

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



**Soustružení kompozitního materiálu
s termoplastickou matricí**

Diplomová práce

Bc. Michal Bucko

Praha, 2019

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bucko** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **434242**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Soustružení kompozitního materiálu s termoplastickou maticí

Název diplomové práce anglicky:

Turning of fibre reinforced thermoplastic composite

Pokyny pro vypracování:

Vlákný vyztužené kompozity s termoplastickou maticí
Experimentální metody měření sil a teplot při obrábění
Vlastní experiment pro stanovení vlivu pracovních podmínek na silové a teplotní jevy pro vybraný materiál
Zhodnocení dosažených výsledků

Seznam doporučené literatury:

Mádl, J.: Teorie obrábění, Skripta, ČVUT v Praze
Mádl, J.: Experimentální metody v teorii obrábění, Skripta, ČVUT v Praze

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

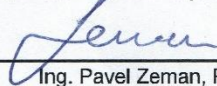
Ing. Pavel Zeman, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____



Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry




prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

25.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Poděkování

Touto cestou bych chtěl v první řadě poděkovat vedoucímu diplomové práce za jeho odborné rady a vedení při tvorbě této práce. Dále bych chtěl velice poděkovat kolegovi Ing. Petru Maškovi, PhD., za jeho cenné rady a pomoc při realizaci experimentů. Poděkování patří i mým rodičům a přítelkyni Marcelle Maternové za velkou podporu během studia a psaní této práce.

Tato práce vznikla za podpory projektu Centrum pokročilých leteckých technologií reg. č.: CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000826 financovaného z ESIF, OP VVV, Fakulty strojní, ČVUT v Praze.

Prohlášení

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

V Praze dne.....

Podpis.....

Abstrakt

Tato práce se zabývá možnostmi měření teploty řezání při soustružení polymerního materiálu PEEK s vyztužujícími uhlíkovými vlákny pomocí přirozeného termočlásku a vlivem řezných parametrů na velikost sil řezání při soustružení stejného materiálu.

Práce je rozdělena na dvě části, a to rešeršní část a vlastní experiment. V rešeršní části je popsán obecný úvod do problematiky obrábění, metodika měření sil a teplot při soustružení a současný stav na poli obrábění kompozitních materiálů. Experimentální část je zaměřena na konstrukci a ověření funkce přirozeného termočlásku při soustružení polymerního materiálu PEEK s vyztužujícími uhlíkovými vlákny a na konkrétní experiment měření sil při soustružení stejného materiálu.

Klíčová slova:

kompozitní materiál, PEEK, soustružení, síla, teplota

Abstract

This paper deals with the possibilities of measuring the cutting temperature of PEEK carbon fiber reinforced material using a natural thermocouple and the influence of cutting parameters on the cutting forces of the same composite materials.

The thesis is divided into two parts, namely the research section and the experiment itself. The research part describes the general introduction to machining, methodology of measurement of forces and temperatures during turning and current state in the field of machining of composite materials. The experimental part is focused on the construction and verification of the function of the natural thermocouple during the turning of PEEK polymer material with reinforcing carbon fibers and on the concrete force measurement experiment during the turning of the same material.

Keywords:

composites, PEEK, turning, force, temperature

Tabulka použitých symbolů

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Význam</i>
A_D	mm^2	plocha odřezávané vrstvy
a_p	mm	hloubka řezu
a_t	mm	tloušťka odřezávané třísky
C_{F_c}	-	konstanta vyjadřující vliv materiálu na velikost řezné síly
C_Θ	-	konstanta vyjadřující vliv materiálu na velikost teploty řezání
f	mm/ot	posuv
F	N	celková síla řezání
F_c	N	řezná síla
F_f	N	síla posuvu
F_p	N	pasivní síla
K_c	N/mm^2	měrná řezná síla
k_p	-	piezoelektrická konstanta
n	ot/min	počet otáček za minutu
P_c	W	řezný výkon
PA	-	polyamid
PEEK	-	polyetereterketon
PEEK-CF30	-	polyetereterketon s 30 % uhlíkových vláken
Q	C	elektrický náboj
Q_c	J	celkové teplo při obrábění
Q_n	J	teplo odváděné nástrojem
Q_o	J	teplo odváděné obrobkem
Q_p	J	teplo odváděné prostředím
Q_t	J	teplo odváděné třískou
R	N	řezný odpor

v_c	m/min	řezná rychlost
v_t	m/min	rychlost odchodu třísky
x_{Fc}, y_{Fc}	-	empirické konstanty
$x_\Theta, y_\Theta, z_\Theta$	-	empirické konstanty
β	°	úhel břitu
γ	°	úhel čela břitu
η	-	účinnost elektromotoru
κ_r	°	úhel nastavení hlavního ostří
Θ	°C	teplota řezání
ω	°	úhel působení celkové síly řezání
Ω	Rad	úhel působení řezné síly

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Kompozitní materiály	12
2.1	Druhy matrice	12
2.1.1	Kovová matrice	12
2.1.2	Keramická matrice	13
2.1.3	Polymerní matrice	13
2.2	Druhy výztuže	14
2.2.1	Uhlíková vlákna	14
2.2.2	Skleněná vlákna.....	15
2.2.3	Další typy vláken.....	16
2.3	Výroba kompozitních materiálů.....	16
2.3.1	Ruční kladení.....	16
2.3.2	Stříkání	17
2.3.3	Lisování	18
2.3.4	Navíjení	18
2.3.5	Tažení (pultruze)	19
3	Mechanika obrábění.....	21
3.1	Vznik a tvorba třísky.....	21
3.2	Síly při obrábění.....	23
3.2.1	Rozložení sil při soustružení	24
3.2.2	Vliv pracovních podmínek na velikost sil při soustružení	25
3.2.3	Měrný řezný odpor	27
3.3	Teplo a teplota při obrábění	27
3.3.1	Vznik tepla při obrábění	27

3.3.2	Vliv pracovních podmínek na velikost tepla při soustružení	28
3.3.3	Odvod tepla při obrábění	29
3.3.4	Teplota řezání	30
4	Možnosti monitorování obráběcího procesu	31
4.1	Měření sil v obrábění	31
4.1.1	Přímé metody měření sil	31
4.1.2	Nepřímé měření sil	33
4.2	Měření teplot při obrábění	34
4.2.1	Termočlánky	35
4.2.2	Termistory	39
4.2.3	Indikační materiály	39
4.2.4	Pyrometry	40
4.2.5	Termokamery	40
4.3	Zkušenosti s použitím přirozeného termočlánku	41
5	Obrobitelnost kompozitních materiálů soustružením	44
5.1	Zkušenosti se soustružením kompozitních materiálů s polymerní matricí	44
5.2	Shrnutí	46
6	Vlastní experiment	47
6.1	Použité strojní a přístrojové vybavení	47
6.1.1	Stroj	47
6.1.2	Řezný nástroj	48
6.1.3	Měřicí a záznamová zařízení	50
6.1.4	Pomocné přípravky	55
6.2	Obráběný materiál	57
6.3	Kalibrace přirozeného termočlánku	58
6.4	Experiment zkoumající teplotní jevy	60

6.4.1	Návrh experimentu	61
6.4.2	Průběh měření	62
6.4.3	Zpracování dat experimentu	65
6.4.4	Vyhodnocení experimentu	66
6.4.5	Shrnutí	68
6.5	Experiment zkoumající silové jevy	69
6.5.1	Návrh experimentu	70
6.5.2	Průběh měření	70
6.5.3	Zpracování dat experimentu	70
6.5.4	Vyhodnocení dat experimentu	72
6.5.5	Výpočet měrného řezného odporu	77
6.5.6	Shrnutí	78
7	Závěr	80
8	Citovaná literatura	82
9	Seznam obrázků	88
10	Seznam tabulek	91

1 Úvod

Kompozitní materiály zažívají v dnešní době ve strojírenství značný rozmach. Jedná se o velice perspektivní skupinu materiálů, které nacházejí stále větší uplatnění v oborech jako je letectví, kosmonautika, ale třeba i automobilový průmysl. Díky kombinaci různých vláknových či částicových výztuží s matricí tvořenou nejčastěji polymerními materiály jsou tyto materiály velice lehké, a přitom mají dobré mechanické vlastnosti. Na druhou stranu právě existence vyztužujících vláken v kompozitech velice ztěžuje možnosti použití, neboť velká část výrobků z těchto materiálů musí splňovat rozměrové a tvarové požadavky, kterých je nutné dosáhnout obráběním.

Právě obrábění materiálů obsahujících vyztužující vlákna je velice komplikované, a to hned z několika důvodů. V první řadě jde o správnou volbu geometrie břitu řezného nástroje, protože dílce z kompozitních materiálů jsou většinou vyráběny po vrstvách, a může se tak stát, že nevhodnou geometrií by se mohly jednotlivé vrstvy od sebe oddělovat, což by mělo za následek znehodnocení povrchu a vznik otřepů. Dále je nutné správně zvolit řezný materiál, protože nevhodně zvolený řezný materiál nástroje se bude nadměrně rychle opotřebovávat a celý obráběcí proces bude velice neekonomický. V neposlední řadě je nutné vhodně zvolit řezné podmínky. Při použití nepřiměřeně vysokých řezných podmínek může docházet ke znehodnocování polymerní matrice vlivem vysokých teplot vznikajících během obrábění. Vysoká teplota může mít za následek i poškozování obrobeneho povrchu, či dokonce deformaci celého dílce. Tato rizika nejsou ale jediná, která mohou při obrábění kompozitních materiálů vznikat, jsou však o to zásadnější, neboť tyto materiály mají velmi nízkou tepelnou vodivost a kvůli nasákavosti některých druhů matric nelze ani použít procesní kapaliny pro snížení teploty řezání. Z těchto důvodů je důležité se věnovat výzkumu v oblasti obrábění kompozitních materiálů.

Tato práce se proto věnuje měření závislosti řezných podmínek na velikosti teploty řezání a na velikosti sil při soustružení polymerního materiálu PEEK s výztuží ve formě uhlíkových vláken s obchodním označením T300. Dále se práce zabývá konstrukcí přirozeného termočlánu, který bude pro měření teploty řezání použit, a ověřením jeho funkčnosti.

2 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou heterogenní materiály složené z minimálně dvou různých složek, a to výztuže a matrice. Obě složky mají svoje specifické uplatnění. Zatímco výztuž ve formě dlouhých či krátkých vláken, případně částic zvyšuje pevnost a houževnatost materiálu, matrice slouží jako spojovací materiál výztuže zajišťující ochranu vláken před vnějšími vlivy, pomáhá distribuovat napětí a zajišťuje tvarovatelnost výsledného produktu. Na výrobu matrice se používají polymerní, kovové nebo například keramické materiály. Ve strojírenství se nejčastěji uplatňují kompozity na bázi polymerní matrice a uhlíkových či skleněných vláken. Dalšími materiály výztuže mohou být například čedičová nebo aramidová vlákna. Dále mohou kompozity obsahovat různé přísady upravující konkrétní vlastnosti, například mohou zvyšovat samozhášivost materiálu a podobně. Ovšem vzhledem k zaměření této diplomové práce budou pod pojmem kompozitní materiály myšleny převážně kompozity složené z polymerní matrice a výztuže ve formě vláken. (1) (2) (3)

Kompozity nejsou, jak by se mohlo zdát, výdobytkem současnosti. Už v dávné historii používalo lidstvo materiály, které lze označit jako kompozitní, tedy materiály složené ze dvou a více složek, kdy jedna má funkci výplně a druhá funkci výztuže. Příkladem může být směs jílovité hlíny a slámy, kterou používali stavitelé už v pravěku. (4) (5)

2.1 Druhy matrice

Pro kompozitní materiály jsou nejběžněji používány tři druhy matrice: kovová, keramická a polymerní. V oblasti strojírenství je z těchto matric nejčastěji využívána matrice polymerní, a to především díky její nízké hmotnosti a relativně nízkým nákladům na zpracování. (2) (3)

2.1.1 Kovová matrice

Kovové matrice se nejvíce vyznačují dobrou tvárností a houževnatostí, jejich výhodou oproti polymerním matricím je také dobrá elektrická a tepelná vodivost, nehořlavost a vyšší tepelná odolnost. Aby byla zachována nízká měrná hmotnost, používají se nejčastěji lehké slitiny hliníku, hořčíku a titanu, pro specifické oblasti se ale používají

i jiné kovové matrice, například niklové slitiny pro vysokoteplotní aplikace, nebo měděné, případně stříbrné matrice pro použití v elektrotechnice. (2) (3)

2.1.2 Keramická matrice

Matrice z keramiky jsou velice tvrdé, lehké, ale také velmi křehké. Používají se převážně ve vysokoteplotních aplikacích. V kompozitech lze narazit na keramiku oxidické i neoxidické povahy. Příkladem oxidické keramické matrice může být oxid hlinitý, oxid zirkoničitý apod. Příkladem neoxidické keramické matrice je například oxid křemičitý, nebo nitrid křemíku. (2) (3)

2.1.3 Polymerní matrice

Ve snaze dosáhnout co nejnižší měrné hmotnosti se v dnešní době často používají jako materiál matrice polymery, a to jak termoplasty, tak i termosety. Právě z důvodu nízké měrné hmotnosti jsou kompozity s touto matricí často využívány v letectví, jejich nevýhodou je ale nízká tepelná stabilita. Z termoplastických materiálů se nejčastěji používají materiály jako polyetereterketon nebo polyamid, z termosetických jsou to hlavně epoxidové pryskyřice. (2) (3)

Polyetereterketon – PEEK

V oblasti termoplastických matric se jedná o jedny z teplotně nejodolnějších materiálů. Dílce z těchto semikrystalických polymerů je totiž možné nepřetržitě používat až do teplot +260 °C, a to i v prostředí s párou. Bod tavení tohoto materiálu je totiž až v oblasti kolem +340 °C. Jeho další výhodou je odolnost vůči širokému spektru rozpouštědel a organických látek. Díky těmto svým vlastnostem je často používán na výrobu dílců v letectví, vesmírném průmyslu a v medicíně jako součást lékařské techniky. (6)

Polyamid – PA

Jedná se o polykrystalický polymer s vynikajícími mechanickými vlastnostmi, především pak vysokou odolností vůči opotřebení a nízkému koeficientu tření, díky čemuž je využíván především na výrobu kluzných ložisek, ozubených kol, vodicích lišt a podobně. Jeho nevýhodou oproti polymeru PEEK je nižší teplota tavení kolem +220 °C v závislosti na modifikaci. (7)

Epoxidové pryskyřice

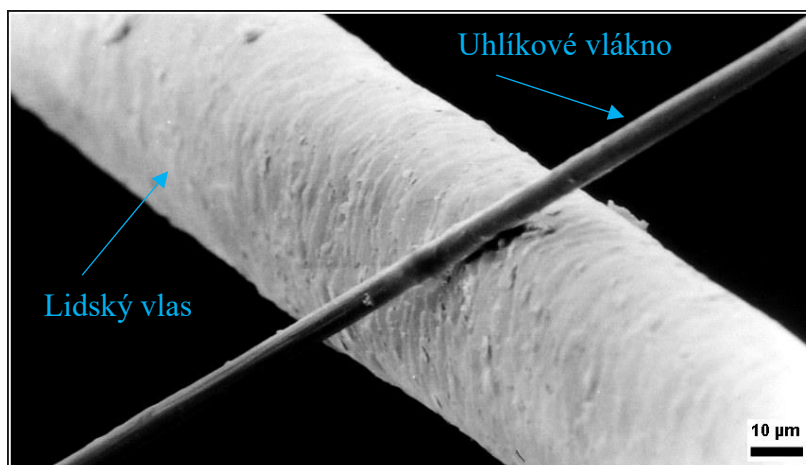
Jedná se o polymery řazené do skupiny termosetů, též zvaných reaktoplasty. Výroba těchto materiálů spočívá v chemickém vytvrzení, nikoliv v tepelném zpracování, jako je tomu u termoplastů. Výhodou těchto materiálů oproti termoplastům je hlavně dobrá tepelná odolnost, dále tvarová stálost a chemická odolnost. (8)

2.2 Druhy výztuže

V kompozitních materiálech se používá mnoho druhů vyztužujících vláken o různých rozměrech. Nejmenších rozměrů dosahují nanokompozitní materiály, ve kterých vlákna mají průměr kolem 100 nm. Ve strojírenství se ovšem tyto nanokompozity tolik nepoužívají. Mnohem používanější skupinou jsou tzv. mikrokompozity, kde se, jak již název napovídá, vyskytují vlákna o průměru v řádu desítek až stovek mikrometrů. Dále existují ještě makrokompozity, obsahující vlákna o průměru v řádech jednotek až stovek milimetrů; tyto kompozity jsou ale využívány spíše ve stavebnictví. Jedná se například o ocelové tyče vyztužující betonové desky. Dále je také možné dělit výztuže podle tvaru na částicové a vláknové. Právě vláknové výztuže jsou ve strojírenských aplikacích nejčastěji využívány, ať už ve formě tkanin, nebo rovingů, což jsou vlákna dodávaná na cívkách. Vláknové výztuže mohou být například uhlíkové, skleněné, bórové, aramidové a další. (9)

2.2.1 Uhlíková vlákna

Jedná se o vysokopevnostní krystalická vlákna s vysokou tuhostí a koroziivzdorností, která mají obvykle průměr kolem 8 μm , viz Obr. 1. Výhodou těchto vláken je také tepelná a elektrická vodivost, díky čemuž lze při měření teplot při obrábění aplikovat přirozený termočlánek. Jejich výroba je poměrně technologicky složitá, spočívá v pyrolýze polyakrylonitrilových vláken, na niž navazuje grafitizace v inertní atmosféře za teplot 1000–3000 °C. Další možností je výroba z dehtové smoly. (10) (11)



Obr. 1 Uhlíkové vlákno v porovnání s lidským vlasem (12)

2.2.2 Skleněná vlákna

Jedná se o materiály obsahující sloučeniny oxid křemičitý, oxid hlinitý, oxid vápenatý nebo oxid hořečnatý. Z těchto sloučenin jsou vlákna vyráběna rychlým tažením z taveniny, nejčastěji z bezalkalických skel, zvaných též E-skla. Tato vlákna se hojně používají jako zpevňující vlákna konstrukčních materiálů lodí, letadel, automobilů i sportovního náčiní. Výhodou těchto vláken je relativně nízká cena oproti jiným typům vláken. Ukázku těchto vláken vidíme na Obr. 2. (13)



Obr. 2 Ukázka tkaniny ze skleněných vláken (14)

2.2.3 Další typy vláken

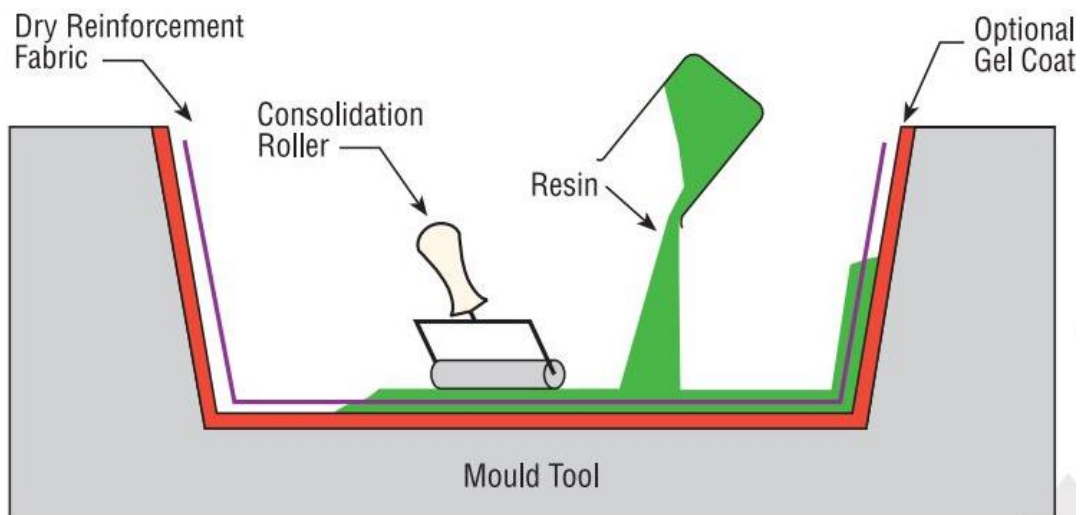
Dalšími ve strojírenství méně používanými typy vláken jsou vlákna aramidová, která jsou ze všech používaných vláken nejlehčí (používají se hlavně do neprůstřelných vest), dále vlákna čedičová, využívaná hlavně ve stavebnictví na tepelně a zvukově izolační desky, nebo bórová vlákna, jejichž výhodou je relativně vysoká odolnost vůči tlaku (proto jsou využívána pro zpevnění konců tlakem namáhaných prvků). (2) (9) (10)

2.3 Výroba kompozitních materiálů

Technologií, jak lze vyrábět polotovary či celé díly z kompozitních materiálů, je velmi mnoho a jejich popis by byl velice zdouhavý, proto zde budou popsány pouze některé základní metody výroby těchto polotovarů. Základních metod výroby je v zásadě pět: ruční kladení, stříkání, lisování, navíjení a tažení neboli pultruze. (15)

2.3.1 Ruční kladení

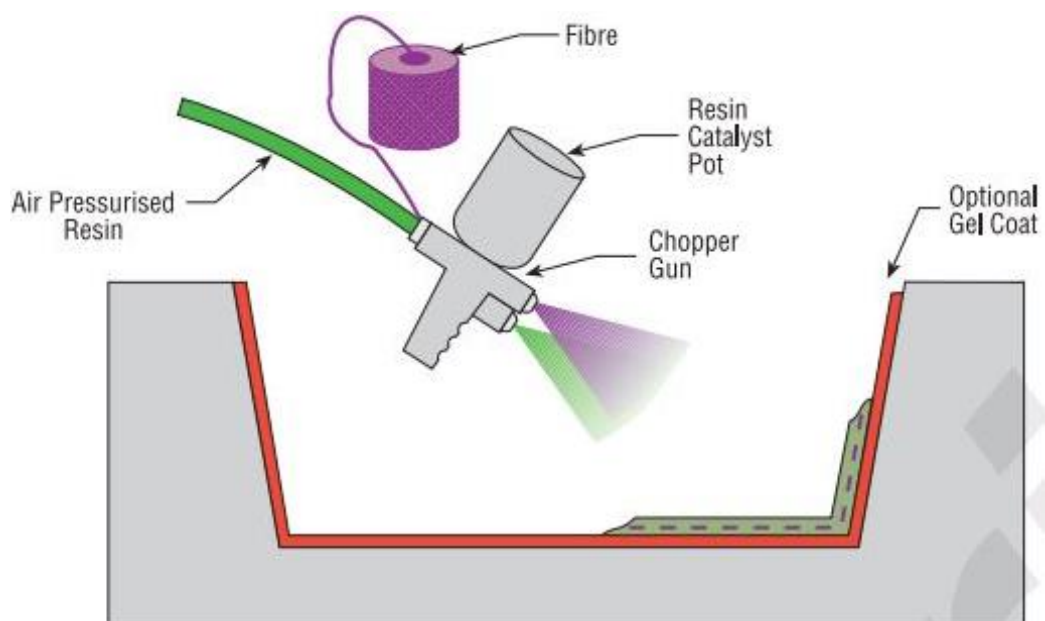
Ruční kladení je nejstarší metoda výroby, kdy je pryskyřice spolu s vyztužujícími vlákny kladena do formy. Forma může být konkávního i konvexního typu, neboli dutá i vypouklá. Kvalita výsledného povrchu kompozitu se odvíjí od kvality povrchu použité formy. Po kladení materiálu do formy je nutné nechat ho vytvrdit. Výhody této metody jsou jednoduchost výroby, možnost tvorby velkých a tvarově složitějších dílců (lodě, skladovací nádrže, bazény) a malé náklady na nástroje. Naopak nevýhodou je jednoznačně nízká možnost reprodukovatelnosti výroby a vysoké náklady na lidskou práci. Ruční kladení do konkávní formy zachycuje Obr. 3. (16)



Obr. 3 Ukázka výroby dílců ručním kladením (15)

2.3.2 Stříkání

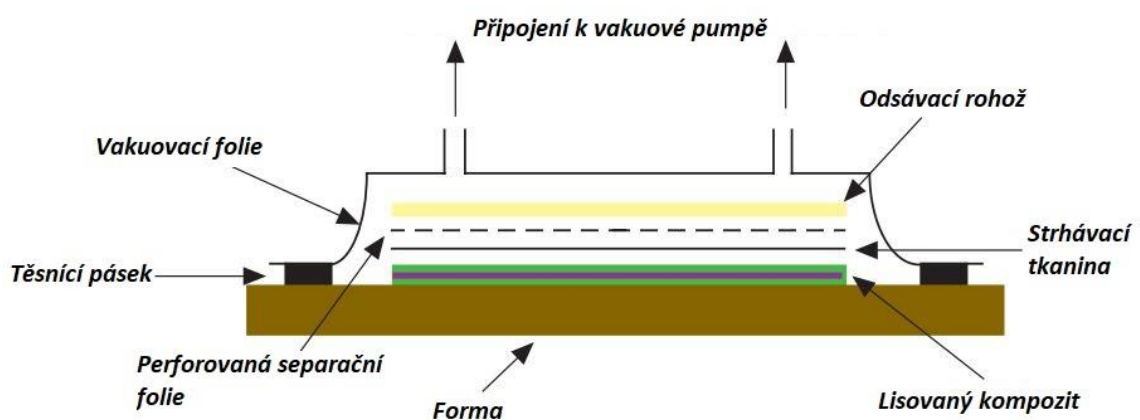
Tato metoda výroby je velice podobná technologii ručního kladení jen s tím rozdílem, že materiál obsahující krátká vlákna či částice je nanášen pomocí stříkací pistole, v níž rovnou dochází k promísení pryskyřice s vytvrzovacím katalyzátorem. Vzhledem k způsobu nanášení je nutné, aby vyztužující vlákna byla krátká, nejčastěji se používají skleněná. Výhodou této metody jsou stále nízké výrobní náklady, jelikož pistole může být ovládána i průmyslovým robotem, což ušetří náklady za ruční práci. Metoda stříkání je znázorněna na Obr. 4. (15)



Obr. 4 Ukázka výroby dílců nástřikem (15)

2.3.3 Lisování

Technologie lisování je v průmyslu velice často používaná pro výrobu kompozitních dílců, využívá se hlavně v oblasti kosmického, leteckého a automobilového průmyslu. Lisování probíhá za studena, za tepla, pomocí vakua a formou výroby v autoklávu. Na rozdíl od technologie ručního kladení a nástřiku, kde lze dosáhnout kvalitní plochy pouze na jedné straně výrobku, je výhodou těchto metod velmi dobrá kvalita povrchu na obou stranách výrobku. Vyráběné dílce mají též velice dobré mechanické vlastnosti, avšak jejich nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady na strojní vybavení. Jednu z metod lisování, konkrétně lisování pomocí vakua, lze vidět na Obr. 5. (15)



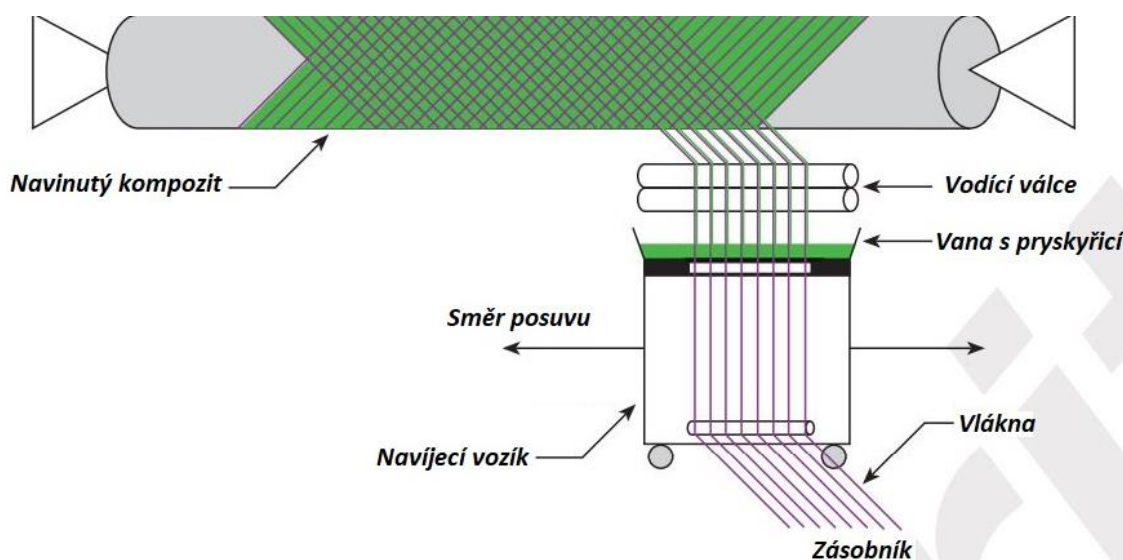
Obr. 5 Výroba lisováním ve vakuu (15)

2.3.4 Navíjení

Technologií navíjení jsou vyráběny především rotační součásti, jako potrubí, nádrže, nádoby a podobně. Výroba probíhá tak, že výztuž ve formě dlouhých spojitých vláken, tzv. rovingů (ukázka rovingů je na Obr. 6) je ze zásobníku protahována skrz vanu s tekutou matricí, nejčastěji pryskyřicí. Takto vzniklá směs prochází vodicími válci a je navíjena na jádro. To může být opatřeno drážkováním pro lepší přilnavost. Úhel, pod nímž je kompozit navíjen, je závislý na rychlosti navíjecího vozíku. Proces navíjení kompozitu je zachycen na Obr. 7. (15)



Obr. 6 Ukázka dlouhých vláken neboli rovingů (17)

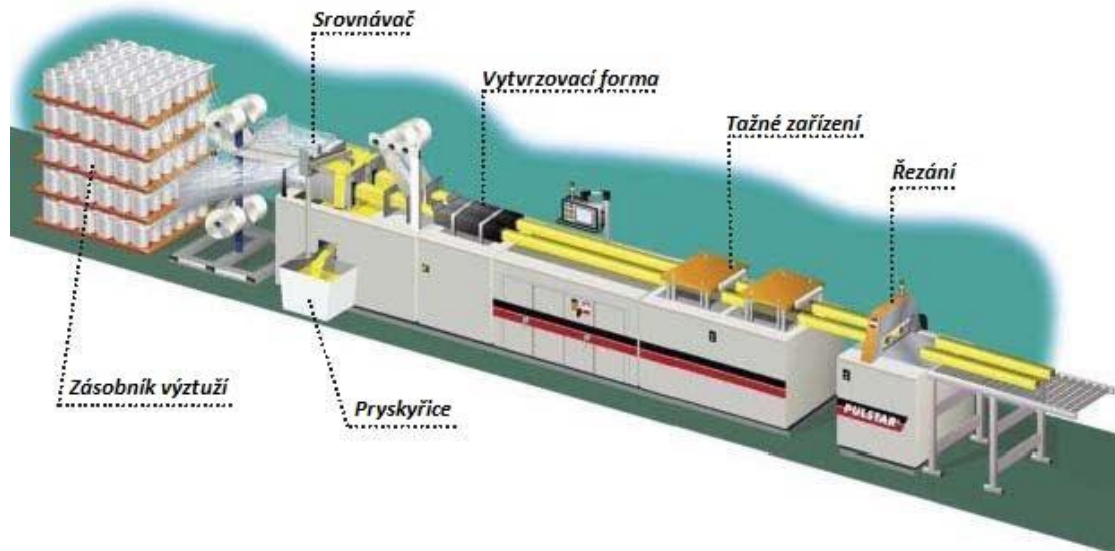


Obr. 7 Ukázka technologie navíjení kompozitu (15)

2.3.5 Tažení (pultruze)

Tato metoda, jak název napovídá, spočívá v kontinuálním tažení tyčových polotovarů různých tvarů přes vyhřívanou ocelovou formu pomocí tažného zařízení. Vyztužující vlákna, nejčastěji rovingy nebo plošné rohože vyrobené ze skelného vlákna, vstupují do srovnávače, kde dojde k rovnoměrnému rozmístění rovingů, případně správnému umístění rohoží. Dále se takto srovnaná vlákna smáčí ve směsi pryskyřice a dalších plniv

a tvarují se do výsledné podoby. Takto vytvarovaný materiál vstupuje do vytvrzovací komory, kde probíhá termosetická reakce. Po této reakci dochází už pouze k řezání na příslušnou délku. Celý proces je patrný z Obr. 8. (18)



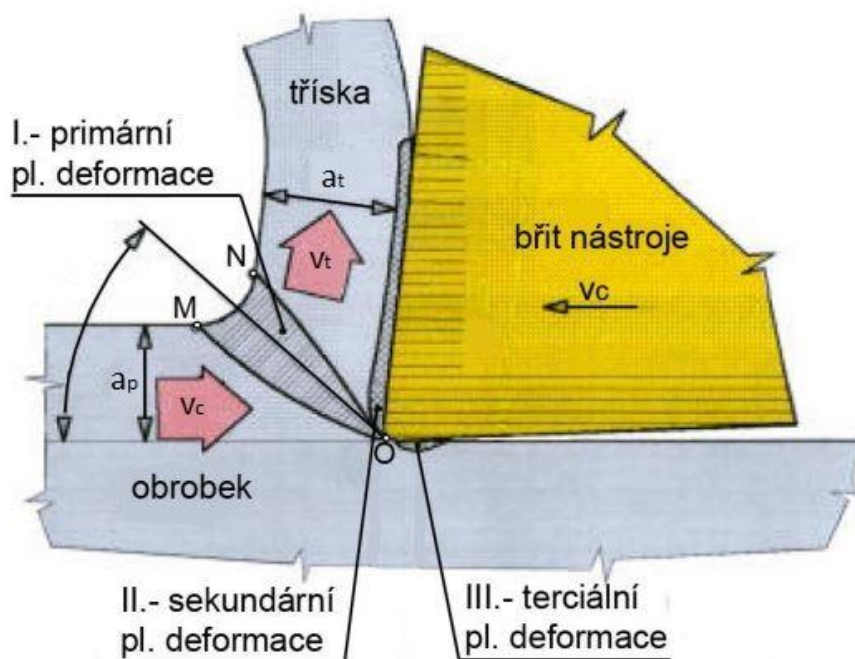
Obr. 8 Ukázka procesu pultruze (18)

3 Mechanika obrábění

Obrábění je technologický proces, při němž dochází k vytváření nových ploch součástí dané jakosti, daných rozměrů a tvarů pomocí odebrání přebytečného materiálu z polotovaru až po finální tvar výrobku. K odebrání materiálu dochází pomocí relativního pohybu mezi obrobkem a obráběcím nástrojem, kde břit řezného nástroje je při tomto pohybu silovým působením vtačen do materiálu. Produktem tohoto silového působení je vznik tepla a odpadního materiálu ve formě třísek. (19) (20) (21)

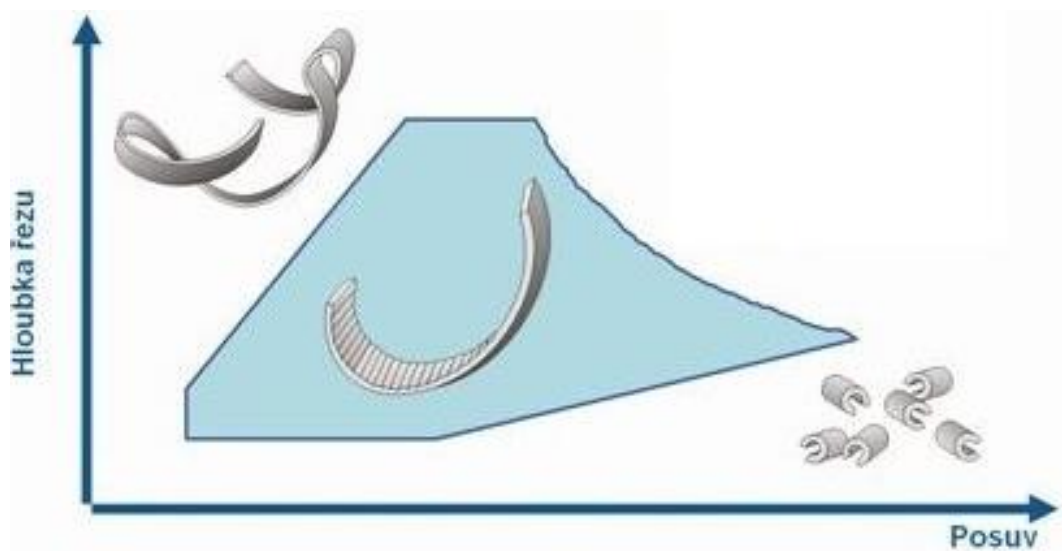
3.1 Vznik a tvorba třísky

Jak již bylo řečeno výše, tříška vzniká při odebrání přebytečného materiálu z obrobku řezným nástrojem. U většiny technických materiálů dochází při odřezávání třísky k plastické deformaci ve třech oblastech, a to v oblasti primární, sekundární a terciální plastické deformace, viz Obr. 9. Výjimku ovšem tvoří některé materiály, které se při odřezávání plasticky nedeformují, vzniká tedy tříška netvářená. Klasickým příkladem materiálů s netvářenou třískou je keramika, dřevo nebo horniny. Třísky tvářené, tedy ty, u kterých probíhá plastická deformace, se dělí podle tvaru na třísky elementární a soudržné. Třísky soudržné se dále dělí na plynulé a článkovité třísky. (22) (23)



Obr. 9 Oblast primární plastické deformace (24)

To, jaký tvar třísky vznikne, je dáno mnoha aspekty. V první řadě je tvorba třísek ovlivněna chemickými a fyzikálními vlastnostmi obráběného materiálu, například chemickým složením, stavbou krystalové mřížky nebo stavem napjatosti materiálu obrobku. Dále je tvorba třísek ovlivněna geometrií řezného nástroje, hlavně pak úhlem čela γ a tvarem utvařeče na čele nástroje. V neposlední řadě má na tvar třísek velký vliv volba procesních parametrů, kam patří například volba způsobu chlazení nebo volba řezných podmínek, především pak hloubka řezu a_p a posuv f . Doporučenou volbu těchto řezných parametrů poskytuje velké množství výrobců ke svým nástrojům ve formě návodného grafu oblasti vhodného utváření třísek. Příklad takového grafu je znázorněn na Obr. 10. Přehled základních tvarů třísek a jejich rozdělení podle jejich vhodnosti představuje Obr. 11. (23) (25) (26)



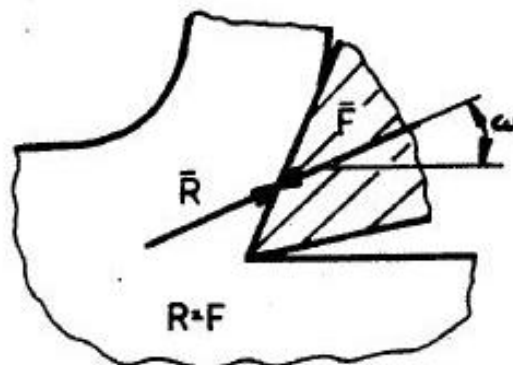
Obr. 10 Příklad oblasti vhodného utváření třísky (27)

páskové třísky	smotané třísky	dlouhé šroubovitě třísky	
nevýhodné			
krátké šroubovitě válcové třísky	krátké šroubovitě kuželové třísky	spirálové třísky	drobivé třísky
výhodné			

Obr. 11 Přehled vhodnosti utváření třísek (28)

3.2 Síly při obrábění

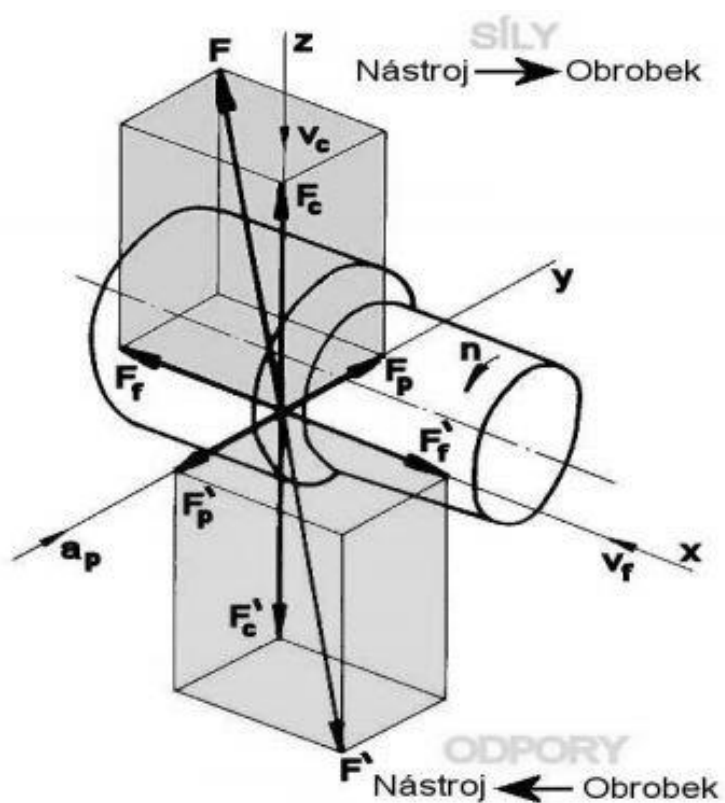
Při vnikání nástroje do obrobku klade obráběný materiál řeznému nástroji odpor, který brání vzniku třísky. Tento odpor se nazývá řezný odpor a značí se písmenem R . Aby došlo k odříznutí materiálu, musí být tento řezný odpor překonán celkovou silou řezání F , která působí proti tomuto řeznému odporu R pod úhlem ω , viz Obr. 12. (22)



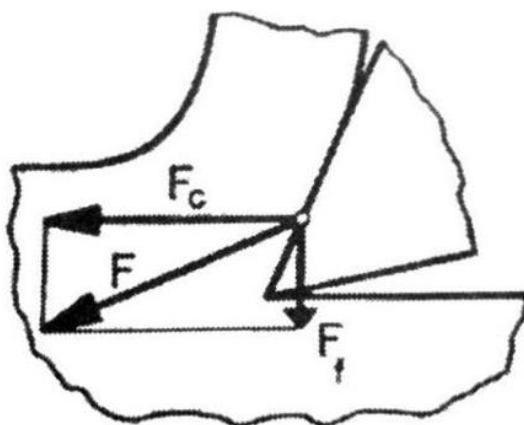
Obr. 12 Působení síly řezání F proti řeznému odporu R při ortogonálním řezání (22)

3.2.1 Rozložení sil při soustružení

Celkovou sílu F vznikající při obrábění lze rozdělit do dvou, resp. tří složek podle toho, zda se jedná o řezání volné, jinak řečeno ortogonální, nebo o řezání vázané neboli obecné. U vázaného řezání se jedná o sílu řeznou F_c , sílu pasivní F_p a sílu posuvu F_f . Toto rozdělení sil je znázorněno na Obr. 13. Volné řezání se oproti vázanému liší pouze v absenci pasivní síly, neboť zde dochází pouze k radiálnímu pohybu nástroje, viz Obr. 14. (29) (30)



Obr. 13 Rozložení sil při vázaném řezání (30)



Obr. 14 Rozložení sil při volném řezání (29)

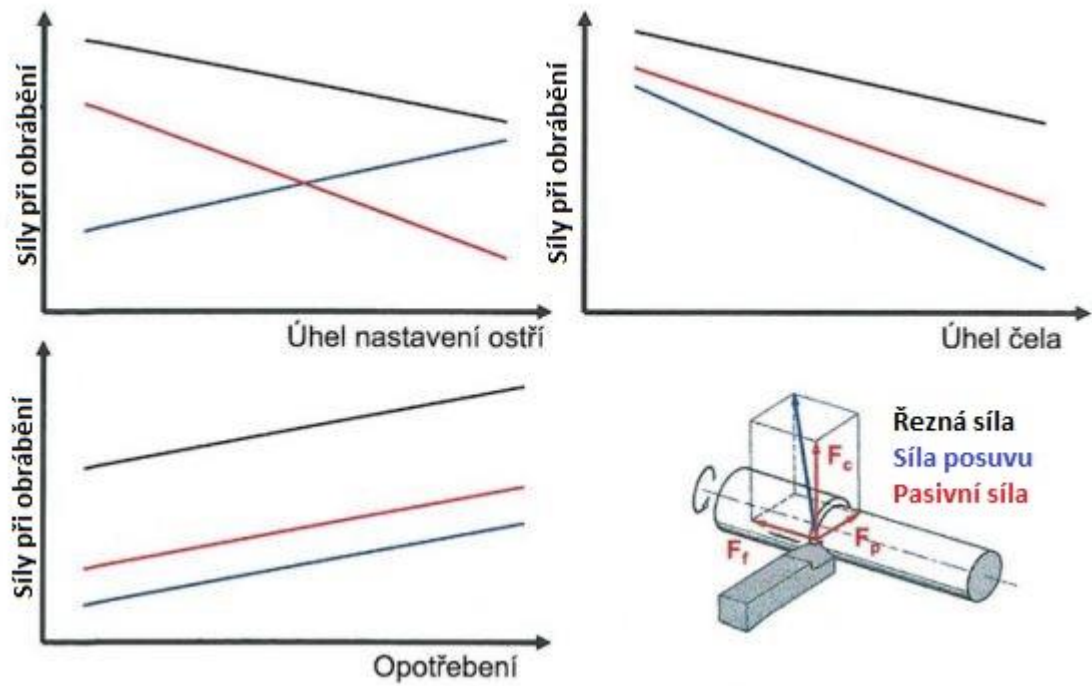
3.2.2 Vliv pracovních podmínek na velikost sil při soustružení

Na velikost celkové síly řezání mají největší vliv tři faktory, jsou jimi materiál obrobku, geometrie břitu nástroje a řezné podmínky včetně řezného prostředí. Co se týče materiálu obrobku, největší roli pro velikost řezných sil hraje tvrdost a pevnost obráběného materiálu, protože čím vyšší je tvrdost, případně pevnost materiálu, tím více brání vniknutí cizího tělesa, tedy řezného nástroje. Dalším velice významným faktorem je, jak již bylo zmíněno výše, geometrie břitu nástroje, z čehož největší význam má úhel nastavení ostří κ_r a úhel čela γ . Svůj podíl na velikosti řezných sil má také opotřebení nástroje. Vliv těchto prvků geometrie břitu nástroje přehledně zachycuje Obr. 15. V případě řezných podmínek má největší vliv na velikost řezných sil posuv, následovaný hloubkou řezu, a naopak nejmenší vliv zpravidla má řezná rychlost. Vliv těchto řezných parametrů je zpracován na Obr. 16. Velikost jednotlivých složek celkové síly řezání lze stanovit i za pomoci vzorce, pro který je však nutné nejprve experimentálně zjistit velikost empirických konstant, viz vztah(3.1). (31) (32)

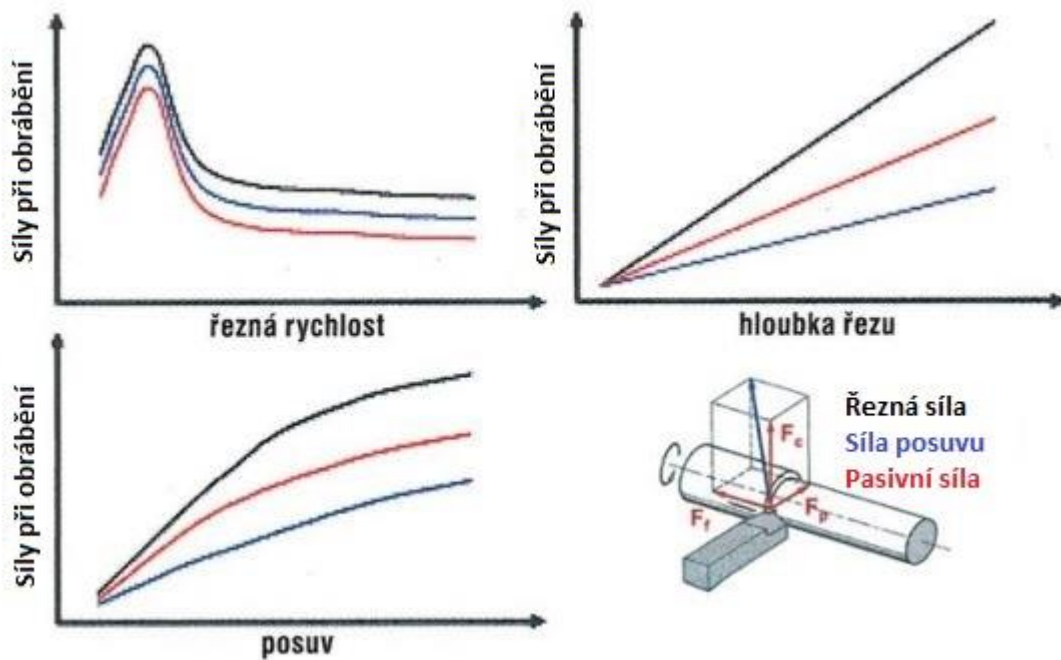
$$F_C = C_{F_C} \times a_p^{x_{F_C}} \times f^{y_{F_C}} \quad (3.1)$$

Kde:

- C_{F_C} je konstanta vyjadřující vliv obráběného materiálu na velikost řezné síly (-),
- x_{F_C} , y_{F_C} jsou empirické konstanty (-),
- a_p je hloubka řezu (mm),
- f je posuv (mm/ot).



Obr. 15 Vliv geometrie břitu nástroje na velikost sil při obrábění (33)



Obr. 16 Vliv řezných podmínek na velikost sil při obrábění (33)

3.2.3 Měrný řezný odpor

Měrný řezný odpor, nazývaný též měrná řezná síla, je veličina, pomocí které je možné posuzovat obrobitelnost různých obráběných materiálů. Jedná se o hodnotu síly potřebné k odebrání plochy odřezávané vrstvy o průřezu 1 mm^2 . Jeho výpočet je možné vidět níže, viz vztah (3.2). (22)

$$K_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (3.2)$$

Kde:

- K_c je měrný řezný odpor (N/mm^2),
- F_c je řezná síla (N),
- A_D je plocha odřezávané vrstvy (mm^2).

Plochu odřezávané vrstvy v předchozím vztahu je možné vypočítat pomocí následujícího vztahu, viz (3.3).

$$A_D = f \times a_p \quad (3.3)$$

Kde:

- A_D je plocha průřezu třísky (mm^2),
- f je posuv (mm/ot),
- a_p je hloubka řezu (mm).

3.3 Teplo a teplota při obrábění

3.3.1 Vznik tepla při obrábění

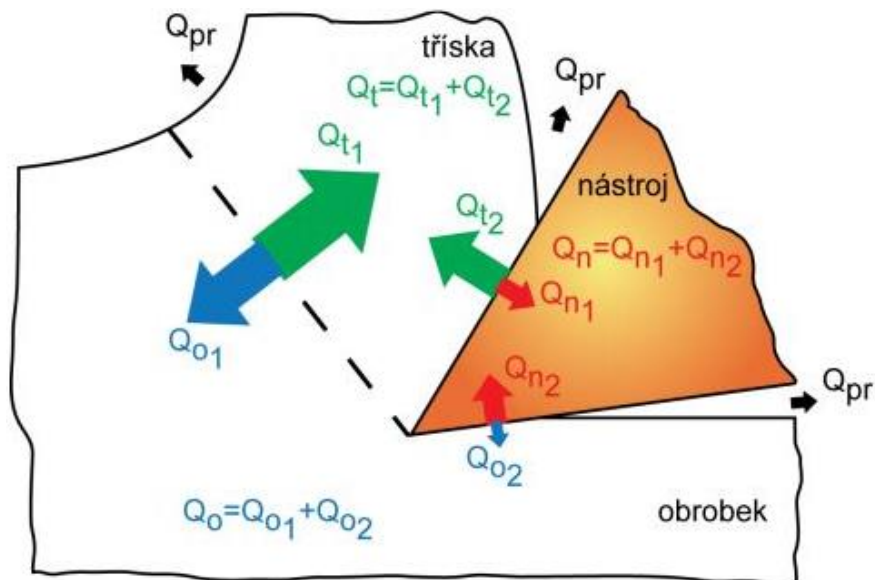
V průběhu obrábění se téměř veškerý příkon stroje přemění v teplo, což má za následek zvýšení teploty v soustavě stroj – nástroj – obrobek. Na vzniku tepla v soustavě má největší podíl plastická deformace v oblasti primární plastické deformace (viz Obr. 9). Malý vliv na vznik tepla mají ovšem i oblast sekundární a terciální plastické deformace,

oproti primární oblasti jsou ale téměř zanedbatelné, viz Obr. 17. Celkové množství tepla vzniklého při obrábění lze popsat následujícím vztahem (3.4). (22)

$$Q_C = Q_t + Q_o + Q_n + Q_p \quad (3.4)$$

Kde:

- Q_c je celkové teplo vzniklé obráběním (J),
- Q_t je teplo odváděné odřezávanou třískou (J),
- Q_o je teplo odváděné obrobkem (J),
- Q_n je teplo odváděné řezným nástrojem (J),
- Q_p je teplo odváděné okolním prostředím (J).



Obr. 17 Odvod tepla z místa řezu (34)

3.3.2 Vliv pracovních podmínek na velikost tepla při soustružení

Velikost celkového tepla vznikajícího při obrábění je dána tím, jak byly při obrábění nastaveny řezné podmínky a jaká vzniká při obrábění síla mezi nástrojem a obrobkem. Z řezných podmínek ovlivňuje velikost vzniklého tepla nejvíce řezná rychlost. Vztah pro výpočet tepla při obrábění je možné vidět níže, viz vztah (3.5). (22)

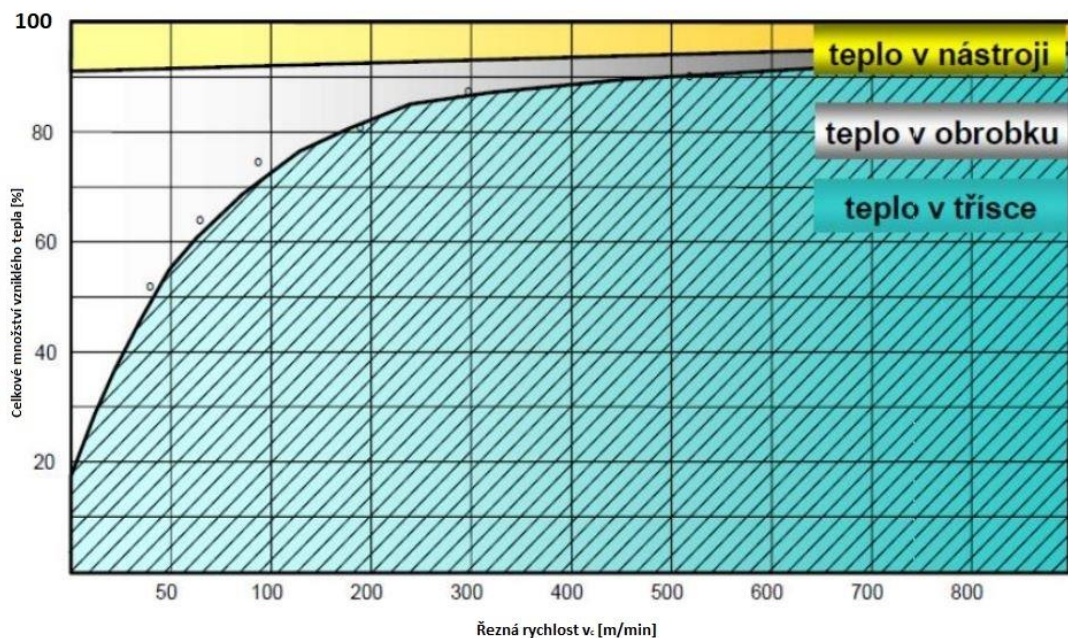
$$Q_c = F_c \times v_c \quad (3.5)$$

Kde:

- Q_c je celkové teplo vzniklé při obrábění (J),
- F_c je řezná síla (N),
- v_c je řezná rychlost (m/min).

3.3.3 Odvod tepla při obrábění

K odvodu přivedeného tepla dochází prostřednictvím všech komponent, které se účastní řezného procesu, avšak každá komponenta odvádí jiné množství tepla. Tento podíl odváděného tepla je závislý hlavně na jednom řezném parametru, a to na řezné rychlosti v_c . Jak je možné vidět na Obr. 18, s rostoucí řeznou rychlostí v_c roste též teplo odváděné prostřednictvím třísky na úkor odvodu prostřednictvím zbylých komponent. Tento poměr platí převážně u kovových materiálů. U nekovových materiálů, například u polymerů, keramiky, dřeva apod., může velikost tepla odvedeného jednotlivými komponenty být naprosto odlišná vzhledem k jejich naprosto rozdílné tepelné vodivosti. (22) (35)



Obr. 18 Vliv řezné rychlosti na množství odváděného tepla jednotlivými komponenty (35)

3.3.4 Teplota řezání

Teplota řezání je teplota, která vzniká v místě řezu v důsledku velikosti řezných podmínek a dalších procesních parametrů jako například chlazení. Vliv řezných podmínek na teplotu řezání lze popsat rovnicí (3.6). Zvýšení teploty, které nastane v důsledku obrábění, je velice významné, teplota v místě řezu totiž může za určitých podmínek, například při obrábění těžko obrobitelných materiálů, dosahovat i přes 1000 °C, což se může velice negativně podepsat na aspektech jako jsou kvalita a přesnost obrobeného povrchu, produktivita, nebo například rychlost opotřebení nástroje a s tím spojená trvanlivost nástroje. Z tohoto důvodu je důležité monitorovat teplotu v místě řezu a vhodnými způsoby ji regulovat, například použitím chladicího média, případně změnou řezných podmínek. (28)

U obrábění kompozitních materiálů s polymerní matricí sice není dosahování takto vysokých teplot běžné, v případě polymerní matrice však nastává jiný problém: i při relativně nízkých teplotách řezání kolem 300 °C dosahují tyto materiály bodu tavení, čímž může docházet k jejich poškozování i v obrobeném povrchu. Vzhledem k nasákavosti polymerních matric nelze pro regulaci teplot některých kompozitních materiálů použít ani procesní kapaliny.

$$\theta = C_{\theta} \times a_p^{x_{\theta}} \times f^{y_{\theta}} \times v_c^{z_{\theta}} \quad (3.6)$$

Kde:

- θ je teplota řezání (°C),
- C_{θ} je konstanta vyjadřující vliv obrobeného materiálu na velikost teploty řezání (-),
- a_p je hloubka řezu (mm),
- f je posuv (mm/ot),
- v_c je řezná rychlost (m/min),
- x_{θ} , y_{θ} , z_{θ} jsou empirické konstanty (-).

4 Možnosti monitorování obráběcího procesu

Monitorování řezného procesu je činnost, která má za úkol zmapovat děje, ke kterým dochází v průběhu obrábění. Důležité charakteristiky těchto dějů se následně zaznamenávají a vyhodnocují. Příkladem hledaných charakteristik jsou například celková síla řezání, řezný výkon, vzniklé teplo, nebo teplota řezání. S ohledem na cíle této práce bude zde popsána pouze metodika měření sil a teploty řezání při obrábění. (36)

4.1 Měření sil v obrábění

Síly, které vznikají při obrábění mezi nástrojem a obrobkem, jsou důležitým parametrem při hodnocení obrobitelnosti, tedy schopnosti materiálu být obráběn. Z tohoto důvodu je velice důležité, aby měření jednotlivých složek síly řezání bylo správné a dostatečně přesné. Dalšími neméně důležitými důvody pro správné určení velikostí jednotlivých složek sil jsou vlivy těchto složek na vzniklé teplo v soustavě stroj – nástroj – obrobek, na tvarovou přesnost výsledného obrobku a mnoho dalších aspektů.

Pro měření sil je možné použít v zásadě dva základní principy měření, a to v závislosti na tom, jak přesné výsledky potřebujeme. První metodou, která je relativně jednoduchá, ale současně také méně citlivá a přesná, je metoda nepřímého měření sil. Tato metoda je založena na dopočtení síly přes jinou veličinu, například příkon stroje. Druhá metoda představuje přímé měření sil. Může být při správném nastavení záznamového zařízení vysoce přesná, její nevýhodou je ovšem to, že je zároveň velice nákladná. Je totiž nutné pořídit zařízení, které dokáže síly správně snímat, zaznamenávat a přeložená data v zobrazitelném formátu poslat do počítače, případně jiného zobrazovacího zařízení. Tato metoda měří přímo síly vznikající mezi nástrojem a obrobkem. (28) (25)

4.1.1 Přímé metody měření sil

Přímé měření sil je realizováno pomocí dynamometrů, což jsou zařízení schopná různými způsoby zaznamenávat síly působící mezi nástrojem a obrobkem. Dynamometry se dělí podle principu měření sil na dynamometry pneumatické, mechanické, hydraulické, optické a elektrické. Největší a nejpoužívanější skupinou jsou dynamometry elektrické, využívající celou řadu fyzikálních jevů. V jejich případě deformace snímače vlivem síly generuje elektrickou veličinu, která je úměrná zatěžující síle. Tato síla je následně

zaznamenána. Mezi elektrické dynamometry se řadí dynamometry indukční, kapacitní, odporové a piezoelektrické. (25) (28)

Aby měření bylo dostatečně přesné a bylo tedy použitelné pro měření sil při obrábění, musí tato zařízení splňovat několik kritérií. Těmito kritérii jsou:

- tuhost dynamometru,
- citlivost dynamometru,
- setrvačnost měřicí soustavy,
- rozsah měření,
- přesnost měření,
- stabilita cejchování.

Vzhledem k obrábění kompozitních materiálů na bázi polymerní matrice lze očekávat velice malé hodnoty jednotlivých složek sil. Z toho důvodu je pro následující experiment velmi důležitá hlavně vysoká citlivost dynamometru a nízká setrvačnost měřicí soustavy. Z výše uvedených typů dynamometrů těmto požadavkům nejvíce vyhovuje právě dynamometr piezoelektrický, který je popsán níže. (37)

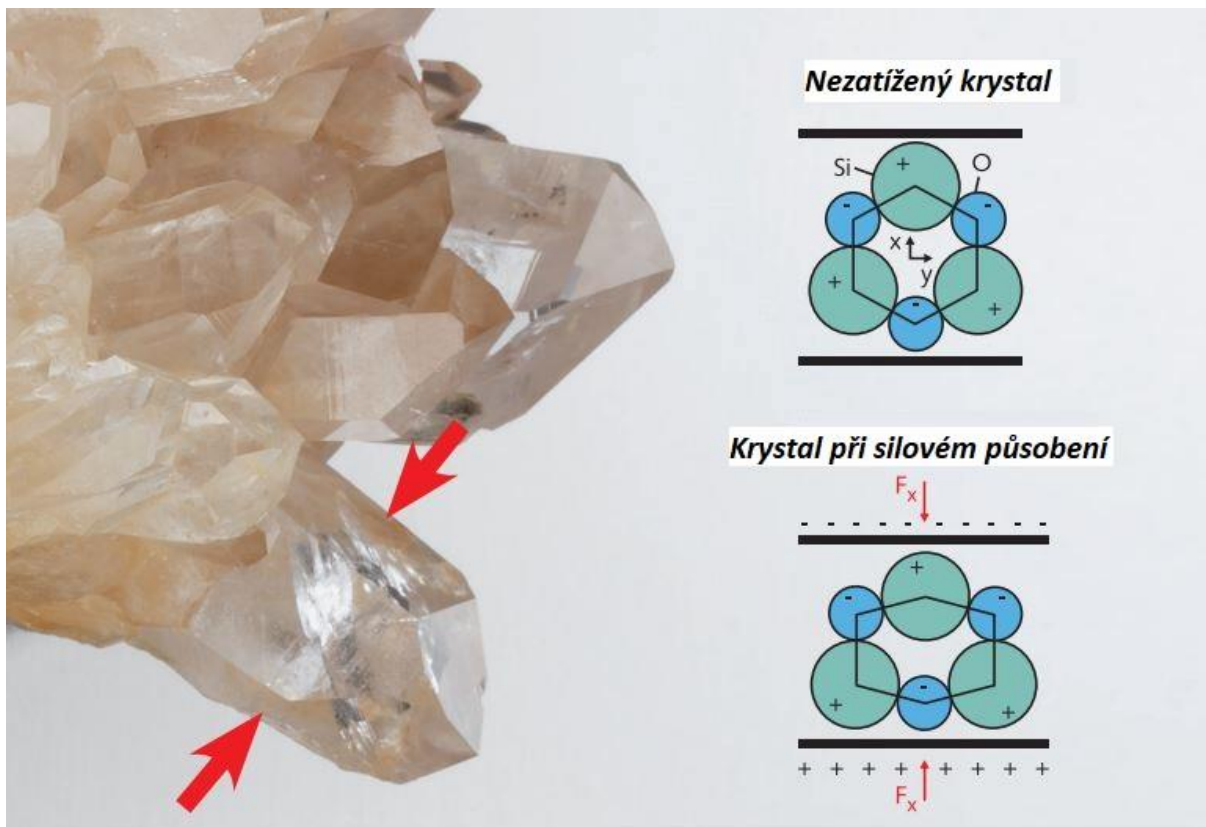
Piezoelektrický dynamometr

Jedná se o druh elektrického dynamometru využívající piezoelektrického jevu. Základem tohoto jevu je vznik elektrického náboje na povrchu krystalů různých materiálů při mechanickém zatížení. Velikost vzniklého náboje lze vypočítat dle vztahu (4.1). V praxi je na výrobu krystalů v těchto dynamometrech využíván například křemen, Seignettova sůl, fosforečnan amonný nebo některé keramické materiály na bázi titaničitanu barnatého. Schematickou ukázkou principu piezoelektrického zachycuje Obr. 19. (25)

$$Q = k_p \times F \quad (4.1)$$

Kde:

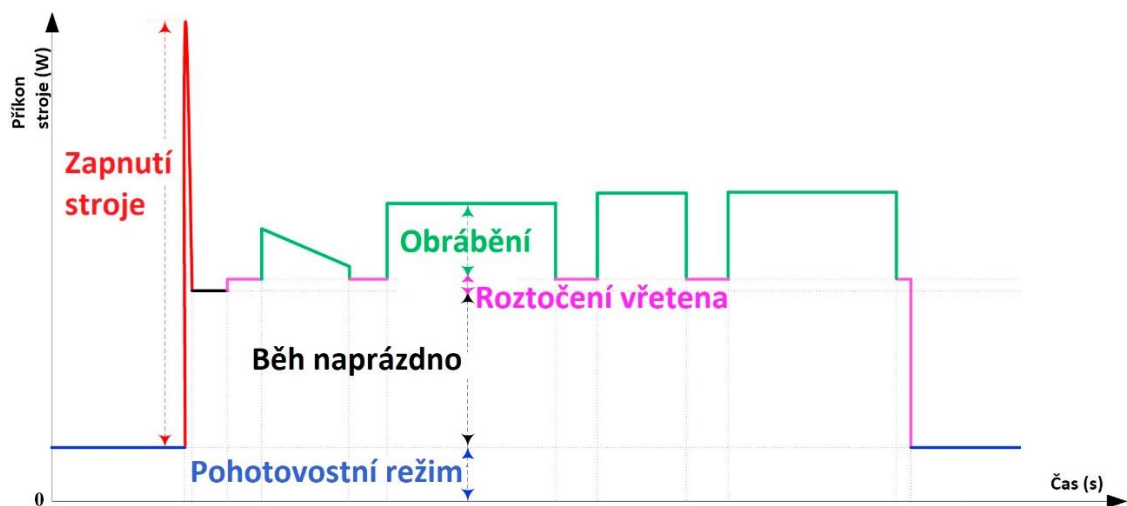
- Q je vzniklý elektrický náboj (C),
- k_p je piezoelektrická konstanta (-),
- F je zatěžující síla (N).



Obr. 19 Schematická ukázka piezoelektrického jevu (38)

4.1.2 Nepřímé měření sil

Síly při obrábění lze také určit nepřímo, tedy pomocí jiné veličiny, například pomocí odebíraného proudu, nebo výkonu. Měření sil pomocí výkonu je možné ze záznamu zatížení jednotlivých os stroje v čase. K realizaci této metody tedy postačí například záznam odebíraného příkonu za klidu stroje, při roztočení vřetena a v průběhu obrábění, viz Obr. 20. Rozdíl odběrů mezi roztočením vřetena (na Obr. 20 Příklad časového záznamu příkonu obráběcího stroje vyznačeno růžově) a obráběním (na Obr. 20 vyznačeno zeleně) lze označit za řezný výkon P_c a z něj už je pomocí vztahu pro řezný výkon při znalosti řezné rychlosti možné vypočítat řeznou sílu F_c , viz vztah (4.2). Tato metoda má nevýhodu v omezené přesnosti měření způsobené rozdílnou účinností elektromotoru stroje v klidu a při zatížení. Další nevýhodou je nízká citlivost měření. Při experimentálním studiu dynamiky řezného procesu se proto tyto metody používají méně často než přímé měření sil, spíše jako metoda vedoucí k získání informací o zatížení stroje řezným procesem. (25) (28) (39)



Obr. 20 Příklad časového záznamu příkonu obráběcího stroje (40)

$$P_c = \frac{F_c \times v_c \times \eta}{60} \quad (4.2)$$

Kde:

- P_c je řezný výkon (W),
- F_c je řezná síla (N),
- v_c je řezná rychlost (m/min),
- η je účinnost elektromotoru (-).

4.2 Měření teplot při obrábění

Ve strojírenství existuje mnoho metod, kterými lze určovat teplotu na povrchu, uvnitř součásti nebo v případě obrábění přímo v místě řezu. Tyto metody se dělí dle principu na dvě skupiny, a to na dotykové a bezdotykové. Mezi dotykové metody měření teplot patří ty, které ke správnému snímání vyžadují přímý kontakt s měřeným objektem. Jedná se o měření pomocí termoelektrických článků, termistorů a indikačních materiálů (křídý, vosky, tužky apod.). K bezdotykovým metodám měření teplot se řadí pyrometry a termokamery. (28)

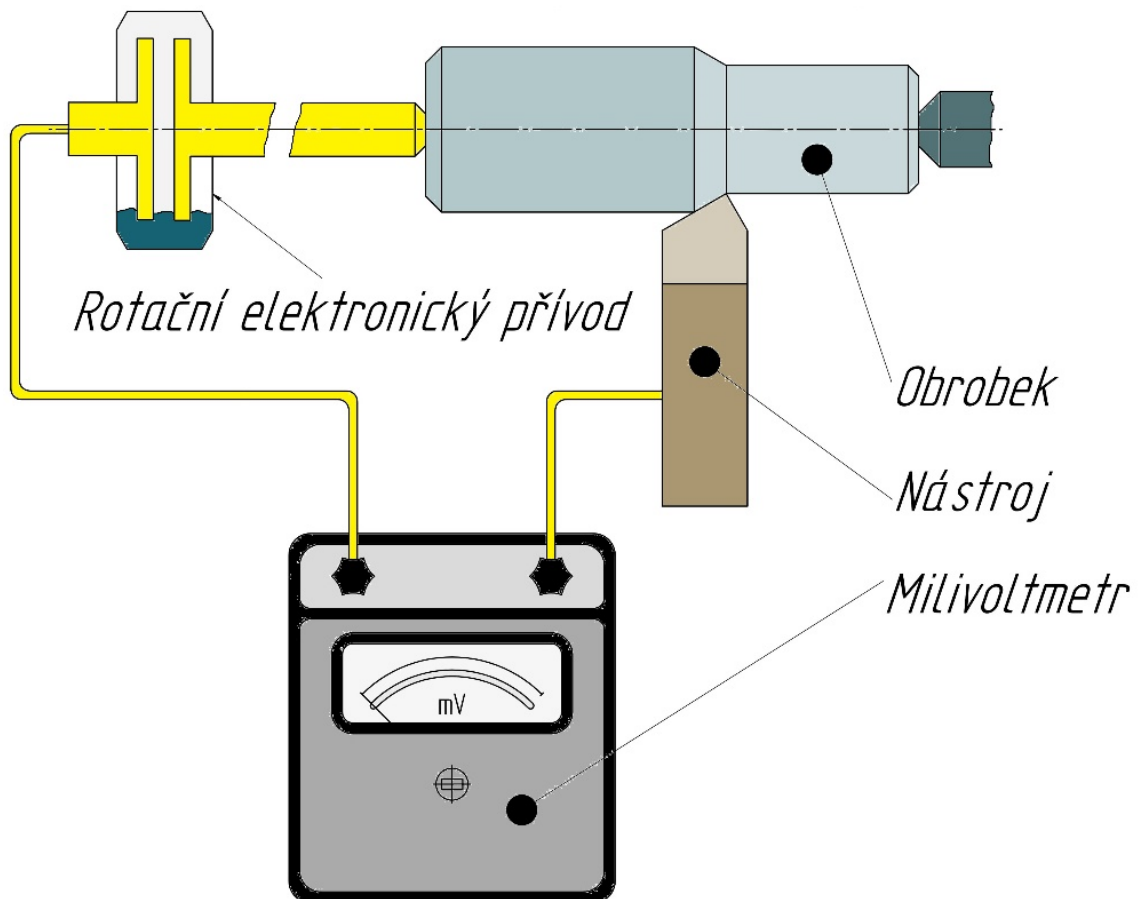
4.2.1 Termočlánky

Termočlánky jsou snímače, které pro měření teplot využívají tzv. termoelektrického jevu. Tento jev se projevuje vznikem termoelektrického napětí mezi dvěma vodivě spojenými vodiči z různých materiálů, které jsou udržovány na různých teplotách. Velikost tohoto napětí není ovšem závislá jen na rozdílu teplot mezi těmito dvěma vodiči, ale také na materiálu, ze kterého jsou tyto dva vodiče vyrobeny. Velikost vzniklého termoelektrického napětí je také velice malá a k jejímu měření je nutné použít dostatečně citlivý přístroj, který je schopný měřit napětí v řádech jednotek až desetin milivoltů. (28)

Dle způsobu konstrukce je možné termočlánky dělit na tři typy, a to termočlánky přirozené, poloumělé a umělé. Speciálním případem zapojení termočlánku je tzv. termoduo, kdy jsou pro měření využívány dva stejné nástroje z rozdílných materiálů a obrábění probíhá při stejných pracovních podmínkách pro oba nástroje. (28)

Přirozený termočlánek

Jedná se o termočlánek tvořený pouze nástrojem a obrobkem, k místu řezu tedy není přiváděn žádný jiný vodič. Jeho výhodou je, že měření probíhá přímo v místě řezu, tedy mezi čelem břitu nástroje a třískou a zároveň také mezi hřbetem nástroje a obrobeným povrchem. Výsledné termoelektrické napětí je potom úměrné střední teplotě v oblasti řezání. Naopak nevýhodou tohoto druhu termočlánku je nutnost vytvořit kalibrační křivku pro danou dvojici materiálů nástroj – obrobek, jinak řečeno termočlánek ocejchovat. Řezný nástroj a obrobek je navíc nutné dobře izolovat od stroje, aby se zvýšila přesnost a spolehlivost měření. Zapojení tohoto typu termočlánku je možné vidět na Obr. 21. (25) (28)

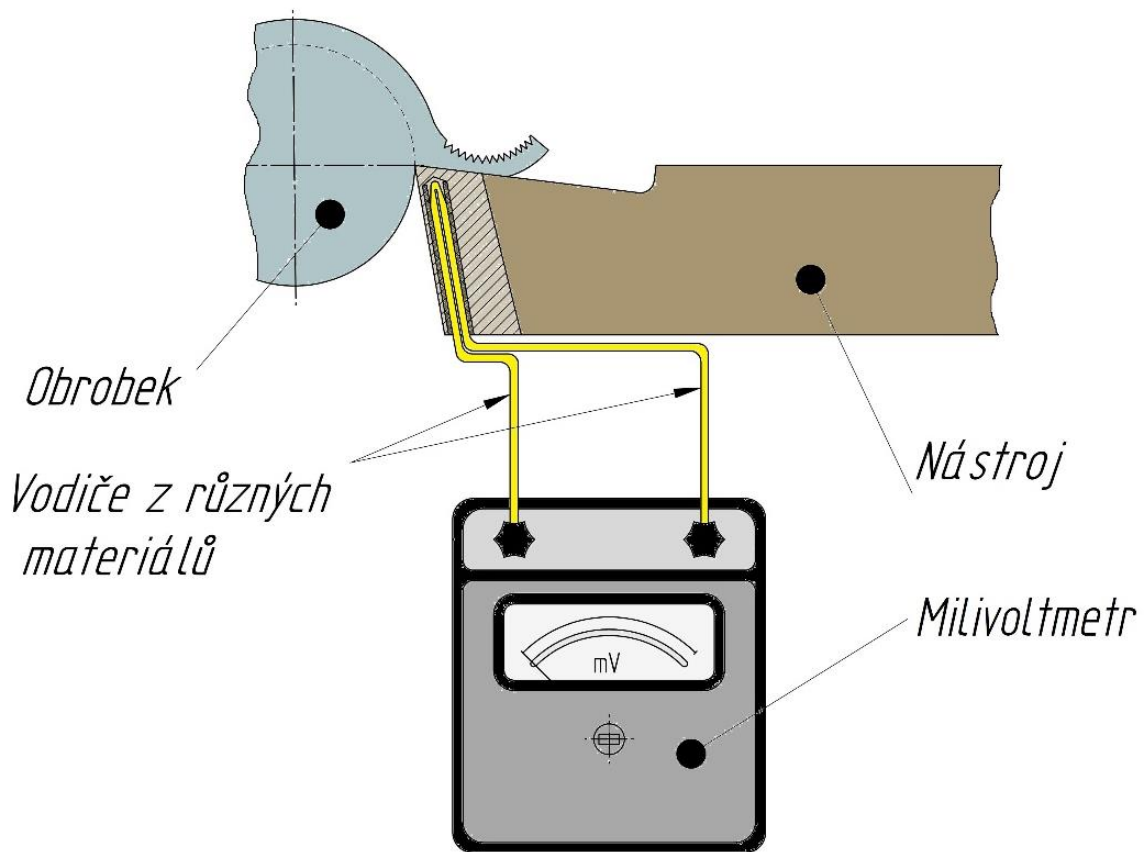


Obr. 21 Ukázka zapojení přirozeného termočláčku

Umělý termočlánek

Podstatou umělého termočláčku je stejně jako u přirozeného vznik termoelektrického napětí vznikajícího na rozhraní dvou materiálů, ovšem v tomto případě se pro materiál vodičů využívají drátky o předem známé kalibrační křivce. Tyto drátky jsou při obrábění přivedeny co nejbližší k místu řezu, čehož je možné docílit například zavedením do předem vyvrtaného otvoru, který končí těsně pod břitem nástroje. Termočlánek musí být od nástroje elektricky izolovaný. Výhodou tohoto termočláčku je předem známá kalibrační křivka, není tedy nutné termočlánek cejchovat. Nevýhodou tohoto termočláčku je relativně složitá úprava řezného nástroje nebo obrobku a omezená použitelnost pro měření teploty v místě řezu, jelikož tento typ termočláčku není možné umístit přímo do místa řezu, ale až do určité vzdálenosti. V případě potřeby měření teploty přímo v místě řezu a zároveň nemožnosti použití přirozeného termočláčku je nutné zohlednit při

vyhodnocení teplot vedení tepla materiálem nástroje, což může při nepřesném umístění termočládku do vyhodnocení vnést relativně vysokou nepřesnost. Ukázka zapojení umělého termočládku je na Obr. 22. (25) (28)

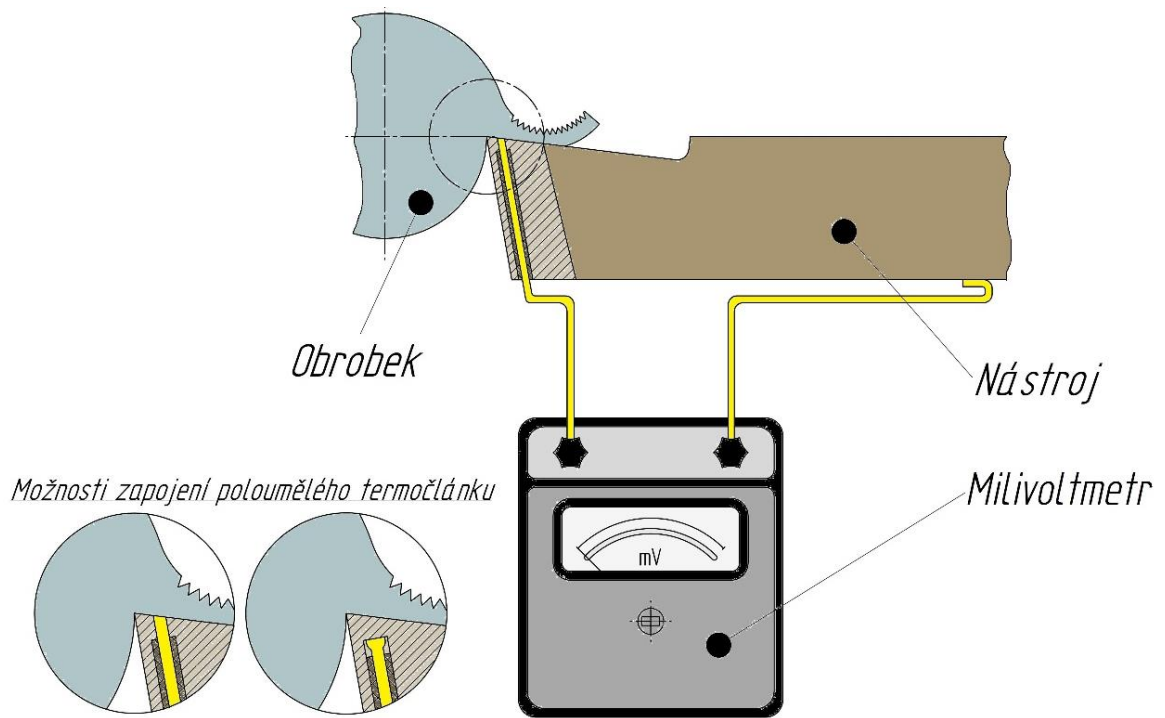


Obr. 22 Ukázka zapojení umělého termočládku

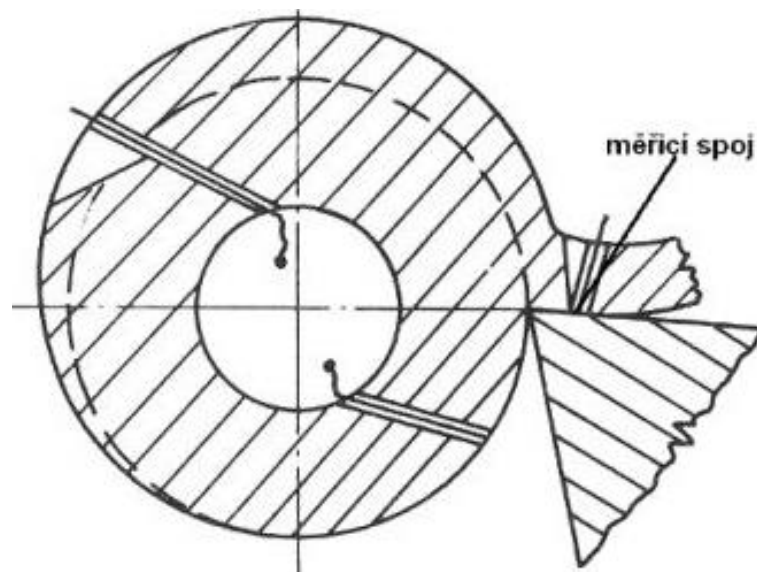
Poloumělý termočlánek

Poloumělý termočlánek je kompromisem mezi termočládkem umělým a přirozeným. Jeho zapojení tvoří na jedné straně materiál nástroje nebo obrobku a na straně druhé cizí vodič přivedený k místu řezu, například otvorem vyvrtaným těsně pod břit nástroje, kde je vodič spojený s nástrojem, nebo vyvedení cizího vodiče až na povrch břitu nástroje, kde dochází k dotyku s odcházející třískou, díky čemuž dojde k vodivému spojení. Tyto možnosti zapojení najdeme na Obr. 23. Výhodou tohoto termočládku je možnost měření teploty přímo v oblasti primární plastické deformace třísky, čehož je docíleno tak, že cizí

vodič je zavedený do obrobku a postupně odřezáván. Při každém odříznutí drátku tak dojde ke spojení elektrického obvodu a tím i k záznamu jednoho bodu teploty. Zapojení cizího vodiče pro možnost měření teplot v oblasti primární plastické deformace je znázorněno na Obr. 24. (25) (28)



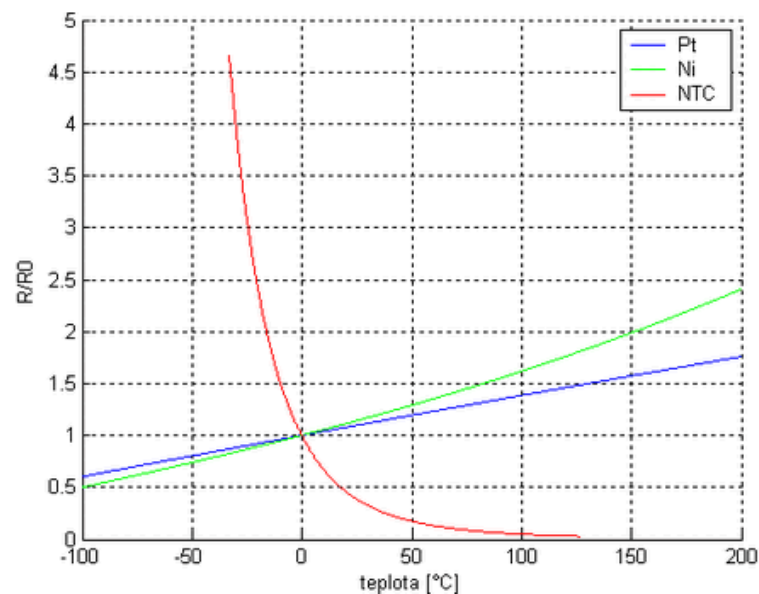
Obr. 23 Ukázka zapojení poloumělého termočláňku



Obr. 24 Schéma měření teploty v oblasti primární plastické deformace (25)

4.2.2 Termistory

Termistory jsou elektronické polovodičové součástky využívající teplotní závislosti elektrického odporu materiálu. Oproti kovovým materiálům mají výhodu v zhruba desetkrát větší změně elektrického odporu v závislosti na teplotě, viz Obr. 25. Další jejich výhodou je vysoká citlivost a malá hmotnost čidla. Jejich nevýhodou je ovšem malý měřicí rozsah, standartní měřicí rozsah těchto měřidel se totiž pohybuje od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. (28) (41)



Obr. 25 Změna el. odporu termistoru NTC v závislosti na teplotě v porovnání s niklem a platinou (41)

4.2.3 Indikační materiály

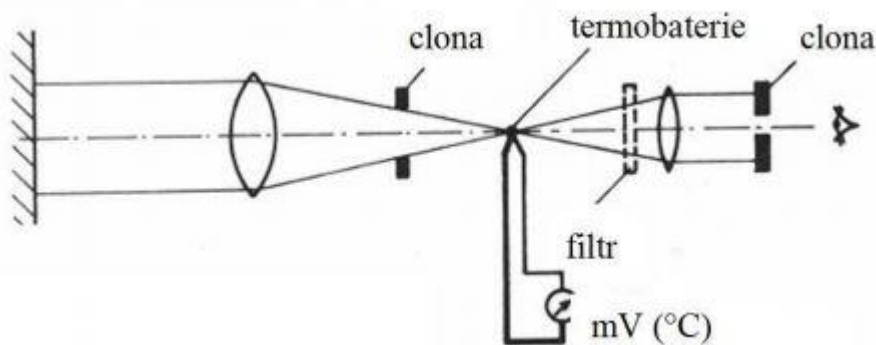
Jedná se o materiály na bázi křidy, tužky, nebo nátěru, které jsou schopné s měnící se teplotou, případně při dosažení nějaké limitní teploty, měnit barvu, či skupenství. Dají se využít pro stanovení teplotních polí na bočních plochách obrobku, nástroje, nebo na tříse. Na Obr. 26 je možné vidět indikační tužku pro detekování teploty $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. (25)



Obr. 26 Indikační tužka (42)

4.2.4 Pyrometry

Pyrometry jsou bezdotyková měřicí zařízení využívající k měření teploty tepelné záření vysílané měřenými objekty do chladnějšího okolí. Vzhledem k tomu lze jimi měřit pouze povrchovou teplotu objektů a měření je spíše orientační, na druhou stranu jejich použití je velice jednoduché a rychlé. Podle způsobu měření se pyrometry dělí na úhrnné, zvané též radiační a na pyrometry fotoelektrické. Úhrnné pyrometry využívají k měření vyzařované teploty celé spektrum vlnových délek, díky čemuž je možné je nazývat též širokopásmové. Naproti tomu pyrometry fotoelektrické pracují pouze s malou částí spektra tepelného záření. Schéma úhrnného pyrometru je zachyceno na Obr. 27. (25) (28)



Obr. 27 Ukázka přenosného pyrometru (43)

4.2.5 Termokamery

Termokamery jsou zařízení pro bezdotykové měření teplot. Dokáží snímat obraz podobně jako klasické kamery, ale s tím rozdílem, že barvy daného obrazu neodpovídají realitě, nýbrž jsou nahrazeny barevným spektrem odpovídajícím nastavené teplotní stupnici. Toto je možné díky infračerveným detektorům, které snímají tepelné záření objektu. Tyto detektory musí být dobře chlazené. Zbylé části termokamery jsou v podstatě shodné

s klasickým fotoaparátem, přes zobrazovací čočku putuje obraz na světlocitlivé elementy, které jej zachycují. Všechny tyto části zároveň vysílají také své tepelné záření, a to musí být odstíněno, aby se zabránilo zobrazování nežádoucích „duchů“. Co se týče čočky termokamery, nelze použít klasické sklo, protože nedokáže propustit oblast vlnových délek tepelného záření. Proto se čočky do termokamer vyrábí z jiných propustných materiálů, například z germánia nebo safiru (termokamera na Obr. 28. (44)

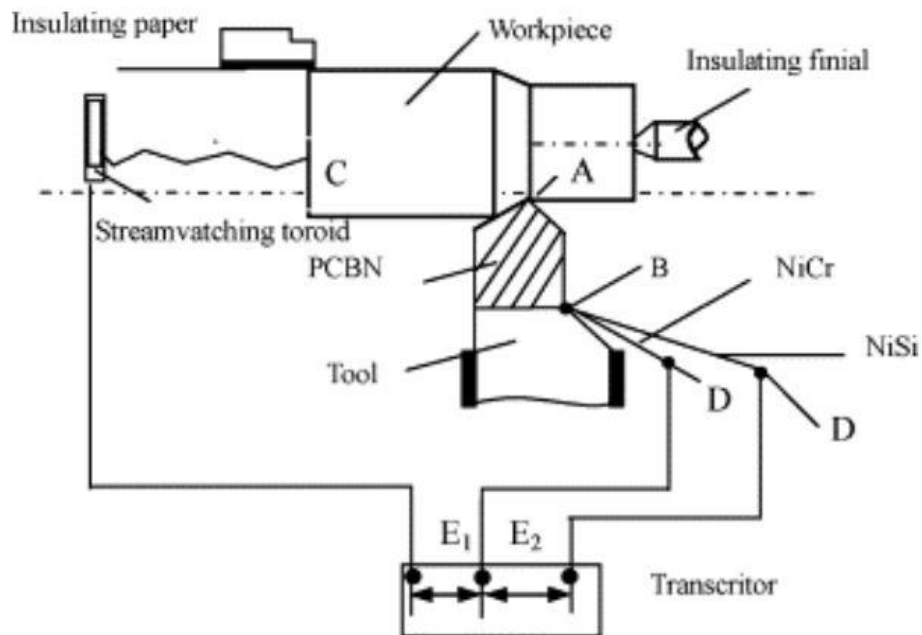


Obr. 28 Ukázka termokamery FLIR T640 (45)

4.3 Zkušenosti s použitím přirozeného termočlánu

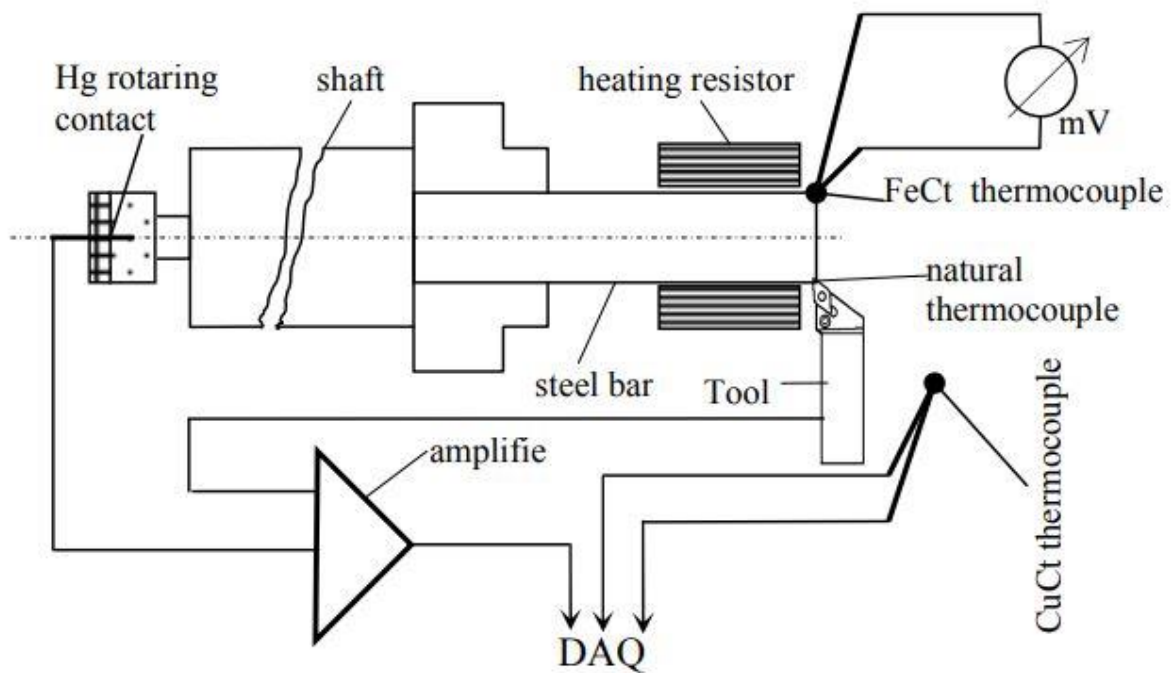
Pro potřeby měření teplot u kompozitních materiálů, které jsou vodivé jen díky uhlíkovým vláknům, bude navržen, ocejchován a následně i použit přirozený termočlánek. V odborné literatuře nebyla objevena práce, která by se touto problematikou u kompozitních materiálů zabývala, proto jsou níže popsány pouze příklady řešení přirozeného termočlánu při soustružení kovových materiálů.

X. L. Liu a kolektiv se věnovali studiu teplotních jevů při obrábění kalené ložiskové oceli nástrojem z kubického nitridu bóru. K měření teplot byl použit přirozený termočlánek. Pro spojení rotující a statické části obvodu byl využit usměrňovací toroid, tedy dlouhá úzká hustě vinutá cívka stočená do tvaru prstence. Pro kalibraci tohoto termočlánu byl použit termočlánek NiCr. (46)



Obr. 29 Zapojení přirozeného termočlánu, který použil X.L. Liu (46)

Gheorge Ceau a kolektiv se věnovali měření teploty řezání u oceli pomocí přirozeného termočlánu. Pro spojení rotující a statické části obvodu byl využit rotační konektor tvořený rotujícím kotoučkem v rtuti, spojený s obrobkem tyčí. Pro zahřívání termočlánu pro účely kalibrace byl použit elektrický rezistor na keramické podstavě a k záznamu teplot byl použit termočlánek FeCt. Výsledkem tohoto výzkumu byla funkční konstrukce přirozeného termočlánu, viz Obr. 30, ověřená měřením teploty řezání tímto termočlánekem s různými řeznými podmínkami a následným porovnáním s vypočítanou hodnotou teploty řezání. (47)



Obr. 30 Zapojení přirozeného termočláňku použitého Gheorgem Ceau (47)

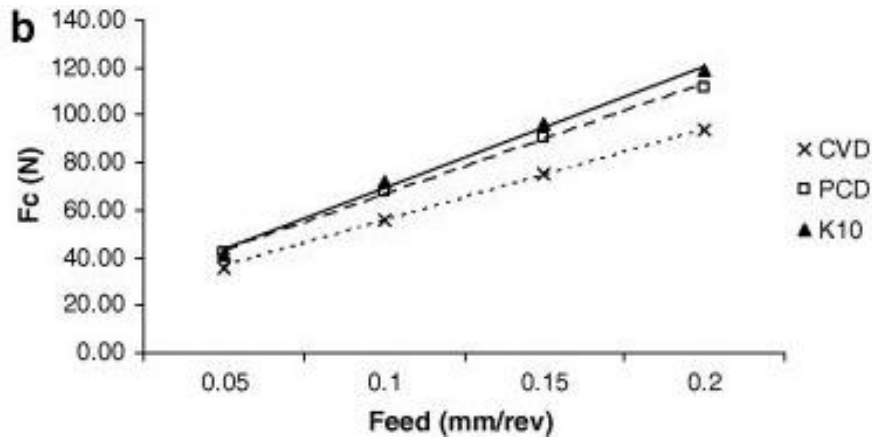
5 Obrobitelnost kompozitních materiálů soustružením

Kompozitní materiály jsou velice perspektivní materiály, neboť svými vlastnostmi předčí většinu dnes používaných konvenčních materiálů. Problém ovšem nastává v případě, kdy je nutné tyto materiály do finální podoby obrábět. Díky velice tvrdým vláknům rozprostřeným v měkké matrici se zvyšuje namáhání břitu a dochází k jeho rychlejšímu opotřebení. Z tohoto důvodu je nutné na tyto materiály používat velice tvrdé a otěruvzdorné řezné nástroje s vhodnou geometrií břitu. Dalším závažným úskalím je vhodné stanovení řezných podmínek. Při nevhodně zvolených řezných podmínkách je nejen výrazně zkrácena životnost nástroje, ale je zde také riziko, že dojde ke značnému zvýšení teploty řezání a tím může dojít i k tavení polymerní matrice, čímž se materiál nenávratně poškodí. Toto riziko je zvýšeno i velmi nízkou tepelnou vodivostí polymerní matrice. V důsledku špatně zvolených řezných podmínek může také dojít ke vzniku vysokých sil řezání, které zase ovlivňují velikost vznikající delaminace, což má za následek zhoršenou kvalitu obrobené plochy. Z těchto důvodů se řada vědeckých týmů aktuálně zabývá vlivem pracovních podmínek na silové a teplotní jevy při obrábění kompozitních materiálů. V následující kapitole je proto možné vidět shrnutí těchto prováděných experimentů včetně dosažených výsledků. Výzkumných prací zabývajících se touto problematikou ovšem není mnoho, proto zde byly vybrány a popsány pouze hlavní vědecké práce, které byly alespoň částečně relevantní vzhledem k zaměření této práce.

5.1 Zkušenosti se soustružením kompozitních materiálů s polymerní matricí

J.P. Davim se věnoval vlivu řezných podmínek a materiálu řezného nástroje na silové jevy při soustružení kompozitního materiálu PEEK CF30. K soustružení použil tři řezné materiály, a to nepovlakovaný slinutý karbid K10, polykrystalický diamant a slinutý karbid K10 povlakovaný metodou CVD. Výsledkem tohoto výzkumu byl mimo jiné vliv posuvu na velikost řezné síly, viz Obr. 31. Zde je zároveň možné vidět, že k největším

řezným silám dochází u nástroje ze slinutého karbidu K10, naopak nejmenší řezné síly jsou generovány nástrojem s CVD povlakem. Toto je způsobeno především geometrií břítu tohoto řezného nástroje a také tím, že nástroj s CVD povlakem byl opatřen utvařečem třísek. (48)



Obr. 31 Vliv posuvu na velikost řezných sil (48)

I. Hanafi se věnoval optimalizaci řezných podmínek při soustružení kompozitního materiálu PEEK-CF30 s užitím nástrojů povlakovaných TiN povlakem vzhledem k řeznému výkonu a drsnosti povrchu. K obrábění použil tři hodnoty řezné rychlosti, a to 100, 200 a 300 m/min, dále tři hodnoty posuvu, a to 0,05, 0,15 a 0,20 mm/ot a nakonec tři hodnoty hloubky řezu, a to 0,25, 0,75 a 1,5 mm. Výsledkem tohoto výzkumu bylo, že ideální řezné podmínky vzhledem k drsnosti povrchu a velikosti řezného výkonu byly následující: řezná rychlost 100 m/min, posuv 0,05 mm/ot a hloubka řezu 0,25 mm, tedy nejmenší hodnoty parametrů ze zvolených rozsahů. (49)

F.M. Cabrera se věnoval optimalizaci řezných parametrů při CNC soustružení kompozitního materiálu PEEK-CF30 vzhledem k drsnosti povrchu a vzhledem k velikosti řezné síly. K obrábění použil řezné podmínky stejné jako I. Hanafi. Tento experiment došel k závěru, že ideální nastavení řezných podmínek pro dosažení minimální drsnosti a velikosti řezné síly byly řezná rychlost 300 m/min, posuv 1,5 mm/ot a hloubka řezu 0,25 mm. (50)

F.M. Cabrera se dále věnoval porovnání vlivu řezných podmínek na obrobitelnost tří modifikací polymerního materiálu PEEK, a to PEEK bez vyztužujících vláken, PEEK s uhlíkovými vlákny a PEEK se skleněnými vlákny. K obrábění použil nástroj z polykrystalického diamantu. Výsledkem tohoto výzkumu bylo mimo jiné to, že

s rostoucím posuvem dochází ke zvýšení řezného výkonu P_C , kdežto měrná řezná síla K_C s rostoucím posuvem klesá a dále, že velikost řezného výkonu a velikost měrné řezné síly je u vlákný vyztužených modifikací vyšší než u modifikace bez vyztužujících vláken.
(51)

5.2 Shrnutí

V dnešní době je největší množství odborných prací v oblasti kompozitních materiálů zaměřeno na možnosti jejich frézování, ale čím dál častěji se objevují i požadavky na soustružení těchto materiálů. Navíc se čím dál více prosazují termoplastové matrice, ačkoli obrobiteľnost těchto materiálů soustružením není dostatečně probádána. Navíc, jak je vidět z předchozích odborných článků, výzkum je zaměřen více na silové jevy, kdežto teplotní jevy probádány nejsou, protože jejich měření je velmi složité. Z tohoto důvodu bude navržena, zkonstruována, ocejchována, a nakonec i otestována vlastní konstrukce sestavy přirozeného termočlánku pro kompozitní materiál složený z polymerní matrice PEEK a uhlíkového vyztužujícího vlákna. Tento materiál nebyl ještě z hlediska měření teplot při soustružení sledován.

Cílem vlastního experimentu bude sledování vlivu řezných podmínek na velikost řezných sil a teploty řezání při soustružení polymerního materiálu vyztuženého uhlíkovými vlákny.

6 Vlastní experiment

Na základě teoretických znalostí z předchozí části této práce byl navržen a proveden experiment, který má za úkol měření sil a teplot řezání při soustružení kompozitního materiálu složeného z polymerní matrice PEEK a výztuže ve formě uhlíkových vláken. Pro měření této teploty řezání byl navržen, zkonstruován a otestován přirozený termočlánek tvořený kompozitním materiálem zmíněným výše a slinutým karbidem s obchodním označením TH10.

Experimentální část je rozdělena na několik samostatných kapitol. V první kapitole je popsáno veškeré strojní a přístrojové vybavení včetně všech použitých přípravků. V další kapitole je popsán obráběný materiál včetně mechanických vlastností. Dále je věnována samostatná kapitola kalibraci termočláneku, ve které je popsán postup, jakým byla vytvořena kalibrační křivka, a nakonec poslední část, samotný experiment, je rozdělena na dvě samostatné etapy, a to nejprve na experiment měření teplot řezání a následně na experiment měření sil. Všechny nové poznatky jsou shrnuty v závěrečné kapitole.

6.1 Použité strojní a přístrojové vybavení

Mezi vybavení použité při tomto experimentu patří obráběcí stroj, řezný nástroj, zařízení pro měření a záznam dat, a nakonec pomocná zařízení a přípravky. Toto vybavení je popsáno níže.

6.1.1 Stroj

Experiment byl proveden na stroji SP430 od výrobce Kovošvit MAS. Jedná se o CNC soustruh ve variantě s osou „Y“ a spodní hlavou s naháněnými nástroji. Jeho hlavní předností pro tento experiment je možnost plynulé změny otáček pro dosažení konstantní řezné rychlosti při pohybu v ose „X“, tedy při zapichování. Další parametry tohoto stroje jsou uvedeny v Tab. 1. Stroj je možné vidět na Obr. 32.

Tab. 1 Parametry soustruhu SP430 (52)

Parametr	Hodnota
maximální délka soustružení [mm]	1100
maximální otáčky [1/min]	3800
rychloupřesun osy X _{1,2} /Z _{1,2} [m/min]	30
rychloupřesun osa Y [m/min]	25
zrychlení (X, Y, Z) [m/s ²]	20, 20, 15
výkon vřetena [kW]	28



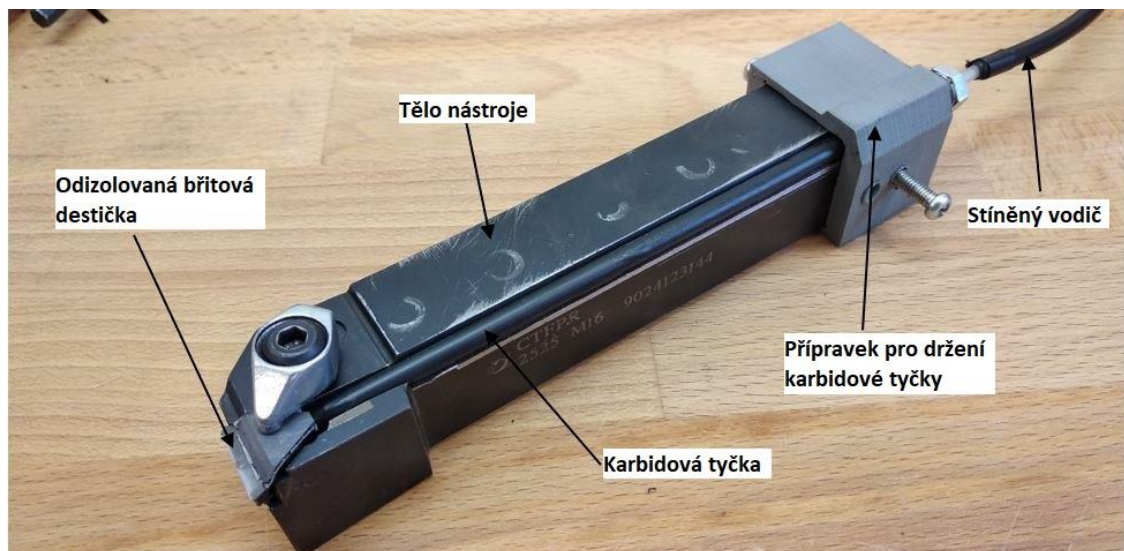
Obr. 32 Stroj SP430 (52)

6.1.2 Řezný nástroj

Aby bylo možné spolehlivě bez rizika vzniku parazitního termočlánku mezi břitovou destičkou a vodičem měřit teplotu v místě řezání při soustružení, musel být nástroj upraven. Dle mého návrhu vycházejícího z principu popsaného v literatuře (25) byla proto zkonstruována a následně i použita sestava obráběcího nože, která kromě upraveného soustružnického nože Pramet CTFPR 2525 M16 a vyměnitelné břitové destičky Tungaloy TPGN 160308 čítala ještě speciálně nabroušenou tyčku ze slinutého karbidu, sloužící pro vyvedení srovnávacího spoje vodič – slinutý karbid co nejdále od

místa řezu, a přípravek vyrobený metodou 3D tisku, zajišťující pevné uchycení nabroušené tyčky v drážce soustružnického nože.

Aby bylo možné všechny komponenty spolehlivě sestavit v jeden funkční celek, bylo nutné v soustružnickém noži vyfrézovat drážku, do níž byla později vložena tyčka ze slinutého karbidu tak, aby nabroušenou plochou dosedla na plochu hřbetu nevyužívaného břitu vyměnitelné břitové destičky. Důležité bylo, aby materiál této tyčky byl stejný, jako materiál vyměnitelné břitové destičky, neboť v případě použití slinutého karbidu s jiným chemickým složením by při prohřátí břitové destičky docházelo ke vzniku parazitního termočlánku už mezi tyčkou a břitovou destičkou, čímž by zkresloval naměřená data. Celou sestavu soustružnického nože včetně instalované karbidové tyčky najdete na Obr. 33.

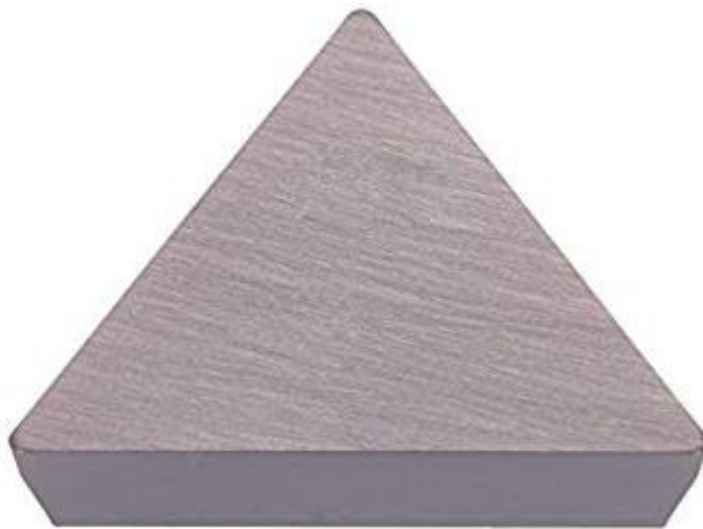


Obr. 33 Nástroj upravený pro měření teplot přirozeným termočlánkem

V upraveném soustružnickém noži zmíněném výše byla použita vyměnitelná břitová destička od firmy Tungaloy z materiálu výrobcem označeného jako TH10 a s označením TPGN 160308, viz Obr. 34. Všechny důležité parametry řezné geometrie nástroje jsou zaznamenány v Tab. 2. Pro potřeby měření teplot pomocí přirozeného termočlánku nebyla destička opatřena žádným povlakem, který by mohl působit jako tepelná bariéra.

Tab. 2 Parametry VBD Tungaloy TPGN 160308 (53)

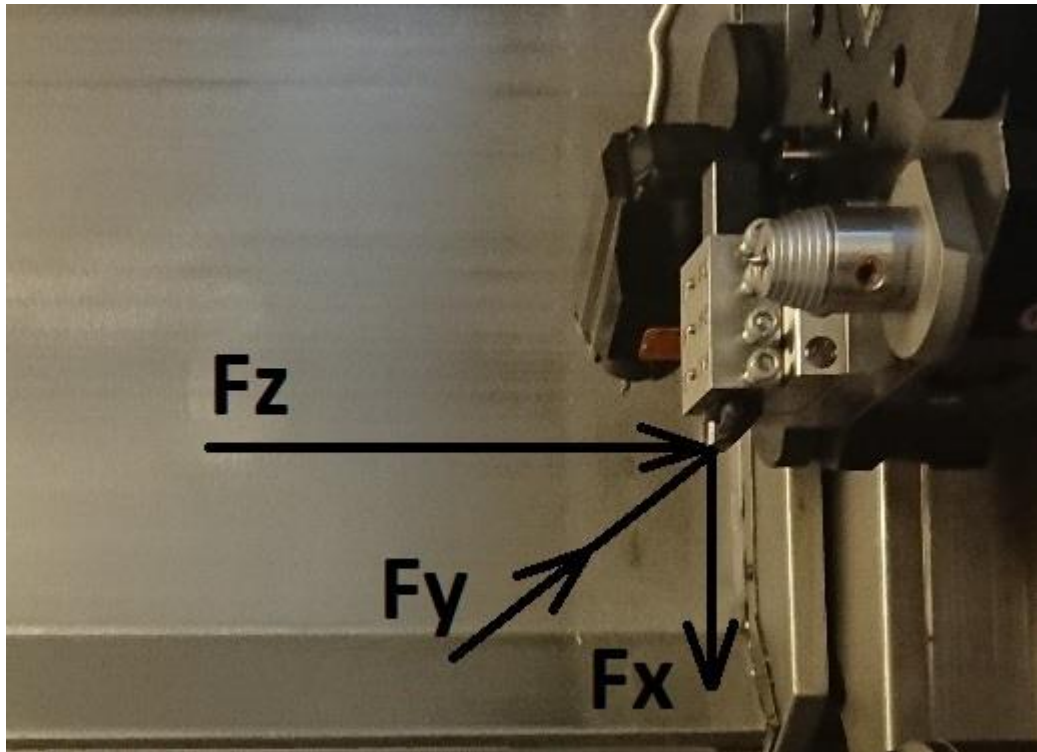
Parametr	Hodnota
úhel čela [°]	0
úhel hřbetu [°]	11
délka řezné hrany [mm]	16,5
průměr vepsané kružnice [mm]	9,525
výška VBD [mm]	3,18
rádus rohu [mm]	0,8



Obr. 34 Ukázka břitové destičky TPGN 160308 (54)

6.1.3 Měřicí a záznamová zařízení

Pro měření jednotlivých složek síly řezání byl zvolen dynamometr od firmy Kistler typ 9119A, určený pro obrábění s menším silovým zatížením. Tento typ dynamometru byl použit, aby bylo možné upnout do něj nástroj upravený pro měření teplot. Pro komunikaci dynamometru s počítačem byl dále použit zesilovač signálu Kistler typ 5017 a digitalizační karta Kistler typ 5697. Samotný dynamometr včetně jeho souřadného systému je na [Obrázek č. 35](#).



Obrázek č. 35: Ukázka dynamometru Kistler pro soustružení (55)

Pro záznam kalibrační křivky přirozeného termočlánku bylo použito zařízení Almemo 5690-2 od společnosti Ahlborn. Toto zařízení bylo pro kalibraci použito z toho důvodu, že dokáže na základě uložené kalibrační křivky termočlánku typu K automaticky převést jeho napětí na teplotu. Parametry zařízení jsou uvedeny v Tab. 3. Fotografie zařízení najdete na Obr. 36.

Tab. 3 Parametry záznamového zařízení Almemo (56)

Parametr	Hodnota
maximální počet vstupů [-]	99
přesnost	±0,02 % z měřené hodnoty ± 1 digit



Obr. 36 Záznamové zařízení Almemo 5690-2

K zařízení Almemo byl kromě přirozeného termočlánu připojen také izolovaný termočlánek typu XS-14-K-12 od výrobce Omega. Specifikace tohoto termočlánu je uvedena v Tab. 4.

Tab. 4 Parametry termočlánu XS-14-K-12 (57)

Parametr	Hodnota
typ termočlánu [-]	K
teplotní rozsah [°C]	0–1090
délka [mm]	300

V průběhu obrábění byla pro záznam termoelektrického napětí použita měřicí karta National Instruments model 9239 z důvodu možnosti vyšší vzorkovací frekvence záznamu, viz Tab. 5. V této tabulce je možné vidět zároveň i další parametry této měřicí

karty. Pro připojení zmíněné karty k PC sloužilo šasi NI cDAQ model 9191 s možností propojení ethernetovým rozhraním. Použitou měřicí kartu včetně šasi je možné vidět na Obr. 37. (58)

Tab. 5 Parametry měřicí karty NI model 9239 (58)

Parametr	Hodnota
rozsah měřeného napětí [V]	± 10
maximální vzorkovací frekvence [kS/s/ch]	50
maximální počet samostatných vstupů	4
vzájemná izolace kanálů [V_{rms} Ch-Ch]	250



Obr. 37 Ukázka záznamové karty NI 9239

Mezi další použitá zařízení patří horkovzdušná opalovací pistole Steinel HL 2010 E LCD, viz Obr. 38. Parametry pistole jsou uvedeny v Tab. 6. Tato horkovzdušná pistole byla použita za účelem umělého ohřevu sestavy a vytvoření kalibrační křivky.

Tab. 6 Parametry horkovzdušné pistole Steinel (59)

Parametr	Hodnota
rozsah měřeného napětí [V]	±10
maximální vzorkovací frekvence [kS/s/ch]	50
maximální počet samostatných vstupů	4
vzájemná izolace kanálů [V_{rms} Ch-Ch]	250



Obr. 38 Horkovzdušná opalovací pistole Steinel (59)

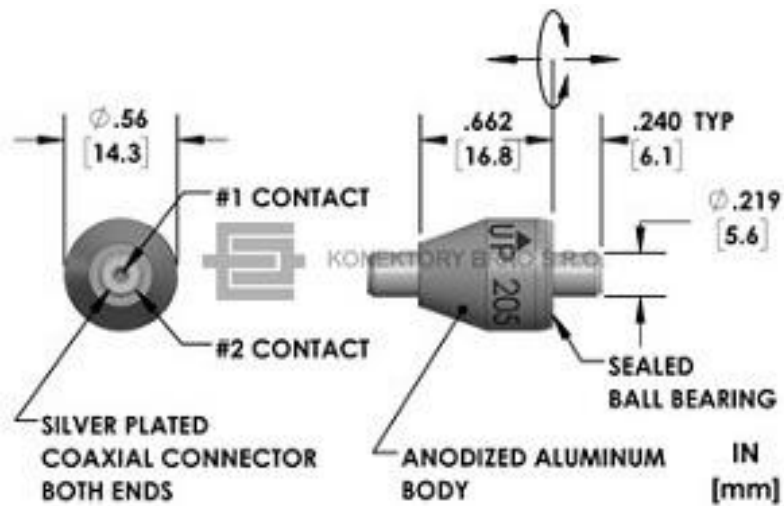
Dále byl použit přesný teploměr GMH 3230 od firmy Greisinger. Sloužil pro ověření teploty v místě ohřevu. Fotku tohoto zařízení je možné vidět na Obr. 39.



Obr. 39 ukázka přesného teploměru GMH 3230

6.1.4 Pomocné přípravky

Záznamové zařízení bylo s přirozeným termočlánkem propojeno odstíněnými vodiči pro zajištění nerušeného signálu. Větev vedoucí napětí ze strany obrobku musela procházet skrz vřeteno stroje., kde docházelo k rotaci vodiče spolu s obrobkem. Z důvodu převodu signálu z rotačních částí sestavy na části statické musel být použit rotační konektor od firmy Mercotac, který tuto konverzi umožňuje. Tato možnost propojení byla zvolena například Gheorgem Ceau při měření teploty řezání ocelové tyče C45. Rozměry rotačního konektoru nalezneme na Obr. 40. (47)



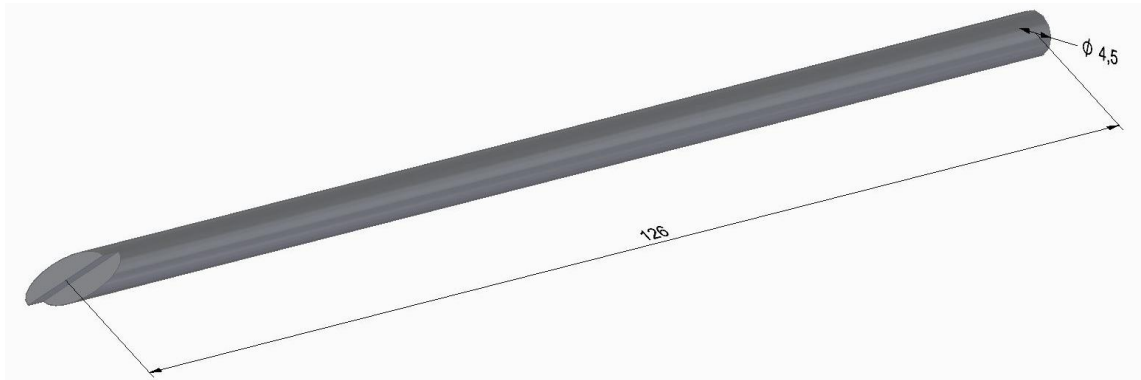
Obr. 40 Rotační konektor Mercotac (60)

Aby bylo možné kompletně sestavit obvod přirozeného termočlánku, bylo nutné vyrobit několik pomocných přípravků. V první řadě bylo nutné uchytit rotační konektor do otvoru stroje pro vrtání, k čemuž sloužil první přípravek, viz Obr. 41.



Obr. 41 Ukázka přípravku s rotačním konektorem

Dále bylo nutné vytvořit karbidovou tyčku, která jak už bylo řečeno, sloužila pro zamezení vzniku parazitního termočláčku mezi vodičem a slinutým karbidem. Model této karbidové tyčky je na Obr. 42.



Obr. 42 Model karbidové tyčky

Nakonec bylo nutné vyrobit poslední přípravek sloužící k upevnění karbidové tyčky v těle nástroje, který zároveň umožní spolehlivý kontakt mezi karbidovou tyčkou a vodičem vedoucím do záznamového zařízení, viz Obr. 33.

6.2 Obráběný materiál

Celý experiment byl proveden na kompozitním materiálu PEEK T300, navinutém na duralové tyči. Jedná se semikrystalický polymerní materiál PEEK s vyztužujícími uhlíkovými vlákny s obchodním označením T300. Mechanické vlastnosti polymerní matrice a vyztužujících vláken jsou uvedeny v Tab. 7 a v Tab. 8. Materiál připravený k obrábění je na Obr. 43.

Tab. 7 Mechanické vlastnosti uhlíkového vlákna T300 (61)

Parametr	Hodnota
pevnost v tahu [MPa]	3530
modul pružnosti v tahu [GPa]	230
hustota [g/cm ³]	1,76
průměr vlákna [μm]	7

Tab. 8 Mechanické vlastnosti polymerní matrice PEEK (62)

Parametr	Hodnota
pevnost v tahu [MPa]	115
modul pružnosti v tahu [GPa]	4,1
hustota [g/cm ³]	1,31
teplota tavení [°C]	341

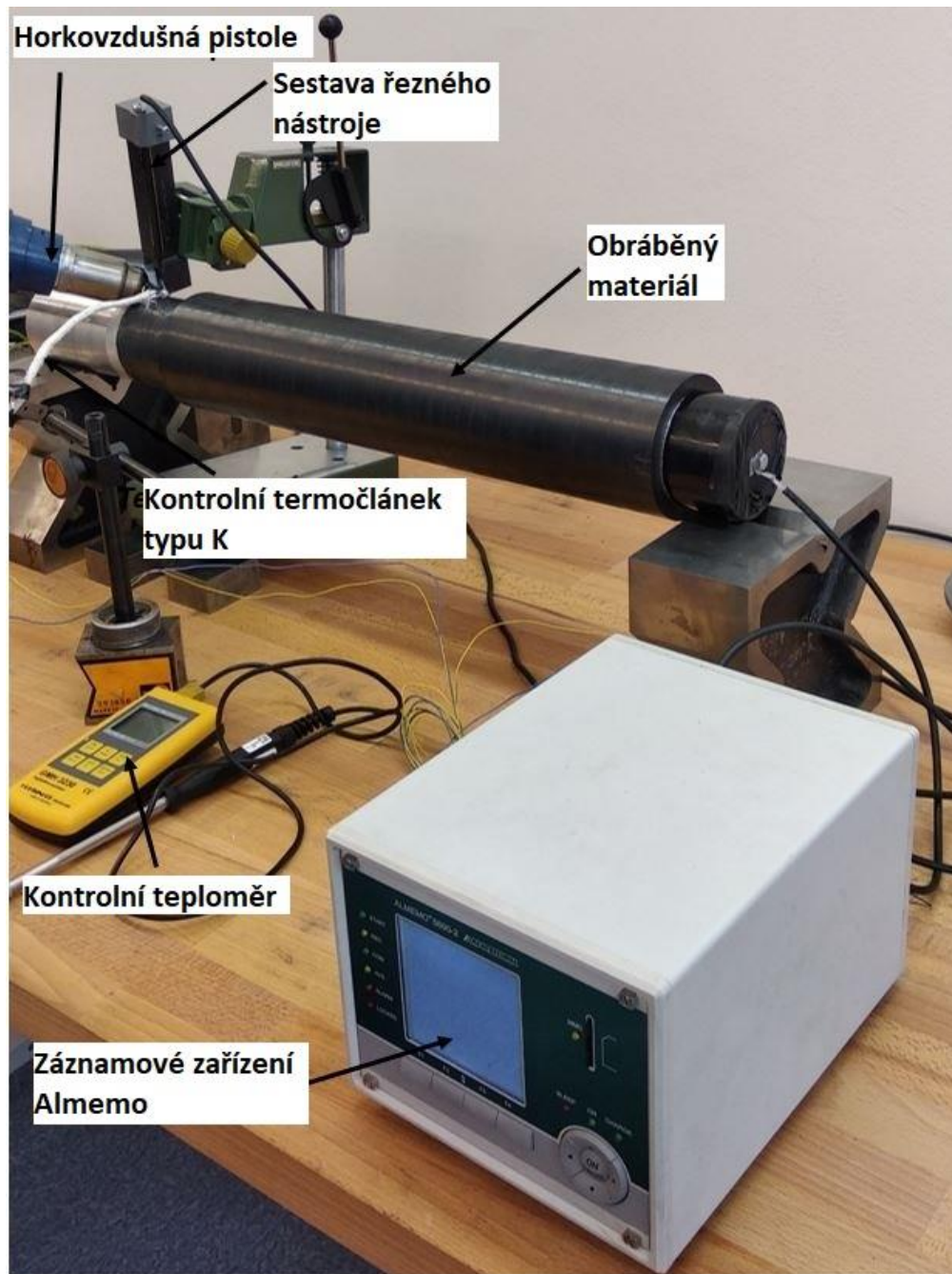


Obr. 43 Ukázka obráběného materiálu PEEK T300

6.3 Kalibrace přirozeného termočlánku

Pro zajištění správnosti měření termočlánku bylo v první řadě nutné vytvořit kalibrační křivku dvojice nástroj – obrobek, které spolu tento přirozený termočlánek tvoří. Toho bylo docíleno pomocí mnou navržené sestavy, viz Obr. 44. Tuto sestavu tvořila kromě samotného termočlánku, tedy nástroje a obrobku, horkovzdušná opalovací pistole, odstíněné vodiče, rotační konektor a všechny přípravky použité i následně při obrábění. Pro záznam termoelektrického napětí v průběhu kalibrace bylo použito zařízení Almemo 5690-2. Jak bylo zmíněno výše, bylo to z toho důvodu, že dokáže na základě uložené kalibrační křivky termočlánku typu K automaticky převést termoelektrické napětí

z tohoto umělého termočláňku na teplotu a není tak potřeba pro tento umělý termočláňek vytvářet vlastní kalibrační křivku.



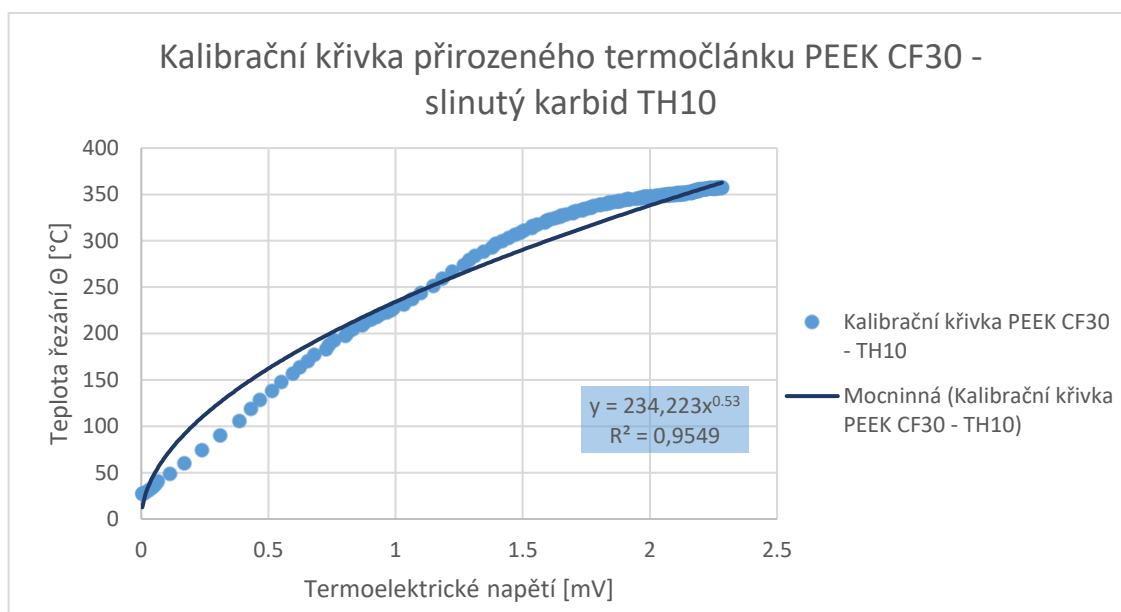
Obr. 44 Sestava pro měření kalibrační křivky termočláňku

Kalibrační křivku naměřenou pro vyhodnocení ověřovacího experimentu je možné vidět na Obr. 45. Tato křivka byla vytvořena zprůměrováním tří křivek, aby bylo dosaženo minimální chyby měření. Rovnici této křivky je možné vidět níže, viz (6.1).

$$\theta = 234,223 \times U_{Term}^{0.53} \quad (6.1)$$

Kde:

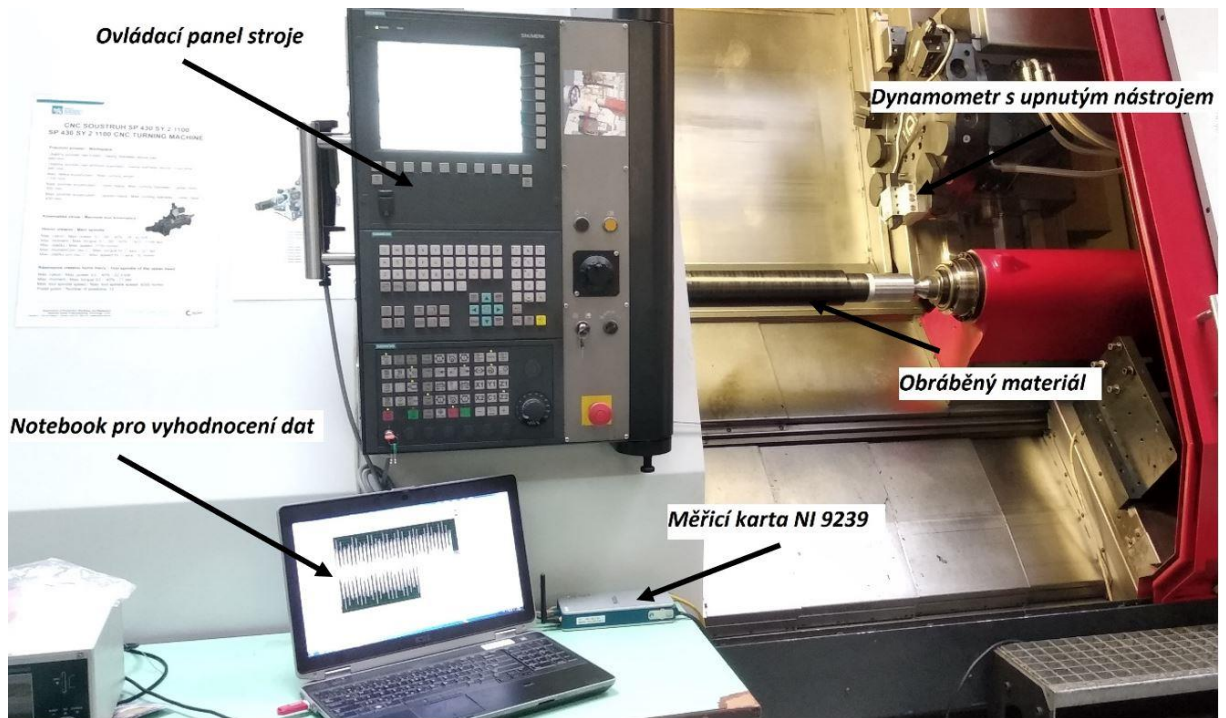
- θ je teplota řezání (°C),
- U_{Term} je termoelektrické napětí (mV).



Obr. 45 Kalibrační křivka přirozeného termočlánku tvořeného kompozitním materiálem PEEK CF30 a slinutým karbidem TH10

6.4 Experiment zkoumající teplotní jevy

Po vytvoření kalibrační křivky byla celá sestava použita při kalibraci termočlánku instalována do stroje pouze s jedinou změnou, a to že pro záznam dat z přirozeného termočlánku byla použita měřicí karta NI 9239 z důvodu vyšší vzorkovací frekvence záznamu dat, viz Obr. 46.



Obr. 46 Sestava pro měření záznamu

6.4.1 Návrh experimentu

Po ocejchování a ověření přirozeného termočlánku, který bude použit při obrábění, bylo možné navrhnout experiment za účelem stanovení závislosti teploty řezání na řezných podmínkách při zapichovacím soustružení. Pro stanovení tohoto vlivu byly zvoleny dva proměnné řezné parametry, a to řezná rychlost a posuv. Pro každý z těchto parametrů bylo zvoleno pět hodnot. Tyto hodnoty řezných parametrů jsou zaznamenány v Tab. 9. Měření při středních řezných podmínkách, tedy při řezné rychlosti 150 m/min a posuvu 0,15 mm/ot, bylo opakováno čtyřikrát z důvodu spolehlivého určení směrodatné odchylky. Všechny testy bohužel nebylo možné provést při tolika opakováních z důvodu nedostatečného množství materiálu. Experiment probíhal při konstantní hloubce řezu 4 mm, což byla zároveň šířka kotouče materiálu, který bylo nutné před samotným měřením připravit pomocí zapichovacího nože. Na každém takto vytvořeném kotouči byla realizována tři měření. Vzhledem k výšce kotouče 9 mm byla délka každého z těchto tří měření 3 mm. Každé měření proběhlo ve dvou opakováních s výjimkou měření s řeznou rychlostí 150 m/min a posuvu 0,15 mm/ot, kde byla opakování provedena čtyři z důvodu přesnějšího určení směrodatné odchylky. Jednotlivá měření byla znáhodněna

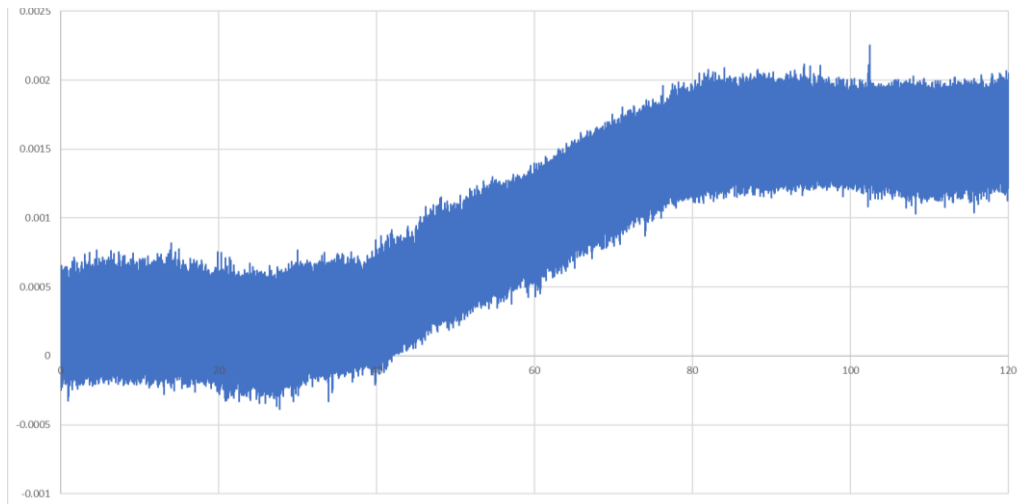
tak, aby nedošlo k ovlivnění experimentu vlivem opotřebení nástroje. Ukázkou vytvořeného kotouče materiálu je možné vidět na Obr. 50.

Tab. 9 Návrh ověřovacího experimentu

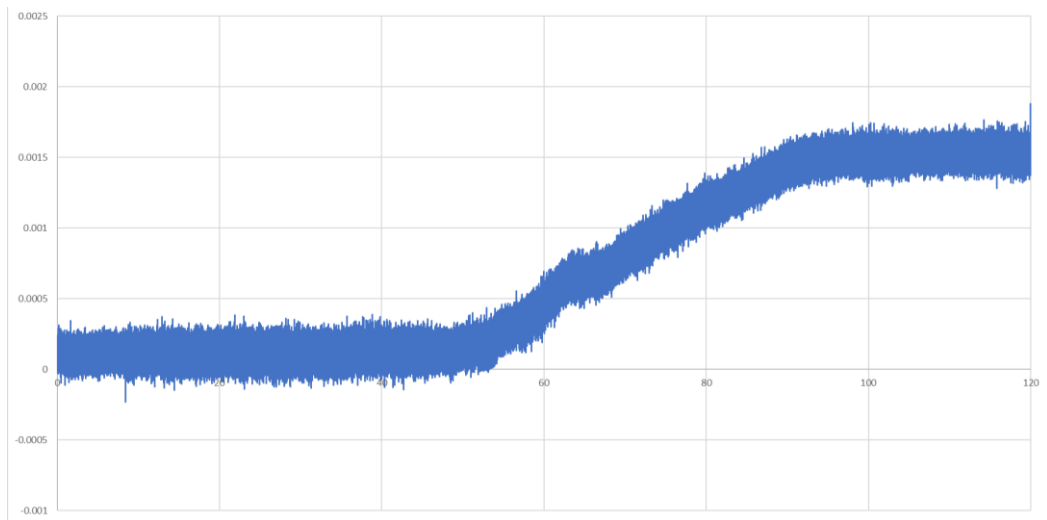
Číslo měření	v_c [m·min ⁻¹]	f [mm/ot]	a_p [mm]
1	150	0,05	4
2		0,1	4
3		0,15	4
4		0,2	4
5		0,3	4
6	100	0,15	4
7	150		4
8	200		4
9	250		4
10	300		4

6.4.2 Průběh měření

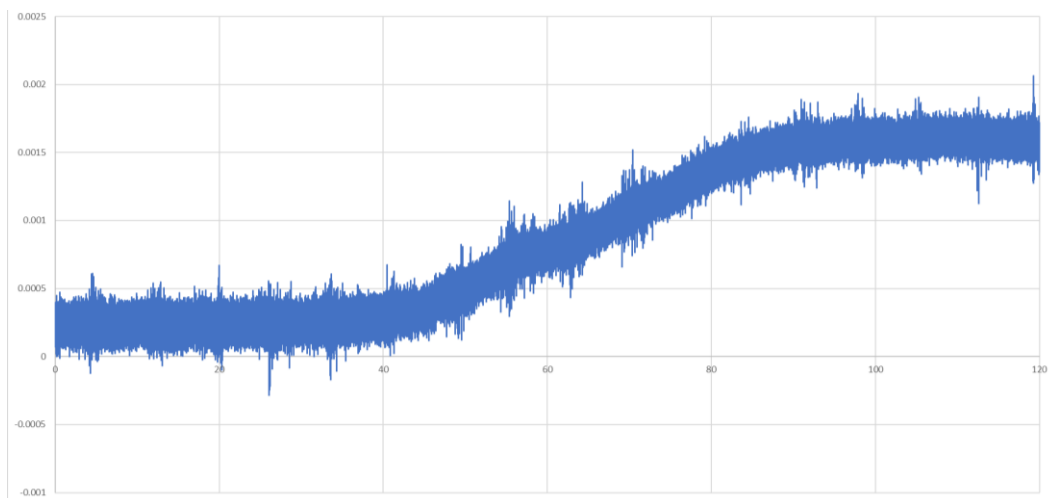
Prvním krokem tohoto experimentu bylo umístění celé měřicí soustavy do obráběcího stroje, což obnášelo izolaci obrobku ve sklíčidle a na podpěrném koníku, dále protažení stíněného vodiče skrz vrtací otvor vřetena stroje, připojení přípravku pro držení rotačního konektoru, a nakonec propojení stíněných vodičů přes rotační konektor a od nástroje do měřicí karty. Po této montáži byl však při měření zjištěn signálový šum, který by mohl překrývat záznam termoelektrického napětí od teploty řezání, viz Obr. 47. Částečně byl tento šum eliminován připojením zemnicího vodiče na uzemnění měřicího zařízení. Záznam měření po uzemnění měřicího zařízení je uveden na Obr. 48. Jak je z obrázku vidět, uzemnění kostry měřicího zařízení má relativně velký vliv na velikost amplitudy vznikajícího šumu. Tento šum tak nebyl zcela eliminován, ale byl významně snížen do té míry, že bylo možné ho softwarově odfiltrovat bez rizika ztráty měřených dat. Následně byly provedeny testy s uzemněním jednotlivých větví soustavy. Tyto testy se ale nakonec ukázaly jako bezvýsledné. Amplituda vznikajícího šumu naopak mírně stoupla, což je patrné z Obr. 49, z tohoto důvodu bylo od uzemnění částí obvodu upuštěno.



Obr. 47 Záznam ohřevu v čase po vložení měřicí soustavy do obráběcího stroje

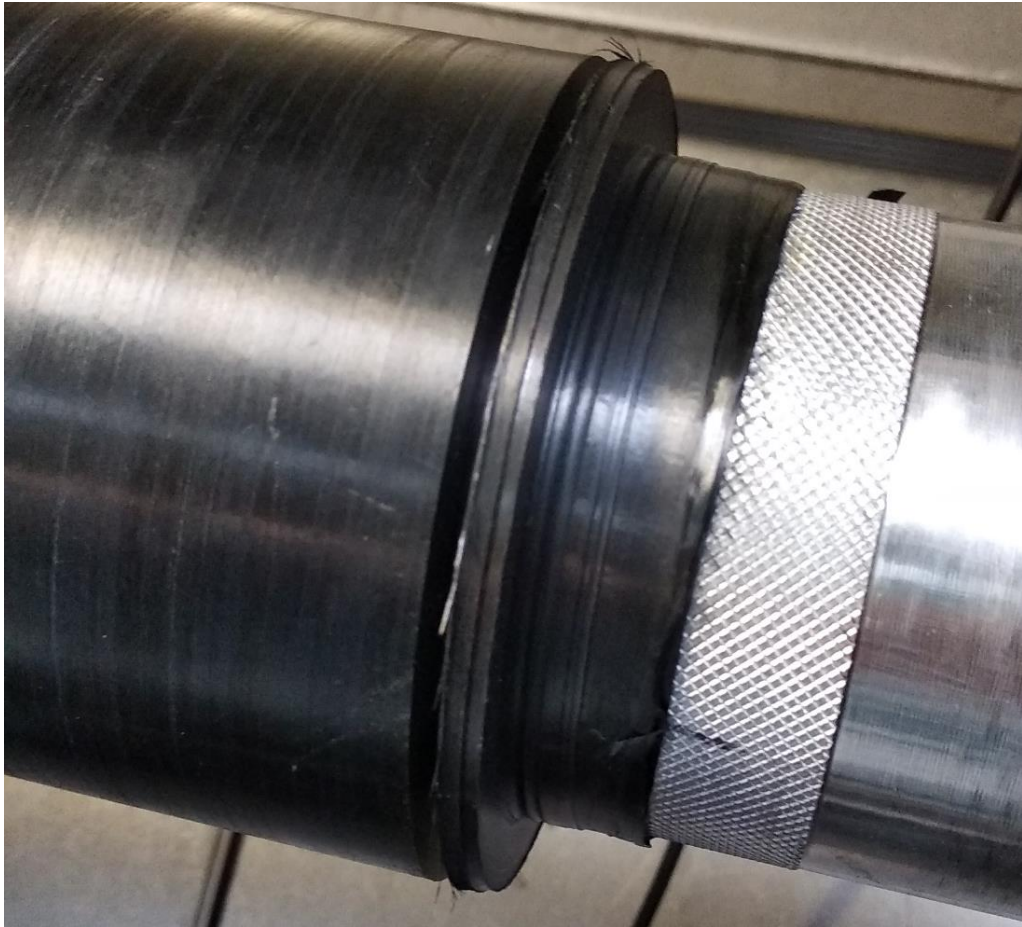


Obr. 48 Záznam ohřevu v čase po uzemnění měřicího zařízení



Obr. 49 Záznam ohřevu v čase po uzemnění jedné z větví obvodu termočlánku

Po snížení amplitudy šumu na minimum byla provedena úprava obráběného materiálu pro měření, která spočívala ve vytvoření kotouče o šířce 4 mm pomocí zapichovacího nože. Tato výroba probíhala tak, že pomocí zapichovacího nože byla nejprve zarovnána pravá čelní strana navinutého kompozitu a následně byl vytvořen zápich tak, aby vznikl kotouč materiálu o šířce 4 mm a výšce 10 mm. Vytvoření zápichu o šířce 3 mm bylo implementováno z toho důvodu, aby měřená data nebyla ovlivněna rádiusem na levé straně břitové destičky.

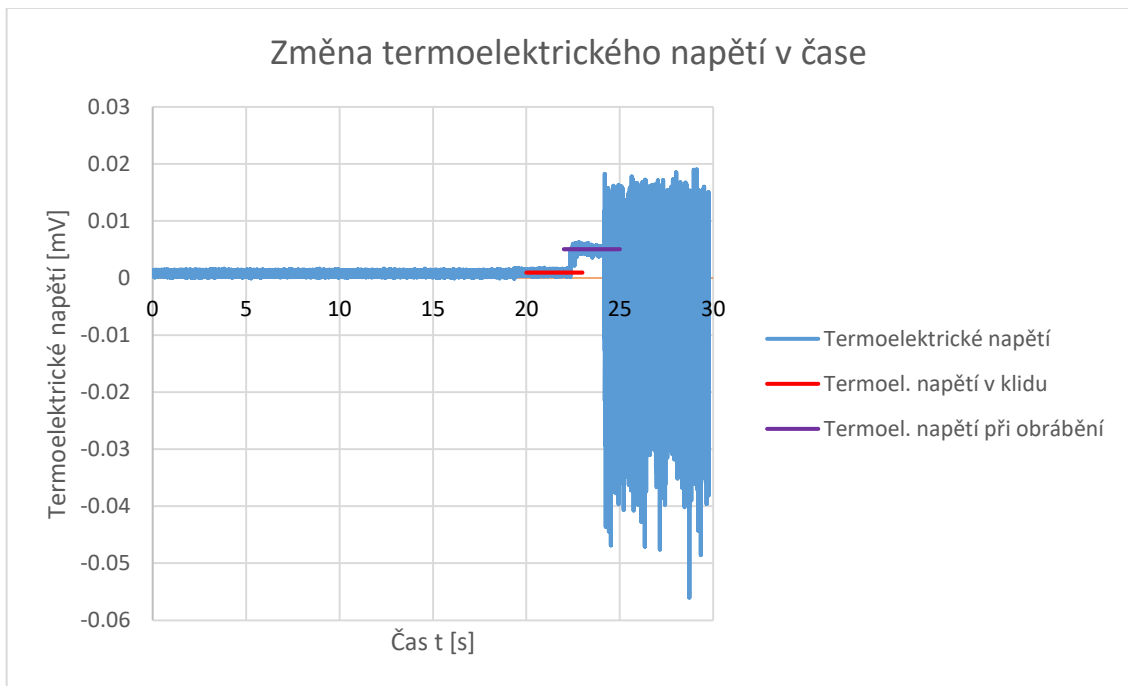


Obr. 50 Kotouč připravený k měření

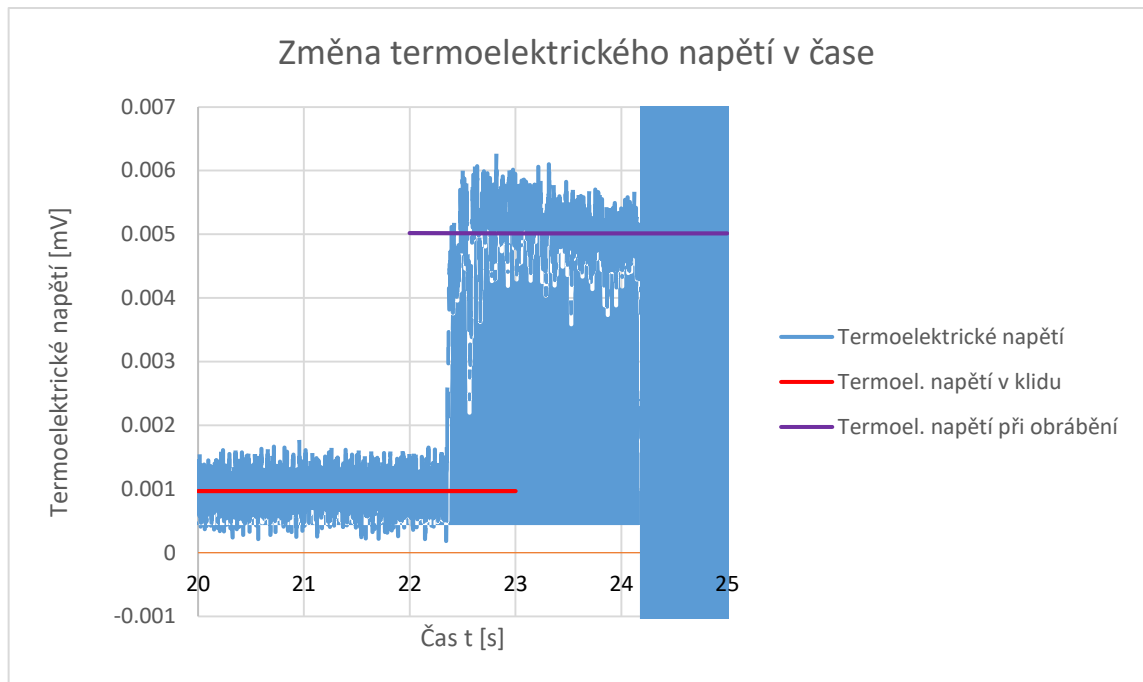
Po vytvoření kotouče byly do připraveného NC programu nastaveny řezné parametry podle Tab. 9 tak, aby na každém kotouči byla naměřena tři měření řezných podmínek.

6.4.3 Zpracování dat experimentu

Data z měřicí karty byla zaznamenána ve formě dvou sloupců hodnot, kdy v prvním sloupci byl uveden čas a v druhém sloupci termoelektrické napětí z termočlánku. Z těchto dat byla následně vytvořena grafická závislost, viz Obr. 51. Na tomto obrázku je možné sledovat celý záznam měření při rezné rychlosti 150 m/min a při posuvu 0,2 mm. Záznam začíná při doteku nástroje s obrobkem za klidu stroje a trvá do přibližně 22. sekundy. Hodnotu napětí v klidu stroje reprezentuje v grafu červená přímka. Tuto hodnotu lze považovat za nulovou hodnotu pro vyhodnocení velikosti teploty řezání. Následně je možné vidět zvýšení tohoto napětí mezi 22. a 24. sekundou, což je způsobeno zvýšením teploty při obrábění. Toto zvýšení je znázorněno fialovou přímkou. Po ukončení měření došlo k rozpojení elektrického obvodu odjezdem nástroje z místa řezu, což se projevilo výrazným šumem s amplitudou o velikosti kolem 0,07 mV. Na Obr. 52 je část záznamu, z níž byla teplota řezání vyhodnocena.



Obr. 51 Záznam termoelektrického napětí z měřicí karty NI 9239



Obr. 52 Část záznamu obsahující hledané termoelektrické napětí

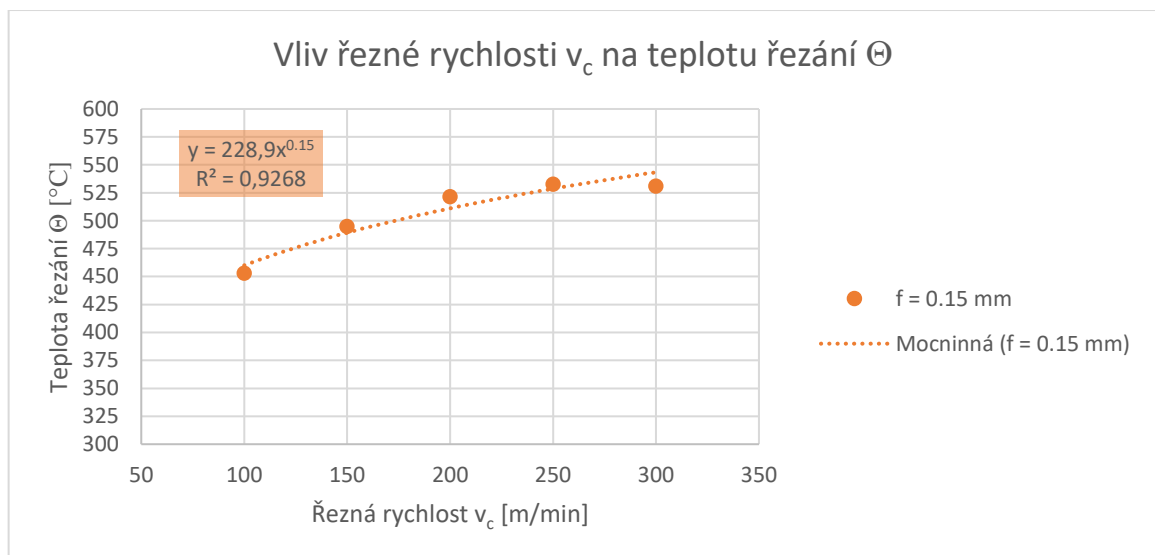
Data získaná z tohoto záznamu byla následně vyhodnocena pomocí kalibrační křivky a zaznamenána do tabulky. Následně byly graficky znázorněny závislosti teploty řezání na jednotlivých řezných podmínkách.

6.4.4 Vyhodnocení experimentu

Experiment sledoval závislost teploty řezání na dvou proměnných řezných parametrech, a to na řezné rychlosti a na posuvu. Velikosti teplot řezání pro jednotlivá měření jsou uvedena v Tab. 10. Graficky znázorněné hodnoty jednotlivých měření jsou uvedeny v Obr. 53.

Tab. 10 Tabulka naměřených hodnot teploty řezání

Číslo experimentu	v_c [m·min ⁻¹]	f [mm/ot]	1. měření	2. měření	Průměr	Směrodatná odchylka
1	150	0,05	447,49	491,97	469,73	
2		0,1	489,20	494,92	492,06	
3		0,15	472,39	522,07	497,23	10,08
4		0,2	499,71	500,20	499,95	
5		0,3	537,04	515,57	515,57	
6	100	0,15	448,74	457,04	452,89	
7	150		489,14	500,34	494,74	10,08
8	200		524,44	518,50	521,47	
9	250		539,24	525,88	532,56	
10	300		535,79	526,34	531,07	

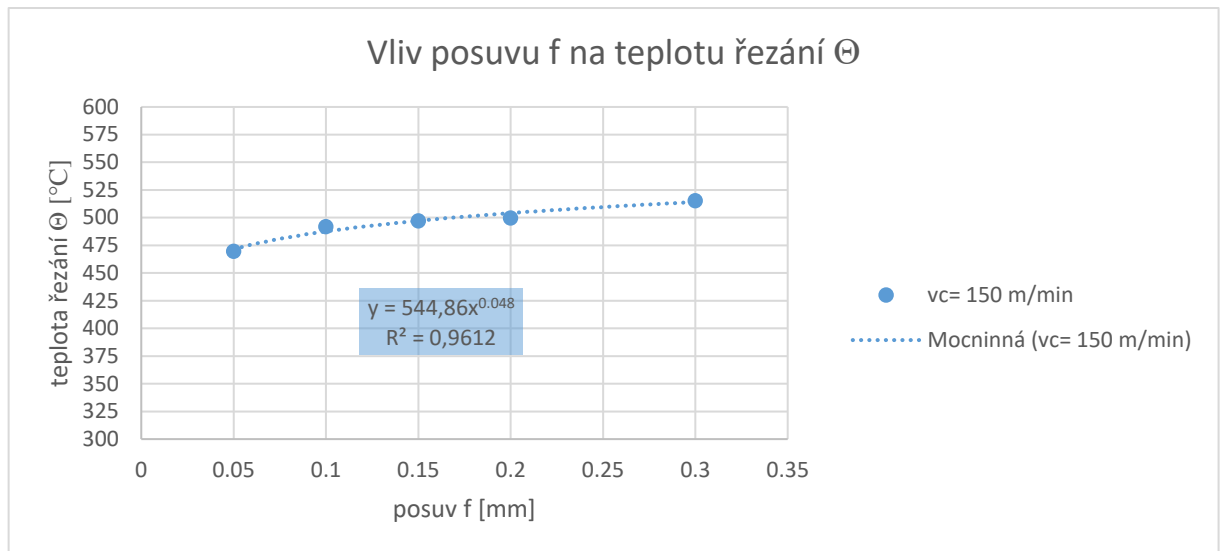


Obr. 53 Graf závislosti teploty řezání Θ na řezné rychlosti v_c

Z této grafické závislosti je patrné, že řezná rychlost má na velikost teploty řezání vliv. Teplota řezání roste spolu s řeznou rychlostí s mocninnou závislostí. Rovnici popisující tuto závislost uvádím níže, viz vztah (6.2).

$$\theta = 228,9 \times v_c^{0,15} \quad (6.2)$$

Druhá sada řezných podmínek byla složena z jedné hodnoty řezné rychlosti a pěti hodnot posuvu, jak bylo zmíněno v návrhu experimentu. Závislost teploty řezání na posuvu: Obr. 54.



Obr. 54 Graf závislosti teploty řezání Θ na posuvu f

Grafické znázornění (Obr. 54) zachycuje vliv posuvu na velikost teploty řezání. Ukazuje též, že teplota řezání roste spolu s rostoucím posuvem s mocninnou závislostí. Rovnice popisující tuto závislost je níže, viz vztah (6.3).

$$\theta = 544,86 \times f^{0,048} \quad (6.3)$$

Kde:

- Θ je teplota řezání (°C),
- f je posuv (mm/ot).

6.4.5 Shrnutí

V této části vlastního experimentu byla na základě naměřených hodnot dokázána závislost teploty řezání na posuvu a řezné rychlosti při zapichovacím soustružení polymerního materiálu PEEK s výztuží ve formě uhlíkových vláken. Pro potřeby měření teplot řezání byl navržen přirozený termočlánek, složený ze sestavy řezného nástroje, obráběného materiálu, přípravků a soustavy propojených vodičů. Pro tento termočlánek byl navržen způsob vytvoření kalibrační křivky. Sestával z ohřevu přirozeného termočlátku spolu s umělým termočlátkem typu „K“ pomocí horkovzdušné opalovací pistole a záznamu naměřených hodnot. Hodnota dosažené teploty byla při ohřevu

zkontrolována pomocí přesného teploměru. Tento způsob cejchování se v praxi osvědčil, opakovaně byla totiž naměřena totožná kalibrační křivka.

Po vložení sestavy termočlánu do stroje a prvním pokusném měření se ovšem vyskytla celá řada potíží, ke kterým by u kovových materiálů nedocházelo. Jedná se především o velmi malé hodnoty termoelektrického napětí, což bylo také spojeno s problémem relativně vysokého šumu v záznamu. Tento by při měření vysokých termoelektrických napětí u kovových materiálů byl zanedbatelný, kdežto zde u materiálů kompozitních se jednalo o šum zakrývající celé měření. Šum byl postupně odstraněn dokonalou izolací nástroje a obrobku od obráběcího stroje, dále uzemněním šasi měřicí karty, a nakonec použitím odstíněných vodičů pro propojení jednotlivých částí termočlánu s měřicí kartou.

Po odstranění všech problémů a nedostatků byl proveden samotný experiment, jehož cílem bylo potvrdit, či vyvrátit závislost teploty řezání na řezné rychlosti a posuvu. Naměřená data odpovídala svým průběhem teoretickým předpokladům o obrábění pro jiné technické materiály, tedy že teplota řezání roste jak s řeznou rychlostí, tak s posuvem a že v závislosti na řezné rychlosti roste teplota řezání více než v závislosti na posuvu. Z těchto dat byly dále vytvořeny rovnice popisující průběh teplot řezání v závislosti na výše zmíněných dvou řezných parametrech. Rovnice popisující vliv řezné rychlosti na teplotu řezání: $\Theta = 228,9 \times v_c^{0,15}$. Rovnice popisující vliv posuvu: $\Theta = 544,86 \times f^{0,048}$.

Výše teplot vznikajících během řezání naměřených v tomto experimentu za určitých řezných podmínek byla s ohledem na teplotu tavení polymerní matrice pro použitý materiál hraniční, neboť zde docházelo ke vzniku teplot vyšších, než je jeho teplota tavení. To bylo patrné už při samotném obrábění, neboť třísky vzniklé během něho byly znatelně poškozené vlivem příliš vysokých teplot.

6.5 Experiment zkoumající silové jevy

Tento experiment byl zaměřen na stanovení vlivu řezných parametrů na velikost sil vznikajících při zapichovacím soustružení kompozitního materiálu PEEK-T300.

6.5.1 Návrh experimentu

Tento experiment byl realizován ve stejných pracovních podmínkách a jeho průběh byl měřen za stejných podmínek jako experiment pro ověření funkčnosti přirozeného termočlánku, tedy ve dvou sadách s využitím pěti posuvů a pěti rezných rychlostí při konstantní hloubce řezu 4 mm.

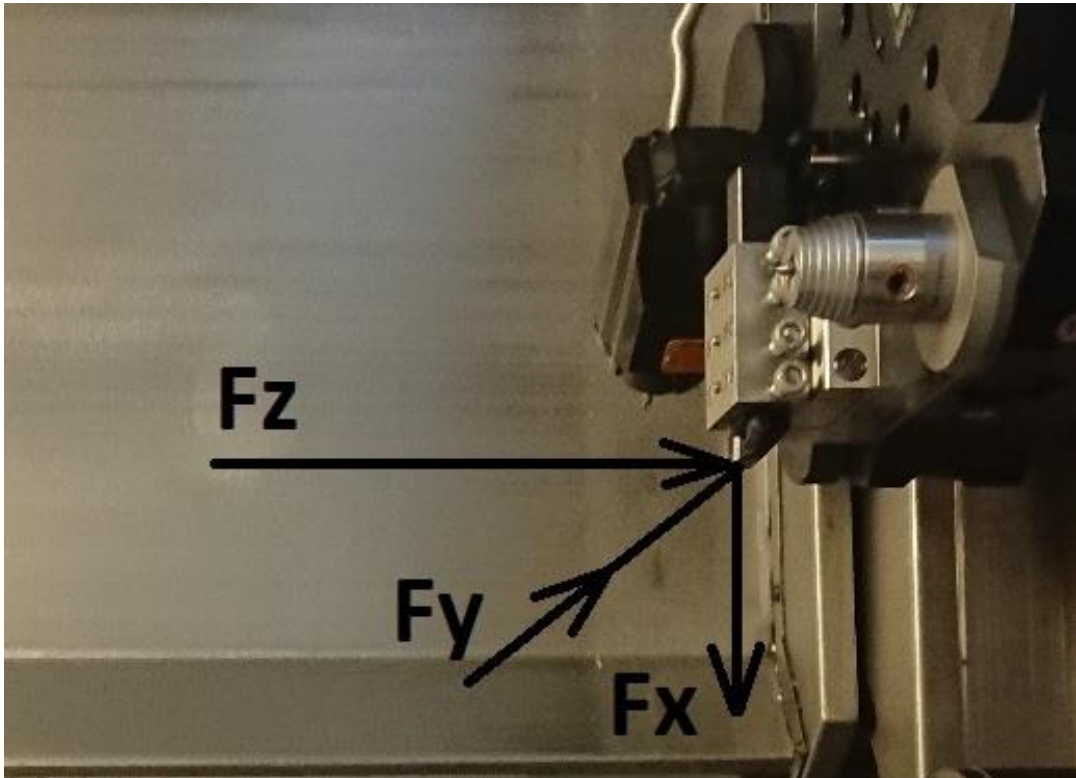
6.5.2 Průběh měření

Prvním krokem měření bylo ověření správné funkce dynamometru. To bylo provedeno digitální ruční závěsnou vahou ve všech osách dynamometru. Po ověření správnosti měření dynamometru byl též před každým měřením materiál upraven zapichovacím nožem. Data naměřená dynamometrem byla následně zaznamenávána na notebook, kde byla vyhodnocena pomocí specializovaného softwaru Dynoware. Vyhodnocení těchto dat je obsahem následující kapitoly.

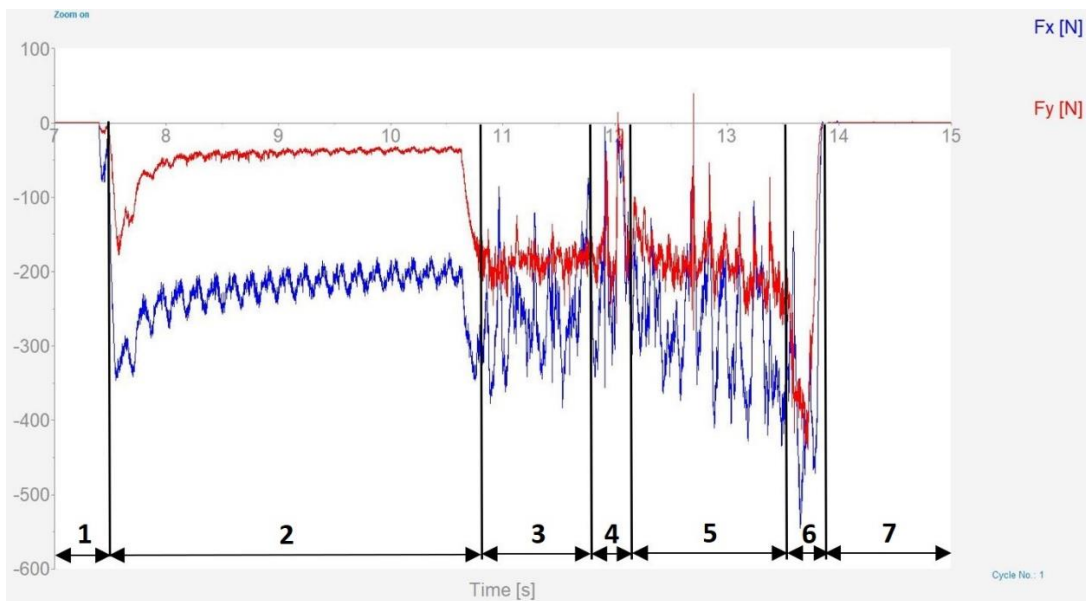
6.5.3 Zpracování dat experimentu

Pomocí dynamometru byly změřeny dvě složky síly, a to rezná síla F_c korespondující se směrem osy dynamometru „y“ a síla posuvu F_f , která korespondovala se směrem osy dynamometru „x“, souřadný systém dynamometru je zachycen na Obr. 55. Orientace os dynamometru byla ovšem opačná vůči působení jednotlivých složek sil, proto v záznamu rostou tyto síly do záporných hodnot. Typický průběh záznamu těchto sil je patrný na Obr. 56. Tento záznam je možné rozporcovat na sedm částí, z nichž nejdůležitější pro vyhodnocení jsou tři, a to část jedna, sedm a tři. Okrajové části jedna a sedm jsou důležité z toho důvodu, že jde o nulové hodnoty záznamu, od kterých je odečítána velikost sil, což je možné vidět v části tři. Dále je možné v části dva vidět posun rezného nástroje na vnější obvod kotouče a škrtnutí nástroje o povrch tohoto kotouče. Jelikož zde už dochází k obrobení malé vrstvy kompozitu a následnému tření o povrch, významně se zvýší síly, které postupně klesají podle toho, jak postupně dochází ke snížení tření. Samotné obrábění nastává v oblasti tři až šest. Oblast tři byla, jak už bylo řečeno, použita pro samotné vyhodnocení sil. V oblasti čtyři dochází k velkému poklesu sil, což je s největší pravděpodobností způsobeno odtrhnutím celé navinuté vrstvy kompozitu, takže nástroj

během krátké chvíle není v kontaktu s materiálem. Následuje oblast pět, kde dochází opět k obrábění, a nakonec dochází opět k významnému zvýšení sil z důvodu odebrání zbytku materiálu z předchozího kotouče. Po obrobení se opět nástroj přesouvá do koncové pozice mimo obrobek, tudíž dochází k poklesu sil na nulovou hodnotu, viz poslední oblast sedm.



Obr. 55 Souřadný systém dynamometru



Obr. 56 Záznam sil z dynamometru

6.5.4 Vyhodnocení dat experimentu

Vyhodnocení vstupních dat ze softwaru Dynoware bylo provedeno v programu MS Excel. V tomto programu byly následně sestaveny tabulky naměřených hodnot řezné síly a síly posuvu, viz Tab. 11 a Tab. 12.

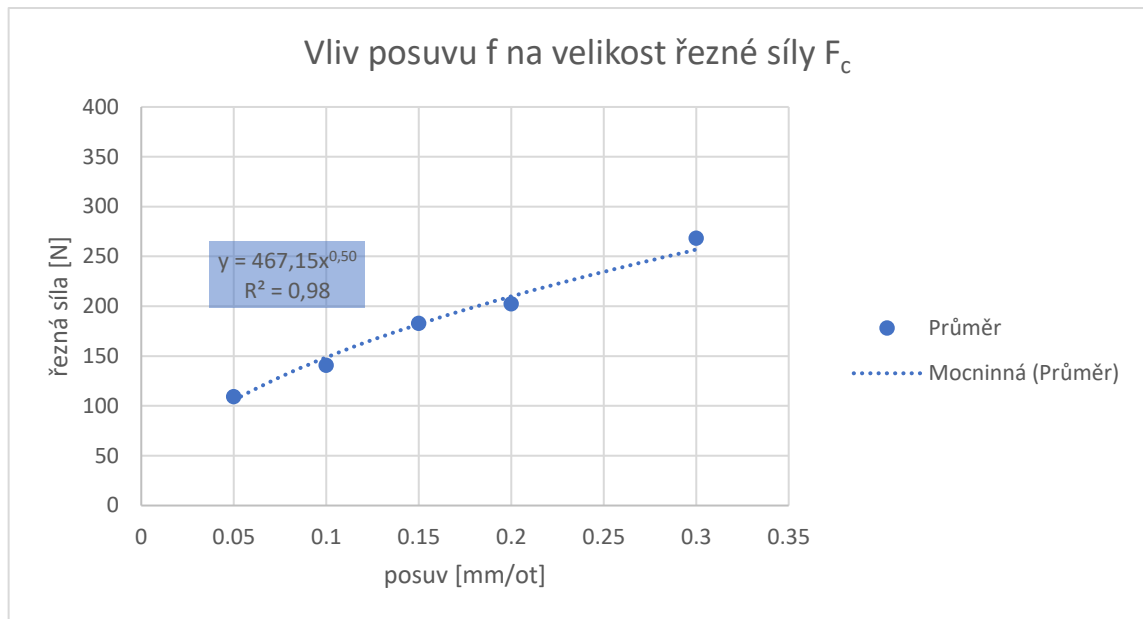
Tab. 11 Tabulka naměřených hodnot řezné síly

Číslo experimentu	v_c [m·min ⁻¹]	f [mm/ot]	1. měření	2. měření	Průměr	Směrodatná odchylka
1	150	0,05	104	115	109,5	
2		0,1	131	151	141	
3		0,15	171	181	183	7,8
4		0,2	190	215	202,5	
5		0,3	264	273	268,5	
6	100	0,15	187	193	190	
7	150		171	181	183	7,8
8	200		167	171	169	
9	250		175	173	174	
10	300		169	170	169,5	

Tab. 12 aměřené hodnoty síly posuvu

Číslo experimentu	v_c [m·min ⁻¹]	f [mm/ot]	1. měření	2. měření	Průměr	Směrodatná odchylka
1	150	0,05	235	302	268,5	
2		0,1	174	322	248	
3		0,15	287	343	315	45,9
4		0,2	91	338	214,5	
5		0,3	131	340	235,5	
6	100	0,15	267	371	319	
7	150		287	343	315	45,9
8	200		134	259	245,3	
9	250		207	363	285	
10	300		199	375	287	

Tato naměřená data byla dále zaznamenána do grafických závislostí. Vliv posuvu na velikost řezné síly je možné vidět na Obr. 57. Z tohoto grafu je patrné, že velikost řezné síly roste s posuvem s mocninnou závislostí. Rovnici popisující tuto závislost je možné vidět níže, viz vztah (6.4).



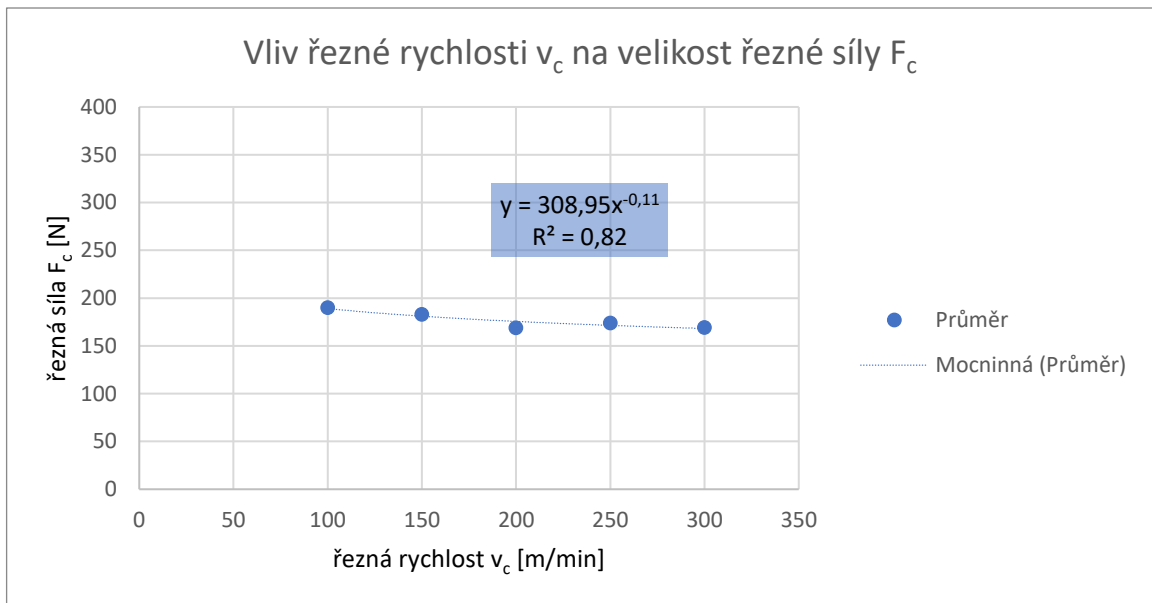
Obr. 57 Graf závislosti řezné síly F_c na posuvu f

$$F_c = 467,15 \times f^{0,50} \quad (6.4)$$

Kde:

- F_c je řezná síla (N),
- f je posuv (mm/ot).

Vliv řezné rychlosti v_c na velikost řezné síly F_c je možné vidět na Obr. 58. Z tohoto grafu je patrné, že velikost řezné síly s rostoucí řeznou rychlostí klesá s mocninnou závislostí. Tento vliv ovšem není tak velký jako v případě posuvu, což vyjadřuje rovnice (6.5).



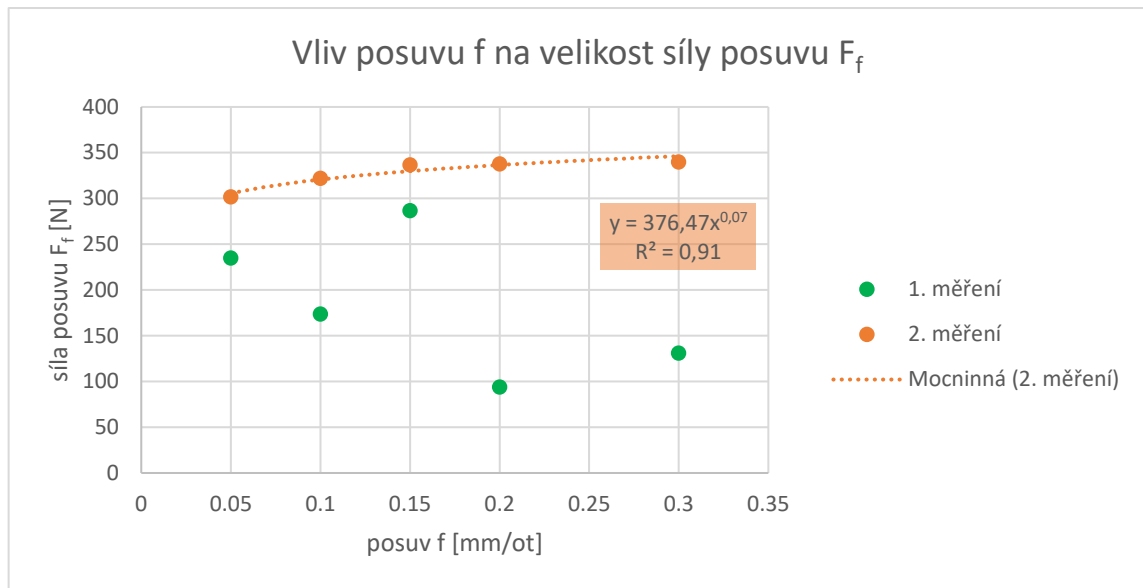
Obr. 58 Graf závislosti řezné síly F_c na řezné rychlosti v_c

$$F_c = 308,95 \times v_c^{-0,11} \quad (6.5)$$

Kde:

- F_c je řezná síla (N),
- v_c je řezná rychlost (m/min).

Z Obr. 59 je patrný vliv posuvu na velikost síly posuvu. Lze vyčíst, že během prvního opakování testu došlo pravděpodobně k obrábění v silně nehomogenní oblasti materiálu, případně se zde mohla vyskytovat jiná vada zapříčínující takto velký pokles sil, jelikož tento průběh sil nekoreluje s předpokládanými výsledky průběhu vývoje této složky síly v teorii obrábění. Naměřené hodnoty při druhé opakování našeho experimentu přibližně odpovídají průběžným výsledkům zjišťování závislosti experimentálně naměřeným pro jiné technické materiály. Rovnici popisující závislost síly posuvu na posuvu je možné vidět níže, viz vztah (6.6).



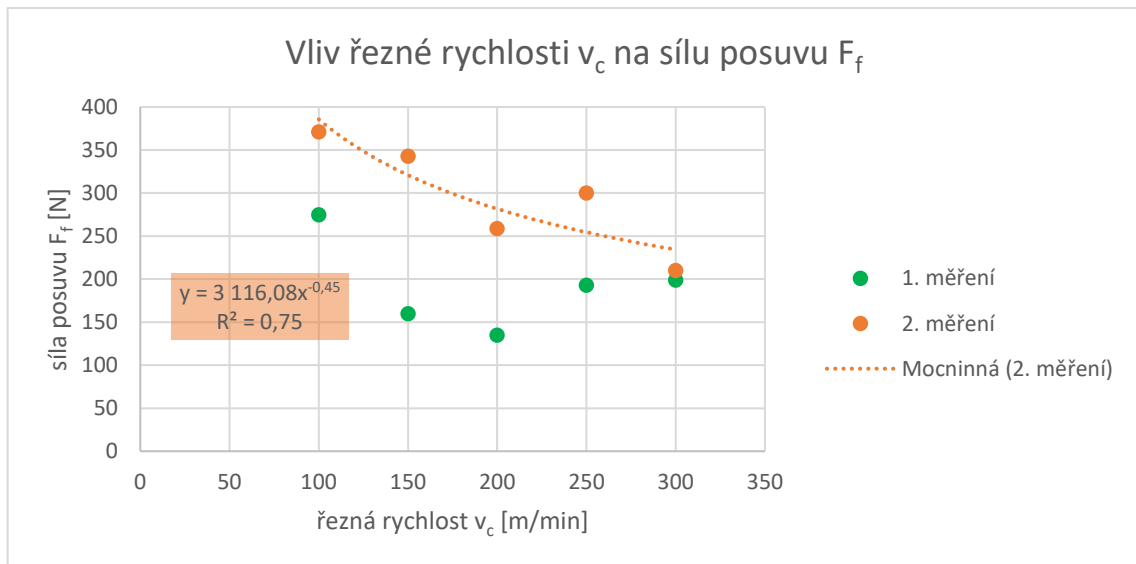
Obr. 59 Graf závislosti síly posuvu F_f na posuvu f

$$F_f = 376,47 \times f^{0,07} \quad (6.6)$$

Kde:

- F_f je síla posuvu (N)₂
- f je posuv (mm/ot)₂

Z Obr. 60 lze odvodit vliv řezné rychlosti v_c na velikost posuvové složky síly řezání. Zde došlo ke stejnému problému jako v případě měření vlivu posuvu na posuvovou složku síly, totiž že jednotlivé vrstvy materiálu neměly mezi sebou dostatečné adhezní síly a při obrábění docházelo k odtržení celé navinuté vrstvy místo jejího obrobení. U druhého opakování experimentu je možné vidět klesající trend závislosti síly posuvu na řezné rychlosti. Rovnice popisující tuto závislost je níže, viz vztah (6.7).



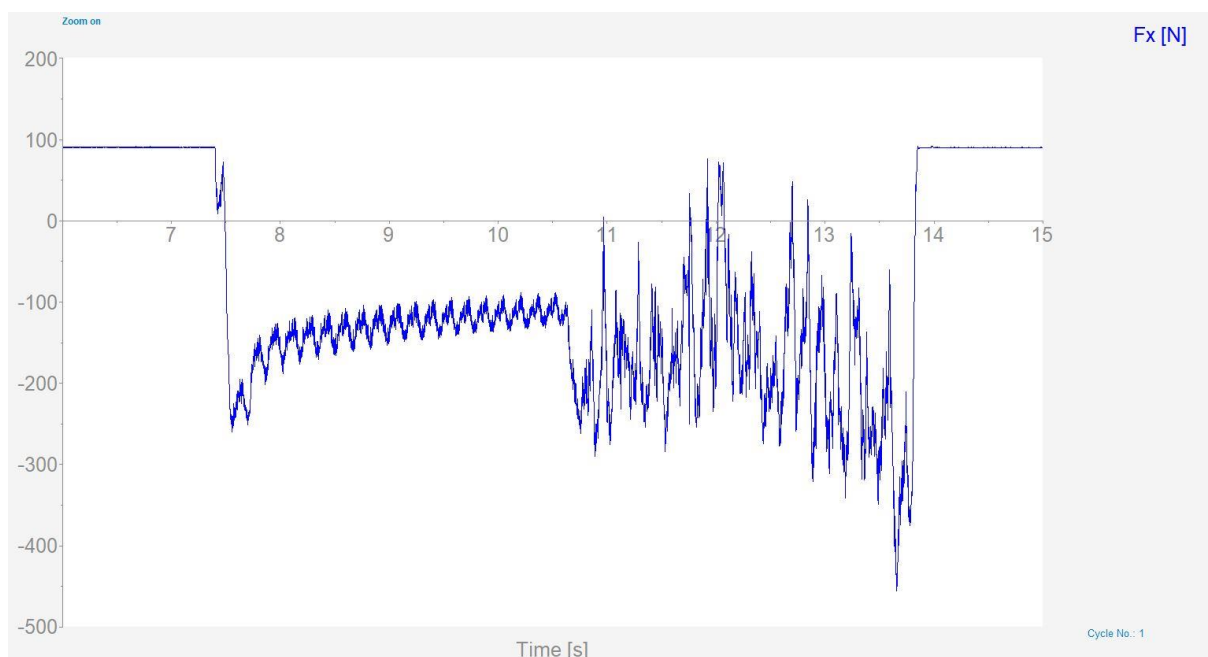
Obr. 60 Graf závislosti síly posuvu F_f na řezné síle v_c

$$F_f = 3116,08 \times v_c^{-0,45} \quad (6.7)$$

Kde:

- F_f je síla posuvu (N),
- v_c je řezná rychlost (m/min).

Jak lze odvodit z přiložených grafů průběhu závislosti síly posuvu na řezných podmínkách, nepodařilo se prokázat žádnou závislost síly posuvu na řezných podmínkách navzdory tomu, že průběh této složky síly by měl mít podobný charakter jako průběh řezné síly. Tento výsledek byl pravděpodobně způsoben velkou nehomogenitou obráběného materiálu a také tím, že při odebrání materiálu docházelo zároveň k odvíjení jednotlivých navinutých vrstev, takže nástroj chvílemi nebyl pravděpodobně v kontaktu s obráběným materiálem, což mělo za následek silné kolísání této složky síly. Tento výsledek potvrzuje i záznam dat, viz Obr. 61. Síly v tomto záznamu velice kolísají a nelze nalézt stabilní část záznamu vhodnou k vyhodnocení, na několika místech dosahují dokonce nulových hodnot.



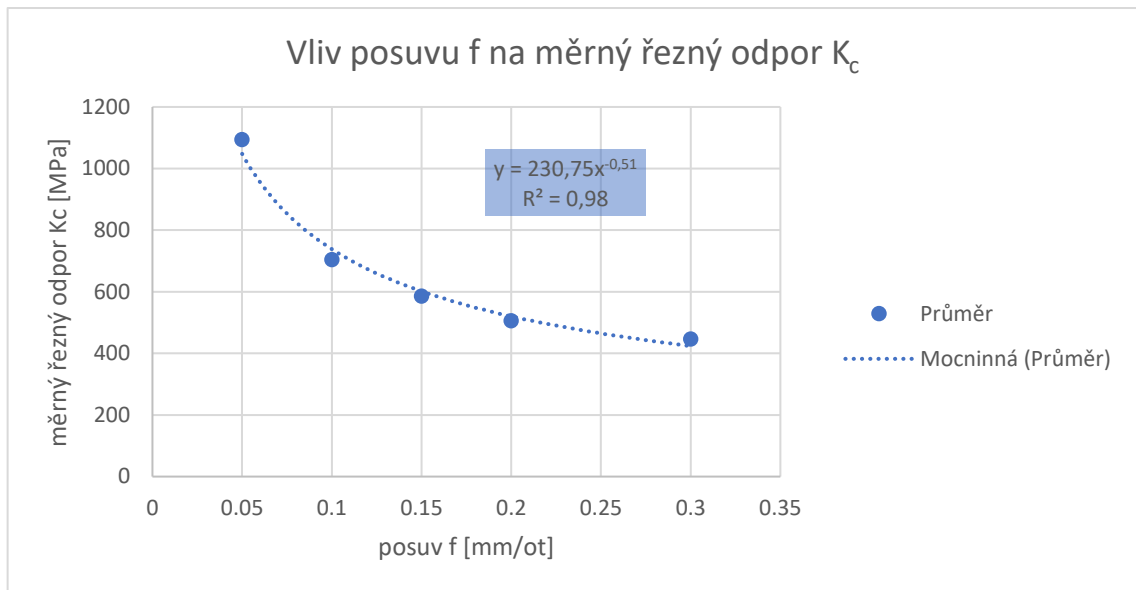
Obr. 61 Ukázka záznamu síly vyvolané posuvem

6.5.5 Výpočet měrného řezného odporu

Jak již bylo řečeno dříve, měrný řezný odpor je v podstatě řezná síla F_c , vztažená na jednotku plochy odřezávané vrstvy a slouží k posouzení obráběných materiálů z hlediska jejich obrobitelnosti. Vliv posuvu na velikosti měrné řezné síly získané zapichovacím soustružením polymerního materiálu PEEK s vyztužujícími uhlíkovými vlákny je zanesen do Tab. 13. Grafickou závislost těchto hodnot na posuvu dokládá Obr. 62.

Tab. 13 Tabulka vypočítaných hodnot měrného řezného odporu K_c

Číslo experimentu	v_c [m·min ⁻¹]	f [mm/ot]	1. měření	2. měření	Průměr
1	150	0,05	1040	1150	1095
2		0,1	655	755	705
3		0,15	570	603,3	586,7
4		0,2	475	537,5	506,25
5		0,3	440	455	447,5



Obr. 62 Vliv posuvu na velikost měrného řezného odporu

Jak je z grafu patrné, velikost měrného řezného odporu klesá s rostoucím posuvem s mocninnou závislostí, což je průběh shodný s teoretickými předpoklady obrábění a výsledky v jiných odborných publikacích. Rovnice popisuje tuto závislost, viz vztah (6.8):

$$K_c = 230,75 \times f^{-0,51} \quad (6.8)$$

Kde:

- K_c je měrný řezný odpor (N/mm^2),
- f je posuv (mm/ot).

6.5.6 Shrnutí

V této části vlastního experimentu byly naměřeny hodnoty dokládající závislost jednotlivých složek síly řezání na řezné rychlosti a na posuvu při zapichovacím soustružení polymerního materiálu PEEK s výztuží ve formě uhlíkových vláken. K tomuto měření byl použit piezoelektrický dynamometr od firmy Kistler. Data z dynamometru byla zaznamenávána na notebook, kde byla také vyhodnocena pomocí specializovaného softwaru Dynoware. Z dat získaných během tohoto experimentu bylo v software MS Excel vytvořeno grafické schéma závislosti popisující vliv jednotlivých

řezných parametrů na velikost řezné síly a síly posuvu. Vliv posuvu na velikost řezné síly je vyjádřen rovnicí $F_c=467,15 \times f^{0,50}$. Řezná síla by dle všeobecných principů obrábění měla být nejvíce ovlivněna právě posuvem, což bylo potvrzeno i v tomto experimentu. Dále byla získána závislost řezné síly na řezné rychlosti. Vliv řezné rychlosti na velikost řezné síly je vyjádřen rovnicí $F_c=308,95 \times v_c^{-0,11}$. Řezná síla by dle teoretických znalostí měla s řeznou rychlostí klesat s mocninnou závislostí, což bylo v této práci též potvrzeno. Dále byl vyhodnocen vliv řezných parametrů na velikost síly posuvu. Vliv posuvu na velikost síly vyjadřuje rovnice $F_f=376,47 \times f^{0,07}$ a vliv řezné rychlosti na velikost síly rovnice $F_f=3116,08 \times v_c^{-0,45}$. Měření velikosti této složky síly bylo ale velice komplikované vzhledem k nehomogenitě materiálu a možné existenci vad materiálu, kvůli nimž docházelo k velkým výkyvům síly. Tyto problémy by pravděpodobně bylo možné z části eliminovat použitím větší hloubky řezu a delším záznamem měření.

Dále byl v tomto experimentu stanoven průběh měrného řezného odporu v závislosti na posuvu. Tento průběh popisuje rovnice $K_c=230,75 \times f^{0,51}$. Velikost měrného řezného odporu klesá s posuvem mocninné závislostí, což odpovídá průběhům pro jiné technické materiály.

7 Závěr

Tato práce se zaměřila na stanovení teplotních a silových jevů při soustružení polymerních materiálů s vyztužujícími vlákny a měla za úkol dosažení tří hlavních cílů. Prvním cílem práce bylo zpracování rešerše, zaměřené v první řadě na přehled, vlastnosti a způsob výroby kompozitních materiálů, dále na popis mechaniky tvorby třísky při obrábění, dále také na popis experimentálních metod studia silových a teplotních jevů při obrábění, a nakonec byl zmapován současný stav vědeckých poznatků na poli obrábění kompozitních materiálů s termoplastickou maticí. Druhým cílem této práce bylo stanovení vlivu řezné rychlosti a posuvu na velikost teploty řezání při zapichovacím soustružení polymerního materiálu PEEK s výztuží ve formě uhlíkových vláken. Aby bylo možné realizovat tento experiment, bylo nutné navrhnout, zkonstruovat a ocejchovat přirozený termočlánek, který byl následně při měření teploty řezání použit. Z dostupné literatury nebylo podobné řešení pro tento materiál nalezeno. Třetím cílem této práce bylo stanovení závislosti řezné rychlosti a posuvu na velikost jednotlivých složek síly řezání. K tomuto experimentu byl použit piezoelektrický dynamometr od firmy Kistler.

Z dat naměřených v první části vlastního experimentu bylo zjištěno, že použití přirozeného termočlánku pro měření teploty řezání u kompozitních materiálů s polymerní maticí je velice problémové z důvodu nízkých hodnot termoelektrického napětí, pro něž je nutné použít zařízení s velice vysokou citlivostí záznamu. Použití takového zařízení s sebou však nese riziko, že bude snímán též velký šum, proto je nutné ho odstranit uzemněním měřicího zařízení a použitím stíněných vodičů pro přenos signálu. Dále byla v tomto experimentu zjištěna závislost teploty řezání na řezné rychlosti a posuvu. Bylo zjištěno, že teplota řezání roste s oběma řeznými parametry s mocninou závislostí a že z těchto dvou parametrů má větší vliv na teplotu řezání řezná rychlost.

Jak již bylo řečeno, druhá část vlastního experimentu byla zaměřena na stanovení vlivu řezných parametrů na velikost jednotlivých složek síly řezání a na stanovení vlivu měrného řezného odporu na posuvu. Složky síly byly vzhledem k zapichovacímu soustružení dvě, a to řezná síla a síla posuvu. Zatímco u vyhodnocení velikostí řezných sil nedošlo k žádnému problému a všechna měření odpovídala svým průběhem teoretickým předpokladům, u jednoho ze dvou opakování síly posuvu naměřená závislost na řezných podmínkách těmto teoretickým předpokladům neodpovídala. Toto chování

bylo pravděpodobně způsobeno lokální vadou v obráběném materiálu v kombinaci s jeho silnou nehomogenitou.

Dále byla ze znalosti řezné síly a řezných podmínek stanovena závislost měrného řezného odporu na posuvu. Tato závislost měla mocninný průběh, kdy se zvyšujícím se posuvem klesala velikost měrného řezného odporu. Tento výsledek koreluje s výsledky jiných výzkumných prací na jiných technických materiálech.

Monitorování teplotních a silových jevů při soustružení kompozitních materiálů je stále velice neprobádaná oblast, která si ale vzhledem ke stále častějšímu využití kompozitních materiálů v průmyslu určitě zaslouží další výzkum.

8 Citovaná literatura

1. *Technologie výroby*. Prefa kompozity. [Online] [Citace: 10. 7 2019.] Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/>.
2. KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
3. MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02798-8.
4. *Cihlářství*. Wikipedia [online] [Citace: 18. 7 2019.]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Cihl%C3%A1%C5%99stv%C3%AD>
5. VONDRA, Nicol. *Historie a současnost hliněného stavitelství - 1. část*. Ekostavivo [online]. 2015 [cit. 2019-07-10]. Dostupné z: <http://www.ekostavivo.cz/historie-a-soucasnost-hlineneho-stavitelstvi-1-cast/>
6. *Polyetereterketon PEEK*. Tenart. [Online] [Citace: 18. 7 2019.] Dostupné z: <http://tenart.cz/technicke-plasty/produkty/polyetereterketon-peek/>.
7. *Polyamid PA 6, PA 66*. Tenart. [Online] [Citace: 18. 7 2019.] Dostupné z: <http://tenart.cz/technicke-plasty/produkty/polyamid-pa-6-pa-66/>.
8. DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha : Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
9. MIKULA, Martin. *Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken*. Brno, 2012. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Karel Němec.
10. EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha : Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
11. VAŇKOVÁ, Martina. *Vláknové kompozity. Jak se vyrábějí a kde najdeme jejich využití?* Talentica. [Online] [Citace: 18. 7 2019.] Dostupné z: <https://www.talentica.cz/vlaknove-kompozity/>.
12. *Uhlíkové vlákno*. Wikipedia. [Online] [Citace: 10. 7 2019.]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9_vl%C3%A1kno.

13. KOŘÍNEK, Zdeněk. *Vlákna. Kompozity*. [Online] 5. 4. 2009. [Citace: 16. 7 2019.] Dostupné z: <http://web.archive.org/web/20100401025714/http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>.
14. *Skleněná vlákna*. In: *Deposit Photos*. [Online] 13. 4 2011. [Citace: 16. 7 2019.] Dostupné z: <https://cz.depositphotos.com/5393457/stock-photo-fiber-glass.html>.
15. *Composite materials*. Gurit. [Online] [Citace: 13. 7 2019.] Dostupné z: <https://www.gurit.com/Our-Business/Composite-Materials>.
16. JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitu* Brno : Vydavatelství VUT, 2003. ISBN 80–214–2443–5.
17. *Black 12K Carbon Fiber Roving Yarn*. In: *Indiamart*. [Online] [Citace: 18. 7 2019.] Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/12k-carbon-fiber-roving-yarn-19916349833.html>.
18. *Pultruze (tažení)*. Prefa kompozity. [Online] [Citace: 18. 7 2019.] Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/pultruze-tazeni/>.
19. MÁDL, Jan a Jaroslav BARCAL. *Základy technologie II*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03733-1.
20. ADAMEC, Antonín a Martin KRBEC. *Obrábění*. ELUC. [Online] 28. 8 2015. [Citace: 5. 7 2019.] Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1183>.
21. BRYCHTA, Josef a kolektiv. *Technologie II. 1.díl*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8.
22. MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1990.
23. ADAMEC, Antonín a Martin KRBEC. *Vznik třísky a její druhy*. ELUC. [Online] 28. 8. 2015. [Citace: 5. 7 2019.] Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1190>.
24. HOUDEK, Josef a Karel KOUŘIL. Opotřebení břitů nástrojů ze slinutých karbidů. *MM Průmyslové Spektrum*. 2004, **2004**(12), 20. ISSN 1212-2572.
25. MÁDL, Jan. *Experimentální metody v teorii obrábění*. Praha : České vysoké učení technické, 1988.

26. MAŘÍK, Pavel. *Materiály pro výuku*. Sosasource. [Online] 2015. [Citace: 5. 07 2019.] Dostupné z: <https://www.sosasource.cz/img/upload/files/v%C3%BDuka/z%C3%A1kladn%C3%AD%20kovoo%20pr%C3%A1ce%201-50%202.pdf>.
27. DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Jak rozpoznat správné utváření třísek? *MM Průmyslové Spektrum*. 2012, **2012**(4), ISSN 1212-2572.
28. ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění*. Fakulta strojní, Technická univerzita Ostrava. [Online] 2011. [Citace: 10. 7 2019.] ISBN 978-80-248-2533-5.
Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrazeni.pdf.
29. MÁDL, Jan, a kolektiv. *Technologie obrábění I. díl*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
30. BRYCHTA, Josef, a kolektiv. *Technologie II. 2. díl*. Ostrava : Vydavatelství VŠB, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
31. SOUČEK, Jan. *Efektivní zhodnocení využívané nástrojové základny pro CNC obrábění*. Ostrava, 2013. Bakalářská práce. VŠB. Vedoucí práce Josef Brychta.
32. DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Jak je to s řeznými silami? *MM Průmyslové Spektrum*. 2012, **2012**(3), ISSN 1212-2572.
33. *Řezné geometrie CZ/SK – 2013*. SECO TOOLS. [Online] 2. 4 2013. [Citace: 6. 7 2019.] Dostupné z: <http://www.secotools.com/cs/CZ-Czech-Republic/Aktuality/Patrick-De-Vos---Odborny-cyklus/>.
34. HORT, Martin. *Technologické, ekonomické a ekologické aspekty obrábění s vysoce výkonným chlazením*. Brno, 2009. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Miroslav Píška.
35. ŠKOPEČEK, T, a kolektiv. *Základy Vysokorychlostního obrábění - HSC*. Plzeň : Vydavatelství ZČU, 2005. ISBN 80-704-3344-2.
36. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.

37. BUCKO, Michal. *Frézování vlákný vyztužených polymerů - silové účinky*. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Petr Mašek.
38. Kistler. *Test & Measurement Force and Strain: Measurement Equipment for Demanding T&M Applications*. Kistler. [Online] 2016. [Citace: 19. 7 2019.] Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=361&model=download>.
39. ADAMEC, Antonín a Martin KRBEC. *Silové poměry při procesu řezání, řezná síla a její složky*. Elektronická učebnice. [Online] 28. 8 2015. [Citace: 10. 7 2019.] Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1196>.
40. ZHOU, xiona. *An energy-consumption model for establishing energy-consumption allowance of a workpiece in a machining system*. Journal of Cleaner Production. 2016(135), 1580-1590. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.10.090. ISSN 0959-6526.
41. ŠPRINGL, Vít. *Měření teploty: polovodičové odporové senzory teploty*. Vývoj HW. [Online] [Citace: 10. 7 2019.] Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>.
42. *Welding Temperature Stik*. In: *Indiamart*. [Online] [Citace: 10. 7 2019.] Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/welding-temperature-stik-6606530497.html>.
43. *Typy pyrometrů*. Maryshfmmi. [Online] [Citace: 19. 7 2019.] Dostupné z: <http://www.maryshfmmi.webzdarma.cz/pmt.htm>.
44. *Jak funguje termovize?* NaPosed. [Online] [Citace: 10. 7 2019.] Dostupné z: <https://www.naposed.cz/cs/content/33-jak-funguje-termovize>.
45. *Termovizní kamera FLIR T640*. In: *Termogram*. [Online] [Citace: 10. 7 2019.] Dostupné z: <http://www.termogram.cz/termovizni-kamera-flir-t640>.
46. LIU, X. L., a kolektiv. *Cutting temperature and tool wear of hard turning hardened bearing steel*. Journal of Materials Processing Technology, Harbin, 2002(129). ISSN 0924-0136.
47. CEAU, G., Popovici, V. a CROITORU, S. *Researches about the temperature of the cutting edge in turning of unalloyed steel*. UPB Scientific Bulletin, 2010(72). ISSN 1454-2358.

48. DAVIM, J., P. a MATA, Francisco. *Chemical vapour deposition (CVD) diamond coated tools performance in machining of PEEK composites*. Almaden : Materials & Design, 2008(29). ISSN 0264-1275.
49. HADAFI, I, a kolektiv. *Optimization of cutting conditions for sustainable machining of PEEK-CF30 using TiN tools*. Almaden : Journal of Cleaner Production, 2012(33). 0959-6526.
50. CABRERA, F., M., FUENTES, D. a HANAFI, I. *Multi-criteria Optimization Using Taguchi and Grey Relational Analysis in CNC Turning of PEEK CF30*. Almaden : Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2011(25). ISSN 08927057.
51. MATA, F., a kolektiv. *Influence of cutting conditions on machinability aspects of PEEK, PEEK CF 30 and PEEK GF 30 composites using PCD tools*. Karnataka : journal of materials processing technology, 2009(209). 1980–1987.
52. SP 430. In: *Kovosvit MAS*. [Online] 2016. [Citace: 11. 7 2019.] Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/sp-430-p13.html#technicaldata>.
53. *E-Catalog*. In: *IMC-Companies*. [Online] 2019. [Citace: 11. 7 2019.] Dostupné z: <http://www.imc-companies.com/Tungaloy/tungaloycatalog/Item.aspx?cat=6808852&fnum=903&mapp=IS&GFSTYP=M>.
54. *Triangle Turning Insert, TPGN, 160308, Flat Top-T3130* In: *Grainer*. [Online] [Citace: 19. 7 2019.] Dostupné z: <https://www.grainer.com/product/TUNGALOY-Triangle-Turning-Insert-38UD18>.
55. *Měřicí vybavení KTO/RTI* In: *Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni*. [Online] [Citace: 6. 7 2019.] Dostupné z: https://www.kto.zcu.cz/o-katedre/Vybaveni_katedry/merici_vybaveni_KTO.html.
56. *Univerzální měřicí ústředna - datalogger - Ahlborn Almemo 5690-2M-Vícekanálová* In: *Ahlborn*. [Online] [Citace: 19. 7 2019.] Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/univerzalni-merici-ustredna-datalogger-ahlborn-almemo-5690-2m-vicekanalova.html>.

57. *Termočlánky s vysokoteplotní izolací* In: *Omega*. [Online] [Citace: 19. 7 2019.] Dostupné z: <https://www.omegaeng.cz/pptst/XC.html#description>.
58. *NI 9238 Datasheet*. National Instruments. [Online] 2 2016. [Citace: 16. 7 2019.] Dostupné z: http://www.ni.com/pdf/manuals/376138a_02.pdf.
59. *STEINEL HL 2010 E LCD horkovzdušná pistole 348212*. Nako. [Online] [Citace: 19. 7 2019.] Dostupné z: <https://www.nako.cz/2868-steinel-hl-2010-e-lcd-horkovzdušna-pistole-348212.html#!prettyPhoto>.
60. *MM02-02050-00: ROTAČNÍ KONEKTOR SÉRIE 205*. In: *Konektory Brno s.r.o.* [Online] [Citace: 11. 7 2019.] Dostupné z: <http://www.konektor-brno.cz/rotan-konektor-srie-205>.
61. *T300 Data sheet*. Torayca. [Online] [Citace: 19. 7 2019.] Dostupné z: https://www.toraycma.com/file_viewer.php?id=4462.
62. *Materiálový list PEEK*. Sittech. [Online] [Citace: 19. 7 2019.] Dostupné z: <http://www.sittech.cz/download/plasty/peek.pdf>.
63. AXMANOVÁ, Hana. *Moderní řezné nástroje pro zapichování a upichování*. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Miroslav Píška.

9 Seznam obrázků

Obr. 1 Uhlíkové vlákno v porovnání s lidským vlasem (12)	15
Obr. 2 Ukázka tkaniny ze skleněných vláken (14).....	15
Obr. 3 Ukázka výroby dílců ručním kladením (15)	17
Obr. 4 Ukázka výroby dílců nástřikem (15).....	17
Obr. 5 Výroba lisováním ve vakuu (15).....	18
Obr. 6 Ukázka dlouhých vláken neboli rovingů (17).....	19
Obr. 7 Ukázka technologie navíjení kompozitu (15)	19
Obr. 8 Ukázka procesu pultruze (18)	20
Obr. 9 Oblast primární plastické deformace (24).....	21
Obr. 10 Příklad oblasti vhodného utváření třísky (27).....	22
Obr. 11 Přehled vhodnosti utváření třísek (28)	23
Obr. 12 Působení síly řezání F proti řeznému odporu R při ortogonálním řezání (22)	23
Obr. 13 Rozložení sil při vázaném řezání (30).....	24
Obr. 14 Rozložení sil při volném řezání (29).....	25
Obr. 15 Vliv geometrie břitu nástroje na velikost sil při obrábění (33)	26
Obr. 16 Vliv řezných podmínek na velikost sil při obrábění (33).....	26
Obr. 17 Odvod tepla z místa řezu (34)	28
Obr. 18 Vliv řezné rychlosti na množství odváděného tepla jednotlivými komponenty (35) .	29
Obr. 19 Schematická ukázka piezoelektrického jevu (38).....	33
Obr. 20 Příklad časového záznamu příkonu obráběcího stroje (40)	34
Obr. 21 Ukázka zapojení přirozeného termočlánku	36
Obr. 22 Ukázka zapojení umělého termočlánku	37

Obr. 23 Ukázka zapojení poloumělého termočlánku	38
Obr. 24 Schéma měření teploty v oblasti primární plastické deformace (25).....	38
Obr. 25 Změna el. odporu termistoru NTC v závislosti na teplotě v porovnání s niklem a platinou (41)	39
Obr. 26 Indikační tužka (42)	40
Obr. 27 Ukázka přenosného pyrometru (43).....	40
Obr. 28 Ukázka termokamery FLIR T640 (45)	41
Obr. 29 Zapojení přirozeného termočlánku, který použil X.L. Liu (46).....	42
Obr. 30 Zapojení přirozeného termočlánku použitého Gheorgem Ceau (47).....	43
Obr. 31 Vliv posuvu na velikost řezných sil (48)	45
Obr. 32 Stroj SP430 (52).....	48
Obr. 33 Nástroj upravený pro měření teplot přirozeným termočlánkem	49
Obr. 34 Ukázka břitové destičky TPGN 160308 (54).....	50
Obrázek č. 35: Ukázka dynamometru Kistler pro soustružení (55).....	51
Obr. 36 Záznamové zařízení Almemo 5690-2	52
Obr. 37 Ukázka záznamové karty NI 9239	53
Obr. 38 Horkovzdušná opalovací pistole Steinel (59)	54
Obr. 39 ukázka přesného teploměru GMH 3230	55
Obr. 40 Rotační konektor Mercotac (60)	56
Obr. 41 Ukázka přípravku s rotačním konektorem	56
Obr. 42 Model karbidové tyčky	57
Obr. 43 Ukázka obráběného materiálu PEEK T300	58
Obr. 44 Sestava pro měření kalibrační křivky termočlánku.....	59

Obr. 45 Kalibrační křivka přirozeného termočláčku tvořeného kompozitním materiálem PEEK CF30 a slinutým karbidem TH10.....	60
Obr. 46 Sestava pro měření záznamu.....	61
Obr. 47 Záznam ohřevu v čase po vložení měřicí soustavy do obráběcího stroje	63
Obr. 48 Záznam ohřevu v čase po uzemnění měřicího zařízení	63
Obr. 49 Záznam ohřevu v čase po uzemnění jedné z větví obvodu termočláčku.....	63
Obr. 50 Kotouč připravený k měření	64
Obr. 51 Záznam termoelektrického napětí z měřicí karty NI 9239.....	65
Obr. 52 Část záznamu obsahující hledané termoelektrické napětí.....	66
Obr. 53 Graf závislosti teploty řezání Θ na řezné rychlosti v_c	67
Obr. 54 Graf závislosti teploty řezání Θ na posuvu f	68
Obr. 55 Souřadný systém dynamometru	71
Obr. 56 Záznam sil z dynamometru	71
Obr. 57 Graf závislosti řezné síly F_c na posuvu f	73
Obr. 58 Graf závislosti řezné síly F_c na řezné rychlosti v_c	74
Obr. 59 Graf závislosti síly posuvu F_f na posuvu f	75
Obr. 60 Graf závislosti síly posuvu F_f na řezné síle v_c	76
Obr. 61 Ukázka záznamu síly vyvolané posuvem	77
Obr. 62 Vliv posuvu na velikost měrného řezného odporu.....	78

10 Seznam tabulek

Tab. 1 Parametry soustruhu SP430 (52).....	48
Tab. 2 Parametry VBD Tungaloy TPGN 160308 (53)	50
Tab. 3 Parametry záznamového zařízení Almemo (56).....	51
Tab. 4 Parametry termočlánku XS-14-K-12 (57).....	52
Tab. 5 Parametry měřicí karty NI model 9239 (58).....	53
Tab. 6 Parametry horkovzdušné pistole Steinel (59)	54
Tab. 7 Mechanické vlastnosti uhlíkového vlákna T300 (61).....	57
Tab. 8 Mechanické vlastnosti polymerní matrice PEEK (62).....	58
Tab. 9 Návrh ověřovacího experimentu	62
Tab. 10 Tabulka naměřených hodnot teploty řezání	67
Tab. 11 Tabulka naměřených hodnot řezné síly.....	72
Tab. 12 aměřené hodnoty síly posuvu.....	72
Tab. 13 Tabulka vypočítaných hodnot měrného řezného odporu K_c	77