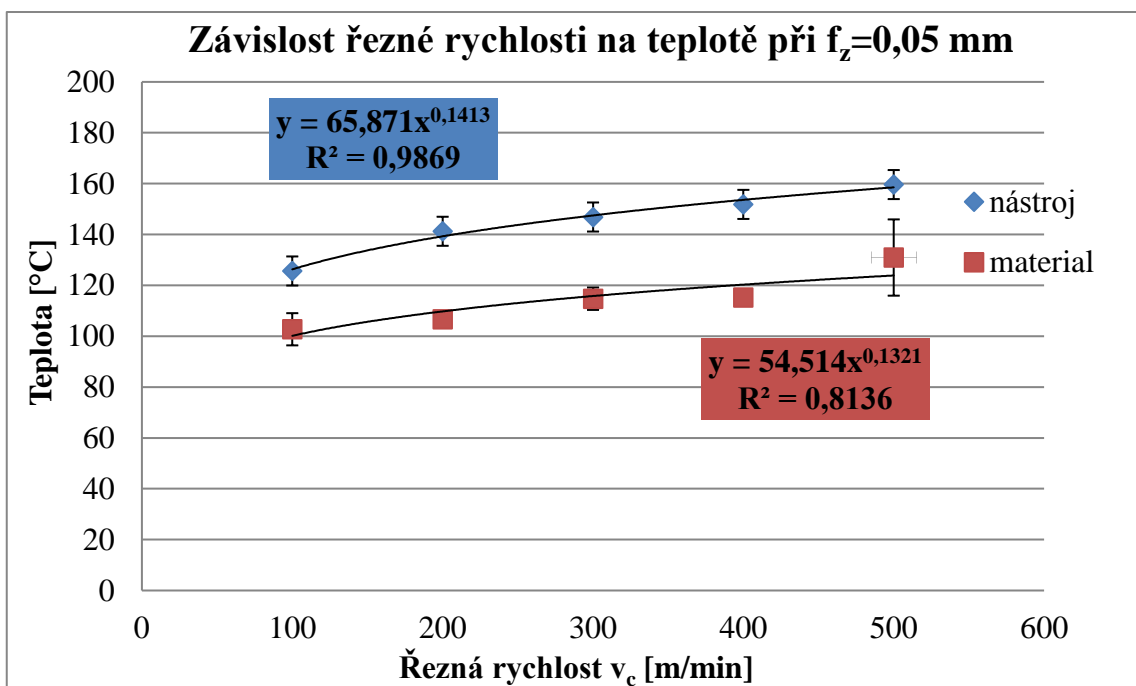
C_Θ – empirická konstanta

z_Θ – empirický exponent



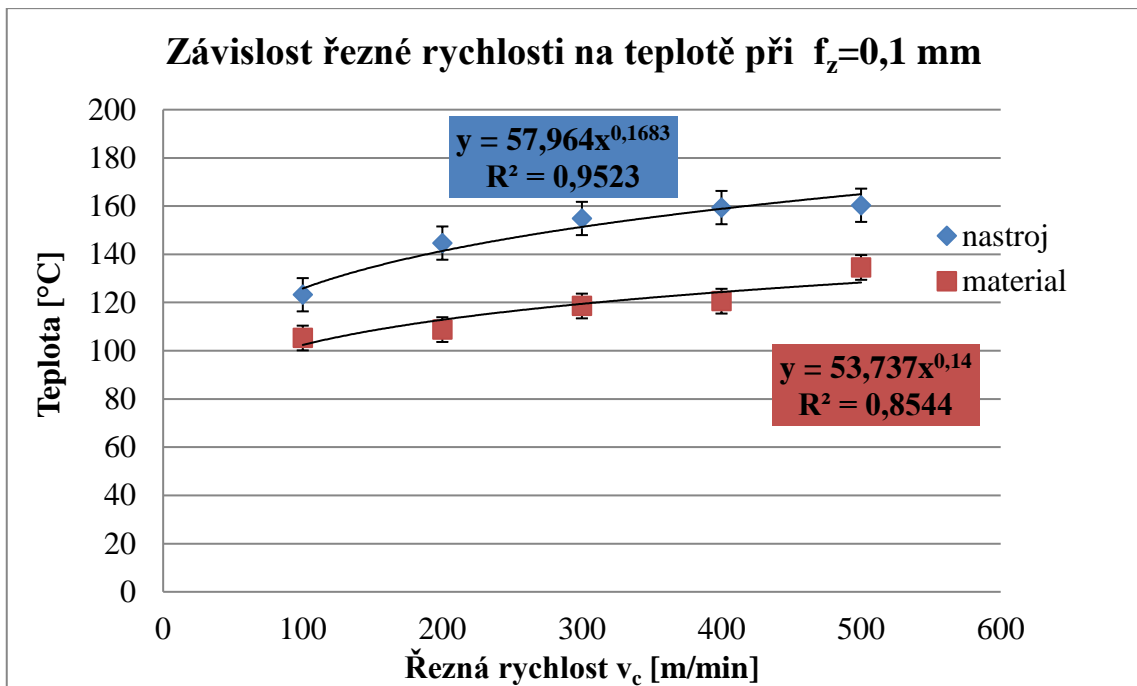
Graf 4 Závislost řezné rychlosti na teplotě při $f_z=0,05$ mm u materiálu C/PPS

Z grafu 4. je zřejmé, že teplota roste podle exponenciální křivky s koeficientem determinace u nástroje i materiálu vyšším jak 0,9.



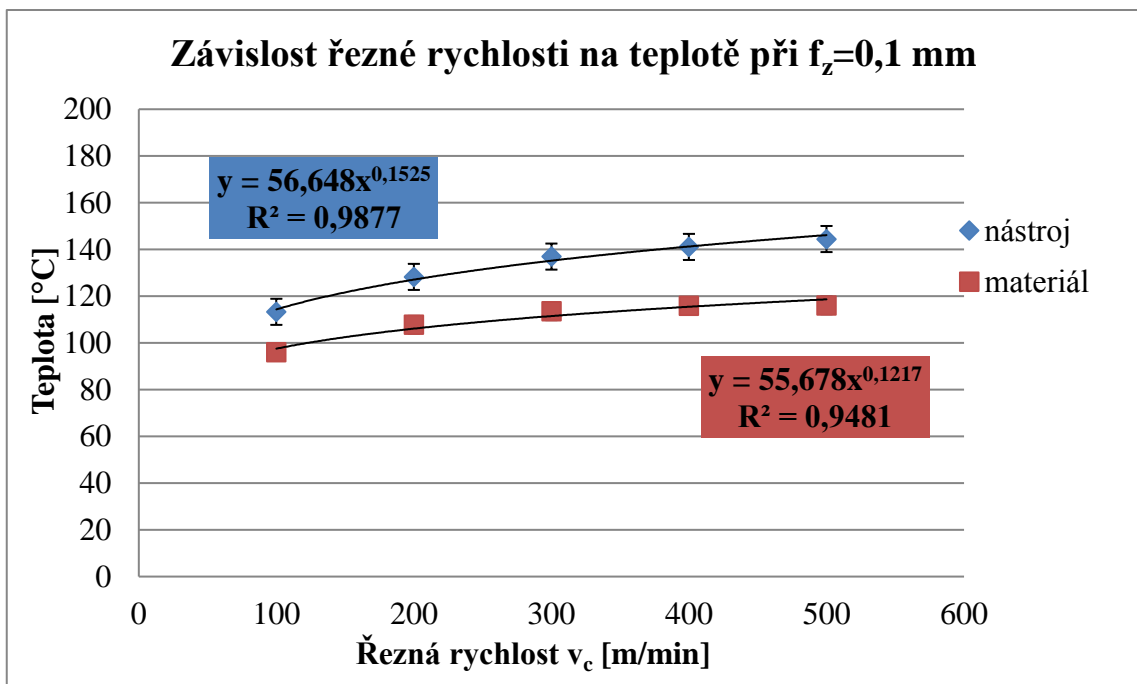
Graf 5 Závislost řezné rychlosti na teplotě při $f_z=0,05$ mm u materiálu G/PA12

Z grafu 5. je patrné, že teplota roste podle exponenciální křivky s koeficientem determinace u nástroje 0,9869 a materiálu 0,8136.



Graf 6 Závislost řezné rychlosti na teplotě při $f_z=0,1$ mm u materiálu C/PPS

U grafu 6. s vyšším posuvem na zub 0,1 mm stejně jako u posuvu 0,05 mm teplota se zvyšuje s rostoucí řeznou rychlostí podle exponenciální křivky.



Graf 7 Závislost řezné rychlosti na teplotě při $f_z=0,1$ mm u materiálu G/PA12

Z grafů 7. je patrné, že řezná rychlost v závislosti na teplotě se zvětšuje podle exponenciální křivky. U materiálu C/PPS byla vyšší teplota než u G/PA12. S posuvem na zub 0,1mm byla teplota nižší než s posuvem 0,5mm.

Tabulka 14 Výsledků závislosti řezné rychlosti

materiál	C/PPS		G/PA12	
měřící oblast	nástroj	materiál	nástroj	materiál
$f_z = 0,05 \text{ mm}$				
Y	$71,582x^{0,1458}$	$58,365x^{0,14}_{21}$	$65,871x^{0,1413}$	$54,514x^{0,1321}$
R ²	0,9491	0,9154	0,9869	0,8136
$f_z = 0,1 \text{ mm}$				
Y	$57,964x^{0,1683}$	$53,737x^{0,14}$	$56,648x^{0,1525}$	$55,678x^{0,1217}$
R ²	0,9523	0,8544	0,9877	0,9481

Výsledné rovnice mohou sloužit pro modelování teploty v řezu či na nástroji. Na základě vysoké spolehlivosti proložení exponenciální směrnice trendu měřenými body byla ověřena platnost vztahu 8.6.2 pro obrábění kompozitních materiálu s termoplastickou maticí ve všech případech měření.

8.6.3. Vliv řezných úhlů speciálních nástrojů na teplotu v místě řezu

Měření byla vyhodnocována ANOVA testem pro zjištění vlivu geometrie na velikost teploty v porovnání s řeznou rychlostí. Pro jednotlivé měření vyšla ANOVA pro oblast teploty u nástroje:

Tabulka 15 Anova z programu Minitab u materiálu C/PPS v oblasti nástroje

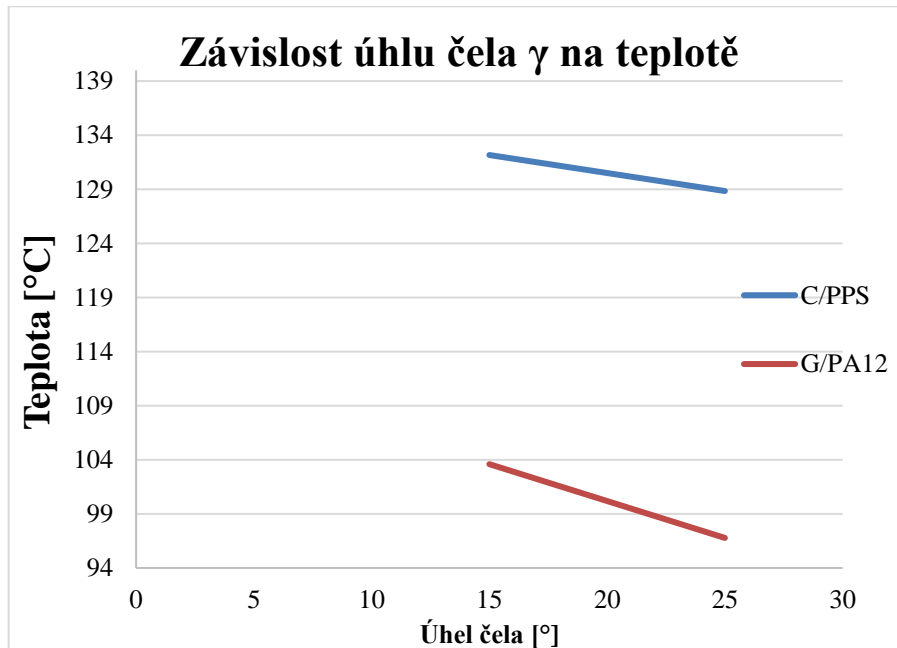
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
vc	1	1088.47	1088.47	1088.47	35.03	0.001
gama	1	33.20	33.20	33.20	1.07	0.336
omega	2	295.85	295.85	147.92	4.76	0.050
Error	7	217.53	217.53	31.08		
Total	11	1635.06				

U materiálu C/PPS jako faktory nevýznamné vychází úhel čela a úhel šroubovice. Největší vliv na teplotu v místě řezu má řezná rychlost

Tabulka 16 Anova z programu Minitab u materiálu G/PA12 v oblasti nástroje

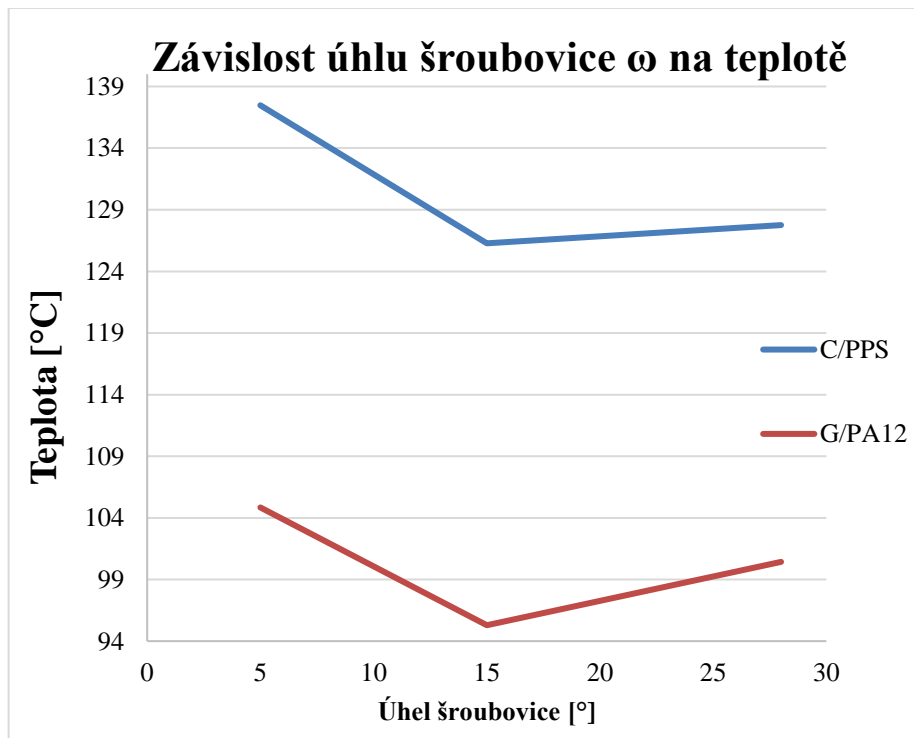
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
vc	1	762.26	762.26	762.26	47.80	0.000
gama	1	139.43	139.43	139.43	8.74	0.021
omega	2	182.91	182.91	91.46	5.74	0.034
Error	7	111.63	111.63	15.95		
Total	11	1196.23				

U materiálů G/PA12 vychází všechny faktory jako významné. Největší vliv na teplotu v místě řezu má řezná rychlost



Graf 8 Závislost úhlu čela speciálního nástroje na teplotě v oblasti nástroje

Teplota s rostoucím úhlem čela klesá. Prudší ovlivnění nastalo u materiálu G/PA12.



Graf 9 Závislost úhlu šroubovice speciálního nástroje na teplotě v oblasti nástroje

Největší teplota byla naměřena při frézování s úhlem šroubovice 5°. Pro oba materiály vychází nejmenší teplota při úhlu šroubovice 15°. S úhlem šroubovice 28° nám teplota znovu začala růst.

Nejlépe vychází speciální nástroj s úhlem čela 25° a úhlem šroubovice 15°. U materiálu C/PPS se potvrdil trend s vyšší teplotou při obrábění. U obou materiálů byl podobný průběh závislostí.

Anova pro jednotlivé materiály pro oblast v okolí materiálu vyšla následovně:

Tabulka 17 Anova z programu minitab u materiálu C/PPS v oblasti materiálu

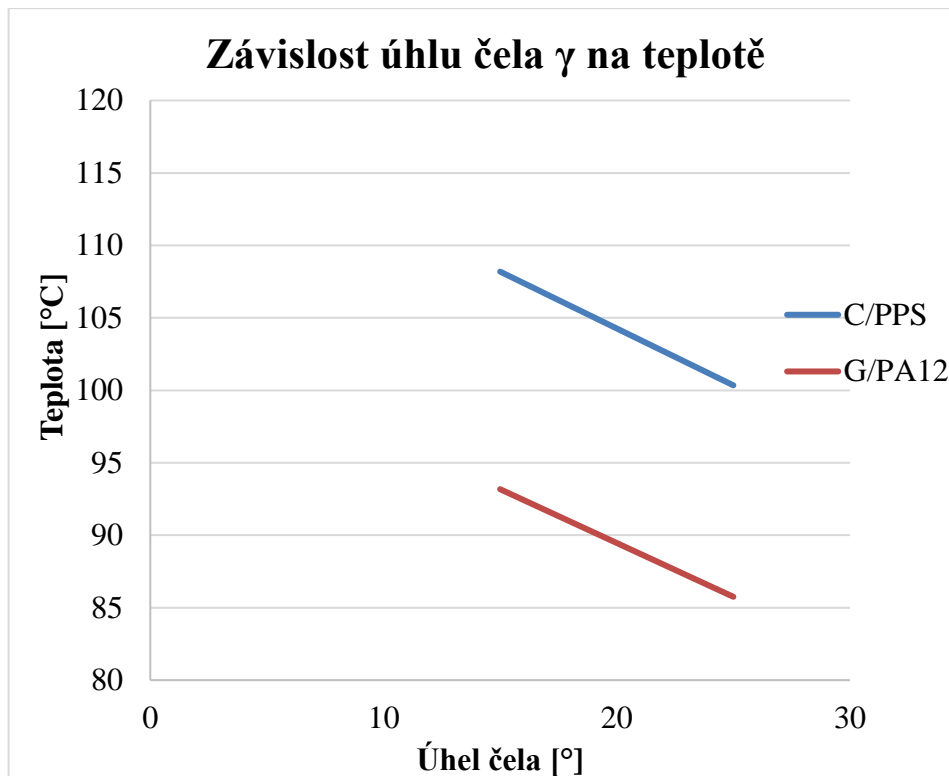
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
vc	1	1522.16	1522.16	1522.16	15.73	0.005
gama	1	184.65	184.65	184.65	1.91	0.210
omega	2	272.91	272.91	136.45	1.41	0.306
Error	7	677.36	677.36	96.77		
Total	11	2657.08				

Pro materiál C/PPS vychází úhel čela a šroubovice nad hranicí významnosti 0,05, jako faktor nevýznamný.

Tabulka 18 Anova z programu minitab u materiálu G/PA12 v oblasti materiálu

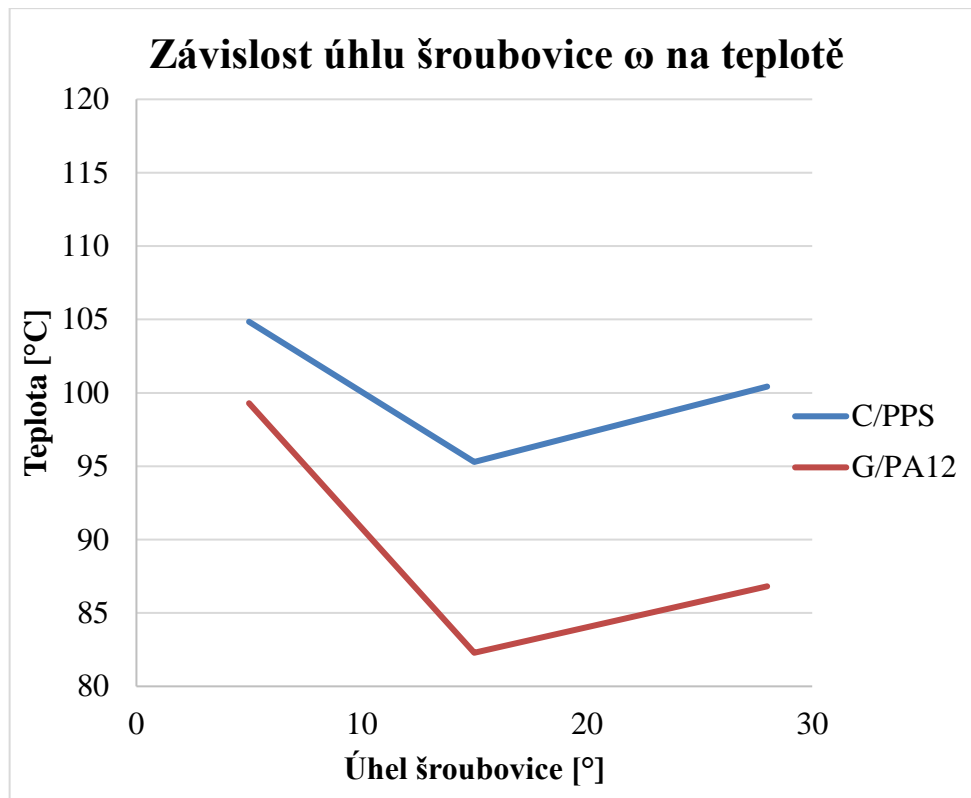
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
vc	1	1069.23	1069.23	1069.23	26.81	0.001
gama	1	339.18	339.18	339.18	8.51	0.022
omega	2	303.69	303.69	151.85	3.81	0.076
Error	7	279.14	279.14	39.88		
Total	11	1991.24				

Pro materiál G/PA12 úhel šroubovice vychází nad hranicí významnosti 0,05. Největší vliv na teplotu má řezná rychlost.



Graf 10 Závislost úhlu čela speciálního nástroje na teplotě v oblasti materiálu

Z grafu je patrné, že vyšší úhel čela 25° vykazuje nižší teplotu při obrábění než úhel čela 15° u obou materiálů.



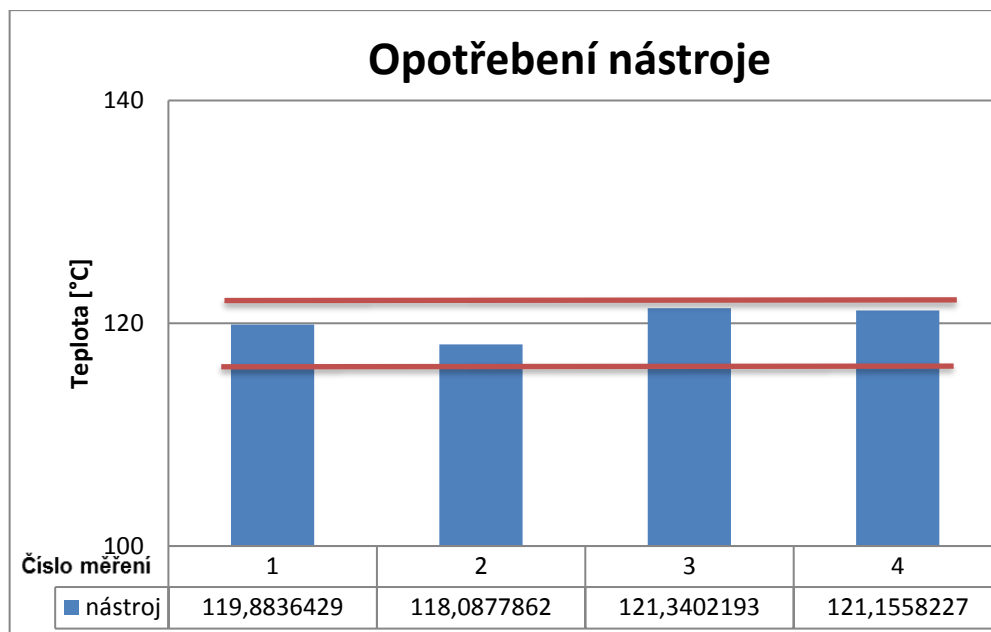
Graf 11 Závislost úhlu šroubovice speciálního nástroje na teplotě v oblasti materiálu

Z grafu vychází, že s úhlem šroubovice 15° je při frézování nejnižší teplota. U G/PA12 dochází k prudšímu ovlivnění.

U obou měření, jak v oblasti nástroje, tak v oblasti materiálu vychází stejná charakteristika. Nejnižší teploty byly naměřeny při frézování se speciálním nástrojem s úhlem čela 25° a úhlem šroubovice 15°.

8.7. Vliv opotřebení nástroje na zvýšení teploty během experimentu

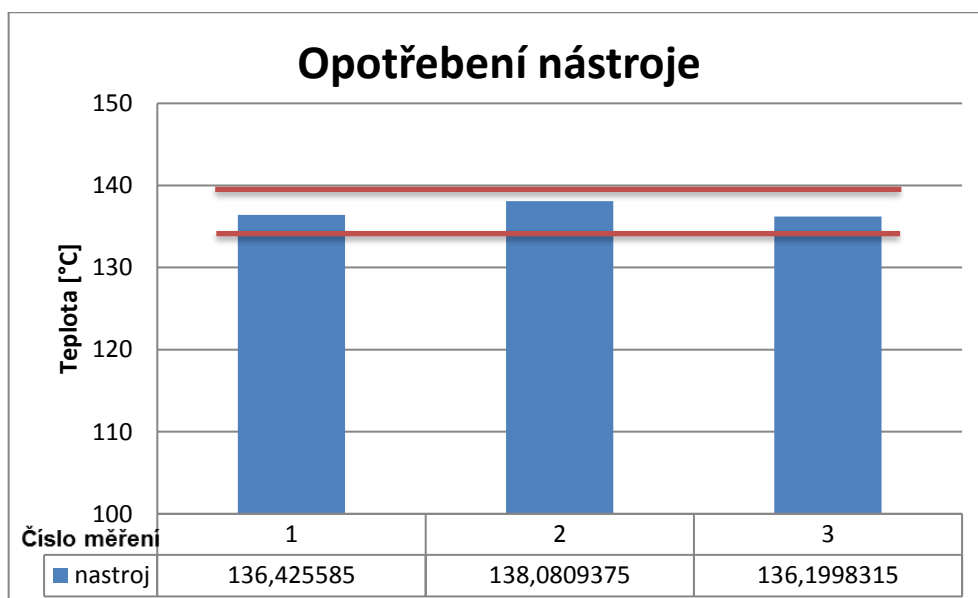
K vyloučení opotřebení nástroje byla provedena během měření zkouška se stejnými řeznými parametry. Jednalo se o první měření, opakované, poté libovolně vsunuté a poslední závěrečné měření experimentu. Meze byly určeny z přesnosti termokamery $\pm 2^\circ\text{C}$. Měření při experimentu statistické významnosti řezných podmínek byla následující:



Graf 12 Opotřebení nástroje při měření experimentu významnosti řezných podmínek

Horní mez nabývala hodnoty 121,88 °C, dolní mez 117,88 °C. Opakovaná měření byla v mezích, vliv opotřebení nebyl prokázán.

Při druhém experimentu určení závislosti řezné rychlosti na teplotě také byla provedena zkouška na opotřebení podle stejných řezných parametrů. Zkouška byla provedena jako první měření, opakované a posledního závěrečného měření.



Graf 13 Opotřebení nástroje při měření experimentu závislosti řezné rychlosti

Měření byla v mezích 138,42 °C a 134,42 °C. Tím byla vyloučena chyba zvýšení teploty během experimentu, způsobená opotřebením nástroje.

9. Závěr

Byl navržen a vyroben univerzální přípravek na upínání tenkých desek kompozitních materiálů pomocí mostu. Přípravek dostatečně fixoval destičku, ani při jednom měření nedošlo k jejímu posunutí při frézování. Výměna byla rychlá a nebyla náročná. Přípravek byl upnutý ve svěráku stroje a byl snadno dostupný jak pro výměnu destiček, tak pro měření termokamerou, která byla zvolena jako vhodná metoda pro měření průměrné teploty ve zvolené oblasti měření v blízkosti místa řezu pro tři experimenty.

V prvním experimentu byl zaměřen na statistickou významností řezné rychlosti, posuvu na zub, pracovního záběru a hloubky řezu na teplotu. Při řezné rychlosti 300 m/min byla teplota vyšší jak při rychlosti 100 m/min u obou materiálů a obou oblastí, jak nástroje, tak materiálu. V oblasti nástroje byla teplota pro oba materiály nižší při posuvu 0,1 mm než při 0,05 mm, v oblasti materiálu se trend pro oba pro materiály lišil. Při hodnotě pracovního záběru 3 mm byla teplota vyšší u obou materiálů i obou oblastí než při 1 mm. Hloubka řezu se v obou oblastech i materiálech rozchází.

V druhém experimentu byla určena závislost řezné rychlosti na teplotě. Ta roste podle exponenciální křivky v obou měřených oblastech, což odpovídá teorii obrábění. Nejnižší teplota byla dosažena při řezné rychlosti 100 m/min. Celkově byly provedeny dva experimenty při posuvu na zub 0,05 mm a 0,1 mm. Koeficienty pro výpočet teploty (C_{θ} a z_{θ}), které byly stanoveny z mocninné závislosti, je možno využít pro modelování teploty při obrábění vybraných kompozitů. Nižší teploty byly naměřeny s hodnotou posuvu 0,1 mm.

Třetí experiment byl založen na porovnání odlišných řezných úhlů nástroje na konečnou teplotu. Podle výsledků nejlépe vycházel nástroj s úhlem čela 25° a úhlem šroubovice 15°, kde byla naměřena nejnižší teplota při frézování u obou materiálů.

V oblasti nástroje byla naměřena v každém experimentu vyšší teplota než v oblasti materiálu. Materiál C/PPS vykazoval větší teploty v každém měření než materiál G/PA12.

10. Citovaná literatura

1. **Rosický, Jiří a Klement, Josef.** *Úvod do problematiky kompozitních materiálů.* [Online][Citace:30.1.2017.]
<http://www.ortotikaprotetika.cz/oldweb/Wc4a791405f74c.htm>.
2. **Johnson, Todd.** Learn about composite materials. [Online] 2017. [Citace: 1. 2. 2017.]
<https://www.thoughtco.com/what-is-a-composite-820406>. ISBN není uvedeno.
3. **Sheikh-Ahmad, Jamal Y.** *Machining of Polymer.* London : Springer, 2009. ISBN 978-0-387-68619-6.
4. **Macek, Karel a Zuna, Petr.** *Strojírenské materiály.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02798-8.
5. **Kolář, Petr.** MM průmyslové spektrum. [Online] [Citace:3.3.2017]
<http://m.mmspektrum.com/clanek/uspesny-vyvoj-technologie-pro-zpracovani-termoplastovych-kompozitu>.
6. **Fortron.** *PPS for Thermoplastic Composites.* 2008. ISBN není uvedeno.
7. **Tencate.** *Cetex woven fabric thermoplastic composites.* 2012. ISBN není uvedeno.
8. **Wargny, Melchior De.** Differences PA11-PA12. [Online] 2016. [Citace: 1. 2. 2017.]
<https://www.sculpteo.com/blog/2016/06/22/differences-pa11-pa12/>.
9. **Resinex.** Polymerové typy. [Online] <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pa.html>.
10. **Sedláček, Jan.** Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů. *MM Průmyslové spektrum.* Měsíčník, 2006, Sv. 6, 060617.
11. **Sorrentino, L. a Turchetta, S.** *Milling of carbon fiber-reinforced plastics.* Cassino : Department of Mechanics, Structures and Environment University of Cassino, 2011. ISBN není uvedeno.
12. **Kříž, Antonín a Kožmín, Pavel.** *Tenké vrstvy na řezných nástrojích v aplikaci obrábění plastů.* Hradec nad Moravicí : autor neznámý, 2006. ISBN není uvedeno.
13. **Petr, Borovan.** Obrábět kompozity je umění. *Technicky týdeník.* 2013, 3.

14. **Kennametal.** *Composite machining guide*. ISBN není uvedeno.
15. **Mádl, Jan.** *Teorie obrábění*. Praha : Editační středisko ČVUT, 1989. ISBN není uvedeno.
16. **Mádl, Jan.** *Technologie obrábění*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02091-6.
17. **Pluhař Jaroslav, Koritta Josef.** *Strojírenské materiály*. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1982. ISBN není uvedeno.
18. **Teti, R.** *Machining of composite materials*. místo neznámé : University of Naples Federicco, 2003. ISBN není uvedeno.
19. **Mádl, Jan.** *Experimentální metody v teorii obrábění*. Praha : Editační středisko ČVUT, 1988. ISBN není uvedeno.
20. **Čep Robert, Petruš Jana.** *Experimentální metody v obrábění:učební text*. Ostrava : VŠB-TUO,Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011. ISBN 978-80-248-2533-5.
21. **Tepelné záření.** [Online] [Citace:1.6.2017.] <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/tepelne-zareni/>.
22. **Sova, Jan a Kovář, Jan.** Termokamery a pyrometr. *Automa - časopis pro automatizační techniku*. 2014, 2.
23. **Příručka termografie.** *Testo*. [Online] <http://termokamera.com/prirucka-termografie/>. ISBN není uvedeno.
24. **Raytek. Principles of Non-Contact Temperature Measurement.** [Online] 2003. [Citace:5.4.2017.] http://www.astro.queensu.ca/~irwin/phy372/y2015/IR_thermometer_details.pdf.
25. **Nakol.** Náradí nakol. [Online][Citace:28.11.2016.] <https://www.nakol.cz/upinky-kloubove-vertikalni-typ-s-u-pricnikem>.
26. **Termogram.** [Online] [Citace: 10.3.2017.] <http://www.termogram.cz/termovizni-kamera-flir-t640>.

27. Mašek, Petr. *Frézování FRTC materiálů.* Praha : Ústav výrobních strojů a zařízení, 2017. Číslo zprávy V-16-067.

28. Jiří, Anděl. *Matematická statistika.* Praha : SNTL, 1985. ISBN není uvedeno.

11. Přílohy

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 Uspořádání vláknové výztuže [4].....	12
Obrázek 2 Technologie zpracování FRTC materiálů, vpravo zpracování pomoc laseru, vlevo za pomoci lisování [5].....	13
Obrázek 3 Pracovní prostor stroje pokrytý třískami při obrábění G/PA12	17
Obrázek 4 Frézování za pomoci kompresní frézy zamezující separaci vrstev [14]	19
Obrázek 5 Vlevo optimalizovaný řez, vpravo spálená matrice [18].....	21
Obrázek 6 Schéma zapojení umělého termočlásku [20]	22
Obrázek 7 Schéma zapojení poloumělého termočlásku [20]	23
Obrázek 8 Schéma zapojení přirozeného termočlásku [20].....	23
Obrázek 9 Schéma zapojení termodua [20].....	24
Obrázek 10 Záření vstupující do kamery [23]	26
Obrázek 11 Upínka na zajištění destičky [25]	30
Obrázek 12 Přípravek s deskou na upnutí	30
Obrázek 13 Přípravek s upnutím pomocí mostu.....	31
Obrázek 14 MCFV 5050 LN	33
Obrázek 15 Vertikální seřizovací přístroj BMD 310.....	34
Obrázek 16 Nástroje použité při výrobě přípravku vrták HSS Ø6,8 mm, stopková fréza Iscar ECA-H4 Ø12 mm - -18/60C12CFR0, strojní závitník Narex M8 6H a vrták HSS Ø9 mm	34
Obrázek 17 Řezání závitu M8 do přípravku	35
Obrázek 18 Vyroběný přípravek pro upínání destiček pomocí mostu	35
Obrázek 19 Pracoviště	36
Obrázek 20 FLIR T640 [26]	37
Obrázek 21 Nástroj od firmy Gühring.....	38
Obrázek 22 Speciální nástroje s různým rezným úhlem.....	40
Obrázek 23 Nástroj Gühring a upnuté vzorky v přípravku	41
Obrázek 24 Záznam pořízený z měření	42
Obrázek 25 Graf vyhodnocování záznamu měření.....	42

Seznam použitých tabulek

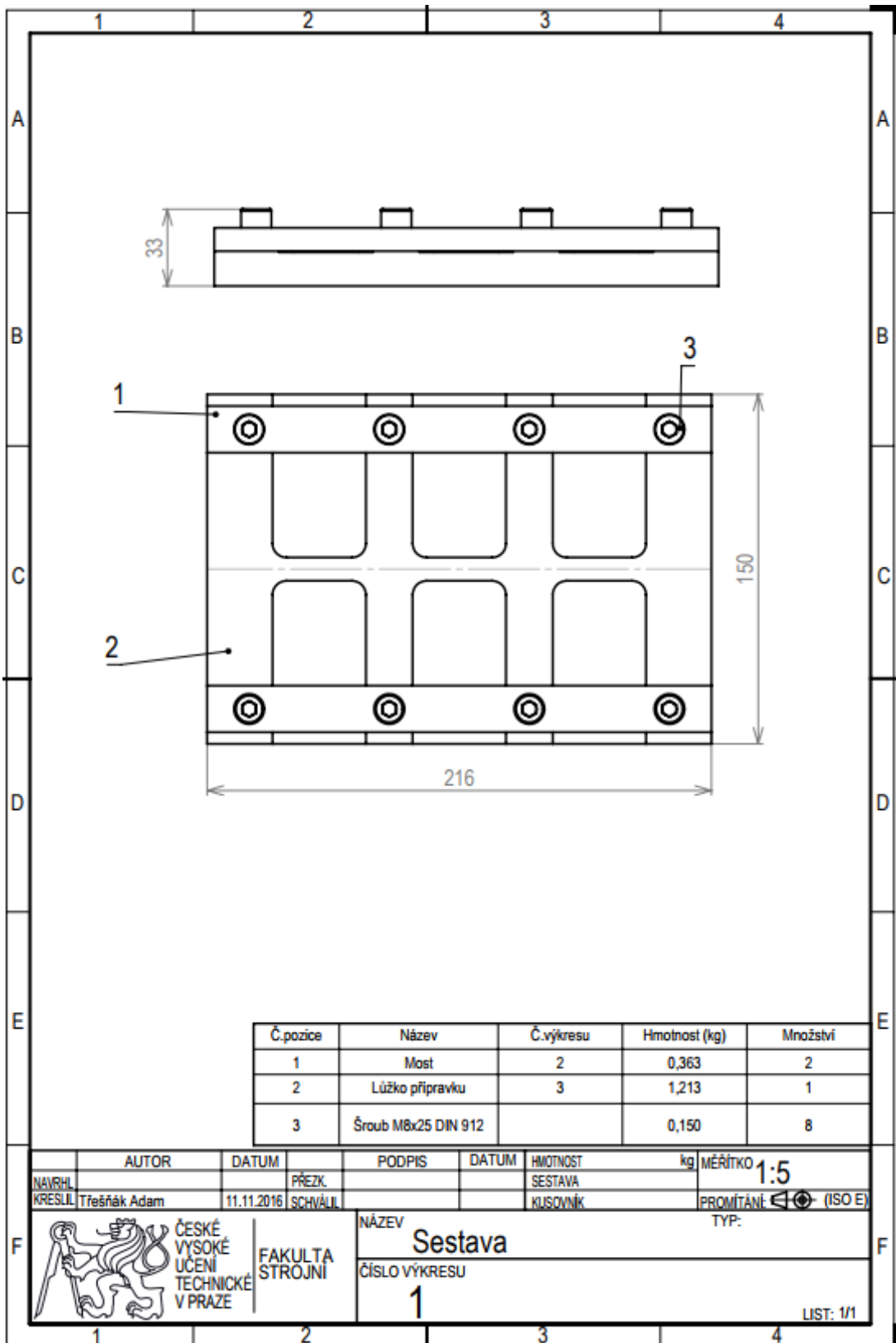
Tabulka 1 Fyzikální a mechanické vlastnosti C/PPS [7]	14
Tabulka 2 Fyzikální a mechanické vlastnosti G/PA12 [7]	16
Tabulka 3 Výrobní postup k výrobě lůžek přípravku	32
Tabulka 4 Výrobní postup výroby mostu	32
Tabulka 5 Parametry stroje MCFV 5050 LN	33
Tabulka 6 Technické parametry termokamery FLIR T640 [26]	37
Tabulka 7 Návrh experimentu statistická významnost řezných podmínek	39
Tabulka 8 Návrh experimentu závislost řezné rychlosti na teplotě	39
Tabulka 9 Řezné úhly speciálních nástrojů	39
Tabulka 10 Anova z programu Minitab pro materiál C/PPS v oblasti nástroje	44
Tabulka 11 Anova z programu Minitab pro materiál G/PA12 v oblasti nástroje.....	45
Tabulka 12 Anova z programu minitab pro materiál C/PPS v oblasti materiálu	46
Tabulka 13 Anova z programu minitab pro materiál G/PA12 v oblasti materiálu.....	46
Tabulka 14 Výsledků závislostí řezné rychlosti	50
Tabulka 15 Anova z programu Minitab u materiálu C/PPS v oblasti nástroje.....	50
Tabulka 16 Anova z programu Minitab u materiálu G/PA12 v oblasti nástroje	50
Tabulka 17 Anova z programu minitab u materiálu C/PPS v oblasti materiálu.....	52
Tabulka 18 Anova z programu minitab u materiálu G/PA12 v oblasti materiálu	52

Seznam použitých grafů

Graf 1 Průběh teploty v programu Excel	43
Graf 2 Středních hodnot pro hlavní faktory měřená v oblasti nástroje.....	45
Graf 3 Středních hodnot pro hlavní faktory v oblasti materiálu	46
Graf 4 Závislost řezné rychlosti na teplotě při $f_z=0,05\text{mm}$ u materiálu C/PPS	48
Graf 5 Závislost řezné rychlosti na teplotě při $f_z=0,05\text{mm}$ u materiálu G/PA12	48
Graf 6 Závislost řezné rychlosti na teplotě při $f_z=0,1\text{mm}$ u materiálu C/PPS	49
Graf 7 Závislost řezné rychlosti na teplotě při $f_z=0,1\text{mm}$ u materiálu G/PA12	49
Graf 8 Závislost úhlu čela speciálního nástroje na teplotě v oblasti nástroje.....	51
Graf 9 Závislost úhlu šroubovice speciálního nástroje na teplotě v oblasti nástroje.....	51
Graf 10 Závislost úhlu čela speciálního nástroje na teplotě v oblasti materiálu.....	53
Graf 11 Závislost úhlu šroubovice speciálního nástroje na teplotě v oblasti materiálu .	54
Graf 12 Opotřebení nástroje při měření experimentu významnosti řezných podmínek.	55
Graf 13 Opotřebení nástroje při měření experimentu závislosti řezné rychlosti	55

Seznam příloh

Příloha 1 Výkres přípravku.....	64
Příloha 2 Výkres mostu.....	65
Příloha 3 Výkres sestavy.....	66
Příloha 4 NC kód použitý pro výrobu přípravku	67
Příloha 5 NC kód použitý při výrobě mostu	68



Příloha 3 Výkres sestavy

```

;nastroj 12
;stroj MCFV 5050
;material obrobXu Dural 6063
;xapsicXX

N05 T1 D1
n07 G55
N10 M3 s6635
N15 G01 Z20 F4000
N20 G01 Y38.5 X-8
N25 G01 Z-0.7 F1858
N30 G01 X65
N35 G01 Y66.6
N40 G01 X0
N45 G01 Y47.5
N50 G01 X60
N55 G01 Y57.5
N60 G01 X0
N65 G01 Z20

N85 G01 Z20 F4000
N90 G01 Y98.5 X-8
N95 G01 Z-0.7 F1858
N100 G01 X65
N105 G01 Y126.6
N110 G01 X0
N115 G01 Y107.5
N120 G01 X60
N125 G01 Y117.5
N130 G01 X0
N135 G01 Z20

N160 G01 Z20 F4000
N165 G01 Y158.5 X-8
N170 G01 Z-0.7 F1858
N175 G01 X65
N180 G01 Y186.6
N185 G01 X0
N190 G01 Y167.5
N195 G01 X60
N200 G01 Y177.5
N205 G01 X0
N210 G01 Z20
m30

N230 G01 Z20 F4000
N235 G01 Y38.5 X158
N240 G01 Z-1.5 F1858
N245 G01 X85
N250 G01 Y66.6 |
N255 G01 X150
N260 G01 Y47.5
N265 G01 X90
N270 G01 Y57.5
N275 G01 X150
N280 G01 Z20

N300 G01 Z20 F4000
N305 G01 Y98.5 X158
N310 G01 Z-1.5 F1858
N315 G01 X85
N320 G01 Y126.6
N325 G01 X150
N330 G01 Y107.5
N335 G01 X90
N340 G01 Y117.5
N345 G01 X150
N350 G01 Z20

N370 G01 Z20 F4000
N375 G01 Y158.5 X158
N380 G01 Z-1.5 F1858
N385 G01 X85
N390 G01 Y186.6
N395 G01 X150
N400 G01 Y167.5
N405 G01 X90
N410 G01 Y177.5
N415 G01 X150
N420 G01 Z20
N425 M30

```

Příloha 4 NC kód použitý pro výrobu přípravku

```

;nastroj 9
;stroj MCFV 5050
;material obrobku ocel
;most

N10 T6 D1
N12 G56
N15 M3 S530
N17 M8
N20 G01 Y13.45 X10 Z20 F1000
N30 G01 Z-4 F53
N40 G01 Z10
N50 G01 Z-8
N60 G01 Z10
N70 G01 Z-13
N80 G01 Z10
N80 G01 Y80.2 X10 F1000
N90 G01 z-4 F53
N100 G01 Z10
N110 G01 z-8
N120 G01 Z10
N130 G01 Z-13
N140 G01 Z10
N150 G01 Y140.2 X10 F1000
N160 G01 Z-4 F53
N170 G01 Z10
N180 G01 Z-8
N190 G01 Z10
N200 G01 Z-13
N210 G01 Z10
N220 G01 Y206.95 X10 F1000
N230 G01 Z-4 F53
N240 G01 Z10
N250 G01 Z-8
N260 G01 Z10
N270 G01 Z-13
N280 G01 Z10
n290 M30

```

Příloha 5 NC kód použitý při výrobě mostu