

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní**

**Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Frézování vlákný vyztužených polymerů – silové účinky**

**Milling of Fibre-Reinforced Polymers - Force Effects**

**Michal Bucko**

**Praha, 2017**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Mašek

## Poděkování

Tímto bych chtěl velice poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Petru Maškovi za pomoc, kterou mi poskytl během psaní mé bakalářské práce, a za jeho cenné rady, které mi velice tuto práci ulehčily.

### Prohlášení

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

V Praze dne.....

Podpis.....

## Abstrakt

Tato práce je zaměřena na měření silových účinků při frézování FRTC materiálů. Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. Teoretická část se zabývá rešerší současného stavu v oblasti kompozitních materiálů, dále popisuje nástroje vhodné pro obrábění kompozitních materiálů, a nakonec se zabývá metodikou měření sil při obrábění na frézách. V experimentální části je popsán vhodný návrh experimentu pro zjištění koeficientů měrné řezné síly pro vybrané nástroje a materiály a posouzení vlivu řezných podmínek na kvalitu povrchu po obrábění.

## Abstract

This work is focused on the measurement of force effects during milling of FRTC materials. The thesis is divided into the theoretical and experimental part. The theoretical part deals with the research of the current state in the field of composite materials, describes the tools suitable for machining of composite materials, and ultimately deals with the force measurement methodology for machining on milling machines. In the experimental part, an appropriate experimental design is described for the determination of the specific cutting force coefficients for selected tools and materials and the assessment of the influence of the cutting conditions on the surface quality after machining.

## Seznam použitých symbolů

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Význam</i>
$F_c$	N	Řezná síla
$v_c$	$m \cdot \min^{-1}$	Řezná rychlost
$P_c$	W	Celkový řezný výkon
$P_{už}$	W	Užitečný výkon
$P_0$	W	Výkon na prázdno
$M_{kb}$	$N \cdot m$	Točivý moment vyvolaný brzdou
$M_k$	$N \cdot m$	Točivý moment vyvolaný obráběním
$D$	mm	Průměr nástroje
$F_d$	-	Faktor delaminace
$W_{max}$	mm	Maximální šířka poškození
$W$	mm	Šířka řezu
$F_{dA}$	-	Plošný faktor delaminace
$A_{max}$	$mm^2$	Celková plocha delaminace
$A_d$	$mm^2$	Plocha řezu
$K_c$	MPa	Měrná řezná síla
$b_m$	mm	Průměrná tloušťka řezu
$h_m$	mm	Průměrná šířka řezu
$f_z$	mm	Posuv na zub
$\phi$	rad	Úhel záběru nástroje
$\omega$	rad	Úhel stoupání šroubovice nástroje
$a_p$	mm	Hloubka třísky
$K_{c1}, m_c$	-	Empirické konstanty

## Obsah

1	Úvod.....	9
2	Kompozitní materiály .....	10
2.1	Úvod do kompozitních materiálů .....	10
2.2	Využití kompozitu v praxi .....	10
2.3	Stavba kompozitu .....	11
2.3.1	Matrice .....	11
2.3.2	Výztuž .....	12
2.3.3	Ostatní složky.....	13
2.3.4	Uložení vláken v matrici .....	14
2.4	Zpracování kompozitních materiálů .....	14
2.4.1	Ruční kladení .....	15
2.4.2	Stříkání .....	15
2.4.3	Lisování.....	16
2.4.4	Další možnosti výroby .....	16
2.4.5	Obrábění .....	17
2.5	Delaminace .....	17
2.5.1	Druhy delaminace .....	18
2.5.2	Postup měření delaminace.....	19
3	Měření sil na frézce.....	19
3.1	Přímé metody .....	19
3.1.1	Mechanický dynamometr.....	20
3.1.2	Hydraulický dynamometr.....	20
3.1.3	Pneumatický dynamometr.....	20
3.1.4	Elektrické dynamometry .....	20
3.2	Nepřímé metody .....	22

3.2.1	Měření sil pomocí výkonu .....	22
3.2.2	Měření sil pomocí kroutícího momentu.....	23
3.3	Porovnání jednotlivých metod .....	23
4	Nástroje pro frézování kompozitu .....	24
4.1	Používané materiály nástrojů.....	24
4.1.1	Slinutý karbid .....	24
4.1.2	Polykrystalický diamant.....	25
4.2	Geometrie řezných nástrojů .....	25
5	Motivace pro experiment .....	26
5.1	Vyhodnocované experimenty .....	26
5.1.1	Experiment pro vyhodnocení silových účinků.....	26
5.1.2	Experiment pro zjištění koeficientů měrné řezné síly.....	27
5.2	Materiály pro experiment.....	27
5.2.1	C/PPS .....	27
5.2.2	G/PA12.....	28
6	Experimentální část.....	29
6.1	Použité strojní a měřicí vybavení.....	29
6.2	Návrh experimentu .....	34
6.2.1	Experiment pro porovnání silových účinků .....	34
6.2.2	Experiment na stanovení koeficientů měrné řezné síly.....	35
6.3	Postup měření .....	35
6.3.1	Výroba destiček o tloušťce 1 mm .....	36
6.3.2	Postup měření sil .....	37
6.3.3	Zaznamenávání delaminace .....	38
6.4	Zpracování dat .....	40
6.4.1	Vyhodnocení sil .....	40
6.4.2	Vyhodnocení delaminace .....	41

6.4.3	Vyhodnocení závislosti $K_c$ na $h_m$ .....	42
6.5	Vyhodnocení silových účinků .....	44
6.5.1	Vyhodnocení sil .....	44
6.5.2	Vyhodnocení otřepů .....	49
6.5.3	Dílčí závěr .....	52
6.6	Vyhodnocení experimentu pro stanovení koeficientů $k_{c1}$ a $m_c$ ..	53
6.6.1	Vyhodnocení sil .....	53
6.6.2	Stanovení závislosti $K_c$ na $h_m$ .....	55
6.6.3	Dílčí závěr .....	57
7	Závěr .....	57
8	Seznam použité literatury .....	59
9	Seznam obrázků.....	63
10	Seznam tabulek .....	64
11	Seznam grafů .....	65



# 1 Úvod

Kompozitní materiály (z lat. slova compositum) jsou lidstvu známé už od dob starověku, kdy naši předci používali slámu jako výztuž v jílových cihlách, nebo zvířecí šlachy jako výztuž tehdejších palných zbraní. V dnešní době si člověk pod pojmem kompozit spíše představí dvousložkový materiál na bázi polymerní matrice a výztuže v podobě skelných, uhlíkových, či jiných vláken. Právě tyto materiály dnes hrají významnou roli v mnoha odvětvích průmyslu, především pak v průmyslu leteckém a automobilovém [1].

Zpracování materiálu formou odebírání třísek je jak z historického hlediska, tak v moderním strojírenství velice rozšířený způsob, jakým je možné vytvářet požadovaný výrobek. Z tohoto důvodu je kladen velký důraz na vývoj obráběcích nástrojů, ať už z hlediska použitého materiálu, nebo geometrie jeho řezné části. O to více je důležité se tímto vývojem zabývat při obrábění vysoce odolných materiálů, jakým jsou například kompozitní materiály.

Tyto materiály jsou totiž z hlediska odebírání třísek velice nevyzpytatelné z důvodu jejich vláken, která mohou mít různé orientace. Z tohoto důvodu je též velice potřebné znát síly, které vznikají při obrábění kompozitních materiálů a poznáním těchto sil správně regulovat řezné podmínky a uzpůsobovat tomu i geometrii nástrojů.

Tyto kroky by měly vést k celkovému snížení opotřebení nástrojů a zlepšení kvality řezu, což významně ovlivňuje mechanické vlastnosti konečných výrobků.

Tato práce se proto zaměřuje na problematiku frézování kompozitních materiálů z hlediska řezných sil a jakosti obrobeného povrchu v závislosti na řezných podmínkách.

## 2 Kompozitní materiály

### 2.1 Úvod do kompozitních materiálů

Kompozitní materiály z pohledu, ze kterého je známe dnes, jsou z historického hlediska materiál velice mladý. Musíme si ale uvědomit, že kompozitní materiál nemusí být vždy kombinace polymeru a vyztužujícího vlákna. Při pohledu do historie lze za kompozitní materiál považovat například i jílové cihly s využitím slámy jako vyztužujícího prvku, dokonce i v přírodě lze najít kompozitní materiál, který vznikl bez zásahu člověka. Jedním takovým materiálem je například dřevo [1].

### 2.2 Využití kompozitu v praxi

Kompozitní materiály mají vzhledem ke svým velice příznivým vlastnostem vysoký potenciál pro použití v mnoha průmyslových odvětvích. Jejich hlavními výhodami jsou především velice nízká hustota, která je několikanásobně nižší oproti běžné konstrukční oceli, a dále pak pevnost v tahu, která se pohybuje až okolo desetinásobku pevnosti v tahu běžné konstrukční oceli. Díky těmto vlastnostem si tyto materiály našly vysoké uplatnění v letectví pro výrobu objemných součástí, kde je potenciál vysoké úspory hmotnosti při dostatečné pevnosti a odolnosti, což se projeví především na vysoké úspoře paliva. Další neméně důležitou oblastí budoucího použití těchto materiálů jsou obráběcí a souřadnicové měřicí stroje. Zde ovšem nejsou kompozity využívány ve velké míře převážně z důvodu jejich vysoké ceny a technických nároků kladených při výrobě. Využití těchto materiálů by významně zlepšilo parametry těchto strojů jak z hlediska tuhosti, tak z hlediska přesnosti, protože u těchto materiálů lze prakticky dosáhnout nulové teplotní roztažnosti použitím správné orientace vyztužných vláken [4].

## 2.3 Stavba kompozitu

Kompozity jsou materiály skládající se minimálně ze dvou složek. Jednou ze složek je matrice a ta druhá se nazývá výztuž. Dalšími složkami mohou být pigmenty, plniva a aditiva.

### 2.3.1 Matrice

Matrice je jedna ze dvou základních složek každého kompozitního materiálu, jedná se o spojitou fázi. Mezi hlavní úkoly matrice patří zajištění daného geometrického tvaru součásti, dále udržení vláken ve stejné orientaci a přenos sil mezi vlákny [4].

Mezi hlavní typy matrice, které jsou používány, patří především polymerní, dále pak kovová, keramická a uhlíková matrice.

**Polymerní matrice** může být tvořena reaktoplasty (epoxid), nebo termoplasty (polyamid, polypropylen, polyfenylsulfid a další).

Reaktoplasty jsou polymery, které jsou vytvrzovány pomocí tepla a jejich změna je nevratná, tudíž opětovným působením tepla dochází k degradaci materiálu. Tyto materiály nachází uplatnění především ve strojírenství, dopravě a chemickém průmyslu.

Naproti tomu termoplasty mají oproti reaktoplastům tu výhodu, že při působení tepla nedegradují a lze je poté tvarovat. Po ochlazení získávají zpět svoji původní tuhost. Jejich největší uplatnění je ve spotřebním průmyslu [29].

**Kovová matrice** je nejčastěji tvořena lehkými slitinami, jako například slitiny hliníku, horčíku a titanu, nebo též v menší míře slitinami železa, kobaltu, nebo mědi.

**Keramická matrice** je tvořena karbidy, nitridy a oxidy křemíku, nebo oxidy zirkonia.

**Uhlíková matrice** je tvořena pouze uhlíkem v různém stavu strukturní uspořádanosti [4].

### 2.3.2 Výztuž

Výztuž je složka, která dává materiálu dostatečnou pevnost, případně jiné vlastnosti, kvůli kterým byly tyto materiály vytvořeny. V kompozitním materiálu musí být minimálně 5 % této složky, aby mohl být materiál považován za kompozit [1]. Jedná se o nespojitou fázi kompozitu [4].

Vyztužující vlákna se dají dělit podle tvaru, velikosti a použitého materiálu. Při dělení podle velikosti a tvaru se používá štíhlostního poměru, což je podíl největšího a nejmenšího rozměru výztuže. V případě destičkových částic se nejmenším rozměrem myslí jejich tloušťka [18].

Podle použitého materiálu se nejčastěji používají vlákna skleněná, uhlíková, aramidová, přírodní a čedičová.

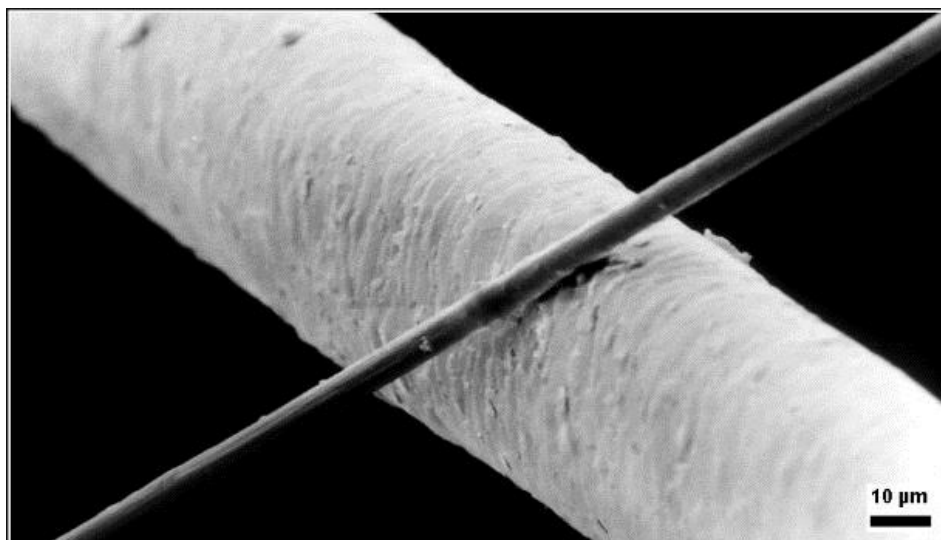
**Skleněná vlákna** mají silikátový základ ( $\text{SiO}_2$ ) a vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů Si (s příměsí oxidů Al, Ca, Mg a B) s velmi malým podílem oxidů alkalických kovů sodíku a draslíku.

**Uhlíková vlákna** jsou dnes vyráběna z vláken polyakrylonitrilových (PAN) a z vláken fenol-aldehydových a jedná se o nejpoužívanější typ vláken. Tato vlákna jsou velice tenká, dosahují průměru kolem 6  $\mu\text{m}$ , viz obrázek 1.

**Aramidová vlákna**, jinak řečeno kevlarová vlákna, jsou textilní vlákna z polyamidů s dlouhým uhlovodíkovým řetězcem, z jehož peptidických vazeb nejméně 85 % musí být spojeno se dvěma aromatickými jádry.

**Přírodní vlákna** se používají pouze jako vlákna krátká. Vlákna jsou velice ohebná, zvlněná a mají tendence tvořit shluky.

**Čedičová vlákna** se vyrábějí podobně jako skleněná vlákna, ale jsou levnější a mají velice dobrou chemickou odolnost [4].



*Obrázek 1 Ukázka velikosti uhlíkového vlákna v porovnání s lidským vlasem [23]*

### 2.3.3 Ostatní složky

Další složky obsažené v kompozitech jsou různá aditiva, plniva a pigmenty, které obstarávají vedlejší požadované vlastnosti jako například zpomalení stárnutí, nebo požadovanou barvu.

**Aditiva a plniva** jsou látky přidávané ve velmi malém množství, které ale svým působením významně ovlivňují vlastnosti matrice. Mohou to být například UV absorbéry, které zpomalují stárnutí materiálu, dále mohou napomáhat při smáčení vláken v pojivu, nebo snížit hořlavost materiálu.

**Pigmenty** se používají při obarvování matrice a jsou dvojího druhu, a to organické a anorganické. Anorganické pigmenty jsou z hlediska požadovaných vlastností výhodnější, nicméně v dnešní době se přechází spíše na pigmenty organické z důvodu možného znečištění životního prostředí toxickými těžkými kovy [5].

### 2.3.4 Uložení vláken v matrici

Možností, jak lze uložit systém vyztužovacích vláken v matrici, je hned několik. Mezi základní možnosti se člení tato uspořádání:

- jednosměrné uspořádání, kdy jsou vlákna kladena pouze v jednom směru,
- tkanina, zde už se jedná o kombinaci dvou směrů vláken,
- víceosá výztuž, která je velmi podobná tkanině pouze s tím rozdílem, že je zde použito více než dva směry uložení vláken,
- rohož, toto uspořádání je složeno z kontinuálních vláken stejně jako všechna předchozí uspořádání, ale s tím rozdílem, že vlákna jsou uspořádána nahodile,
- krátká vlákna s jednosměrnou, nebo nahodilou orientací [17].

Co se týče tkanin, tak ty mají též několik způsobů, kterými může být daná tkanina tvořena. Jedná se o plátňovou, keprovou a atlasovou vazbu, což je možné vidět v Obrázek 2.



Obrázek 2 Typy tkanin [4]

## 2.4 Zpracování kompozitních materiálů

Existuje velké množství technologií, kterými se dají kompozitní materiály zpracovat. První krok je výroba jednotlivých složek a dále kompozitu samotného, čímž je myšleno spojení matrice s vyztužujícími vlákny. Další formou zpracování bývá nejčastěji obrobení, případně lisování do potřebného tvaru s následným obrobením [19].

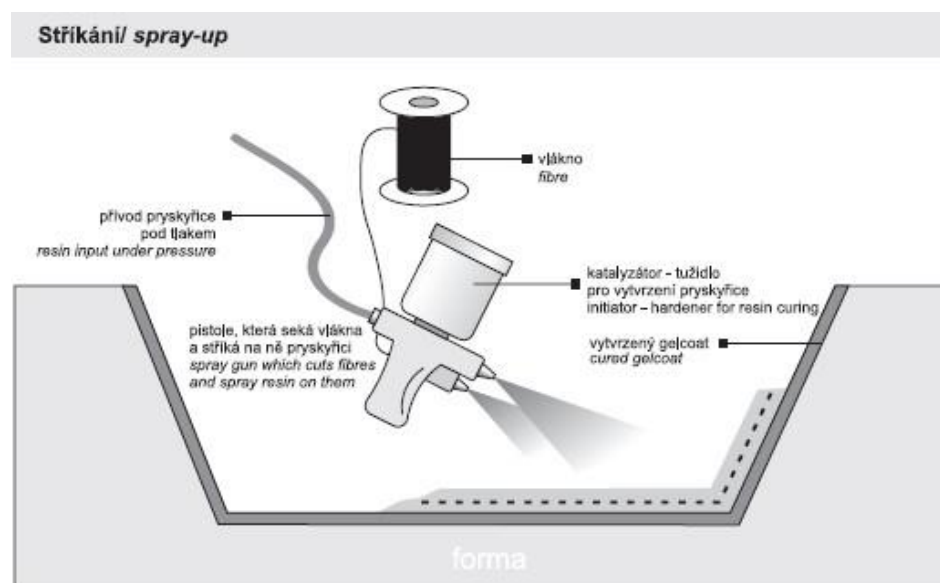
#### 2.4.1 Ruční kladení

Jedna z prvních technologií, kterou byly tyto materiály vyráběny, bylo ruční kladení. To probíhalo tak, že na formu byla položena výztuž ve formě tkaniny, na kterou byla nanášena pryskyřice. Výhodou byla možnost použití i na velmi objemné dílce, ovšem nevýhodou byla dostatečná kvalita povrchu, které bylo dosaženo jen na jedné straně, a to na straně formy.

Občas se používají i tzv. prepregy, což je zkratka pro předimpregnované vyztužující tkaniny, které obsahují přesný poměr pryskyřice a výztuže. Tyto prepregy mají velmi tenkou vrstvu, obvykle mezi 0,1 – 0,5mm a jsou ohebné. Používají se nejčastěji v letectví a kosmonautice, jinde nenacházejí uplatnění z důvodu jejich vysoké finanční náročnosti [19].

#### 2.4.2 Stříkání

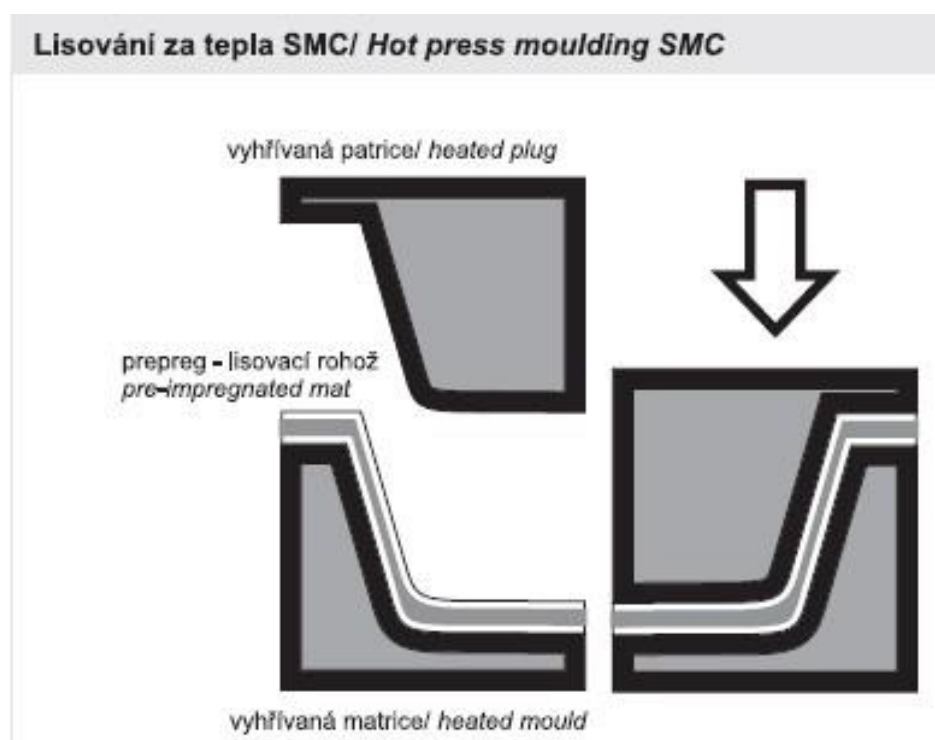
Tato metoda využívá pneumatickou pistoli pro nanášení směsi pryskyřice a sekaných vláken. Nanášení se provádí ručně, nebo pomocí robota, a to v několika vrstvách v závislosti na požadované tloušťce materiálu. Forma na nanášení je otevřená, jak je vidět z obrázku 3 [19].



Obrázek 3 Nanášení stříkáním [19]

### 2.4.3 Lisování

Výroba pomocí lisování probíhá tak, že do formy je vložena samotná tkanina a forma je poté uzavřena. Následuje vstříknutí dostatečného množství pryskyřice pod tlakem 0,2 – 0,35 MPa. Dostatečné množství pryskyřice je takové, při kterém dojde k úplnému prosycení tkaniny a pryskyřice začne vytékat odtokovými otvory. Nakonec jsou odtokové otvory uzavřeny a materiál je vytvrzen. Vytvrzení probíhá při nízkém tlaku a pokojové teplotě. Schéma je možné vidět na obrázku 4 [19].



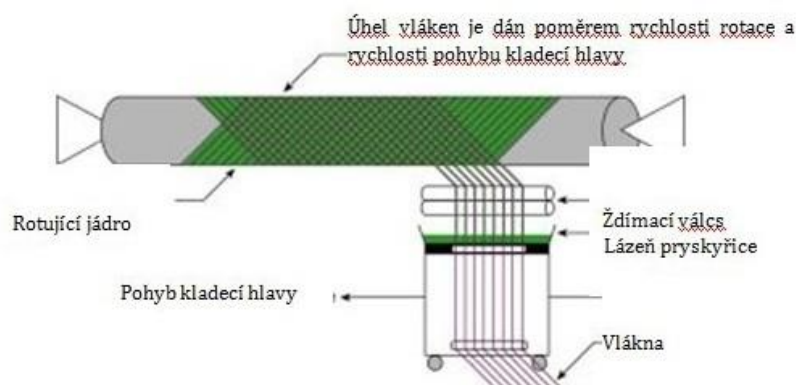
Obrázek 4 Ukázka lisování kompozitu [19]

matrice špatně odvádí teplo a kvůli nízké teplotní odolnosti se materiály vlivem vysokých řezných podmínek lehce spálí [7].

### 2.4.4 Další možnosti výroby

Mezi další možnosti patří například navíjení vláken na konvexní povrchy buď v axiálním směru, nebo jako šroubovice. Tyto metody jsou hojně využívány při výrobě rotačních i nerotačních součástí jako jsou například trubky, či těla raket. Na obrázku 5 je možné vidět schéma šroubovitého navíjení [8].





Obrázek 5 Ukázka navíjení formou šroubovice [8]

Velice mladou technologií je též 3D tisk. Tato technologie je velice zajímavá v tom, že na stejném stroji lze vyrobit jak nylonový prototyp, tak následný hotový výrobek zpevněný uhlíkovými vlákny, což značně šetří náklady na pořízení dalšího stroje. [9] Lze použít kontinuální i diskontinuální uhlíková a skleněná vlákna. Nevýhodou je ovšem horší kvalita povrchu, proto je nutné následně povrch upravit například laserem. Další nevýhodou je použití pouze polymerní matrice [8].

#### 2.4.5 Obrábění

Obrábění kompozitu je konečnou a téměř nevyhnutelnou součástí jeho celkového zpracování i přesto, že jsou tendence se tomuto způsobu zpracování vyhnout. Jedná se převážně o dokončovací operace, tvorbu funkčních ploch a zbavení dílu přebytků po jiných technologiích. Největším problémem při obrábění kompozitů jsou jejich vlákna, která dosahují vysoké tvrdosti a tím značně opotřebovávají obráběcí nástroje. Dalším problémem je odvod tepla z místa řezu, jelikož většina typů

### 2.5 Delaminace

S vyšším rozvojem potřeby zpracování kompozitu formou obrábění roste i riziko vzniku různých poškození kompozitu. Mezi nejčastější vady patří různé druhy delaminace. Tyto vady jsou nejčastěji způsobeny nedostatečnou kvalitou ostří, případně mohou být způsobeny špatně zvolenými reznými podmínkami. Delaminace se vyznačuje odlupováním jednotlivých vrstev kompozitu [21].

### 2.5.1 Druhy delaminace

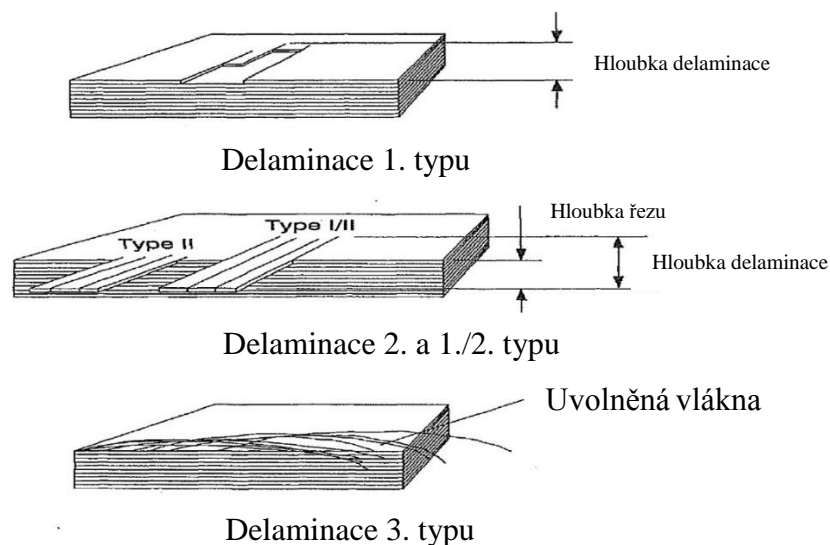
Odlupování se může tvořit hned několika způsoby a dle těchto způsobů dělíme jednotlivé vady do tří kategorií. Jedná se delaminaci prvního, či druhého typu, případně jejich kombinace, a nakonec delaminace třetího typu. Všechny tyto možné vady lze pozorovat na obrázku 6.

**Delaminace prvního typu** je takové poškození, při kterém se jednotlivé vrstvy materiálu odlamují až za hranici obrobeného materiálu, čímž značně zhoršují kvalitu povrchu. Tato vada lze odstranit pouze opětovným obrobením povrchu.

**Delaminace druhého typu** je vada, která se projevuje trčícími částmi vrstvy ven z materiálu. Tato vada má tu výhodu, že ji lze lehce odstranit bez potřeby opětovného obrábění a nijak nepoškozuje obrobený povrch.

**Delaminace třetího typu**, též zvaná jako uvolněná vlákna, je vada velice podobná delaminaci předchozí, a to tím, že část materiálu zasahuje do prostoru mimo destičku. Rozdíl je ovšem v tom, že z destičky trčí pouze uvolněná jednotlivá vlákna materiálu. Toto poškození vzniká při nedostatečné řezivosti nástroje, kdy nástroj třísku zcela neodřízne ale odstraní ji tahem.

Speciálním typem delaminace je delaminace kombinovaná, kdy vznikne delaminace prvního typu spolu s delaminací druhého typu současně [31].



Obrázek 6 Porovnání jednotlivých typů delaminace [31]

### 2.5.2 Postup měření delaminace

Abychom mohli porovnávat jednotlivé výsledky delaminace, tak je potřeba tuto veličinu nějakým způsobem kvantifikovat. Jedním z nejznámějších způsobů této kvantifikace je určení faktoru delaminace, který je založený na porovnání šířky řezu s celkovou šířkou včetně řezu včetně vzniklé delaminace, viz vzorec 1.

$$F_d = \frac{W_{max}}{W} \quad (1)$$

- $F_d$  je faktor delaminace (%),
- $W_{max}$  je maximální šířka poškození (mm),
- $W$  je šířka řezu (mm).

## 3 Měření sil na frézce

Při jakékoliv interakci nástroje a obrobku během obrábění vznikají síly, které různým způsobem ovlivňují průběh daného obrábění. Z tohoto důvodu je důležité vhodně monitorovat průběh silových účinků během obrábění. Ze samotné výslednice sil bychom ovšem žádné relevantní výsledky nezískali, proto je též důležité znát kromě celkových silových účinků také jednotlivé složky těchto sil, abychom mohli daný obráběcí proces vhodně upravit. Z tohoto důvodu byly vyvinuty metody, kterými se dají jednotlivé složky sil měřit. Tyto metody se dělí na přímé metody a metody nepřímé [13].

### 3.1 Přímé metody

K přímému určení velikostí sil během obrábění se používají snímací přístroje, které se nazývají dynamometry. Tyto přístroje vyhodnocují deformace v celé soustavě, tzn. stroj – nástroj – obrobek, z toho důvodu jsou na ně kladeny základní požadavky, a to dostatečná tuhost, vysoká citlivost, dále stálost údajů a s tím spojená jejich reprodukovatelnost, a nakonec správná konstrukce, která ovlivňuje setrvačnost dynamometru. Vzhledem k těmto požadavkům bylo zkonstruováno několik typů dynamometrů s odlišnými způsoby zaznamenání výsledků.

Mezi hlavní typy dynamometrů patří dynamometry mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické a piezoelektrické [15].

#### 3.1.1 Mechanický dynamometr

Mechanické dynamometry jsou přístroje, které přenášejí sílu přímo na měřicí prvek, kterým může být například úchylkoměr. Jedná se o velice jednoduché a spolehlivé přístroje a díky tomu se používají při cejchování jiných druhů dynamometrů. Jejich nevýhodou je ale velká teplotní závislost, častá únava materiálu a nemožnost je použít v dynamických měřeních z důvodu vysoké setrvačnosti. Nejčastěji se používá dynamometr třmenový.

#### 3.1.2 Hydraulický dynamometr

Hydraulický dynamometr využívá Pascalova zákona šíření tlaku v kapalině. Síla je přenášena na píst pomocí změny tlaku v kapalině. Následný pohyb pístu je následně snímán manometrem, případně jiným snímačem. Výhodou těchto přístrojů je opět jednoduchá konstrukce, která s sebou ale nese nevýhodu ve formě velké setrvačnosti a nízké citlivosti. V dnešní době se téměř nepoužívají.

#### 3.1.3 Pneumatický dynamometr

Pneumatický dynamometr pracuje na principu změny tlaku při průchodu vzduchu mezi klapkou a tryskou. Tyto přístroje jsou vysoce citlivé, spolehlivé a mají relativně nízké náklady jak na pořízení, tak na údržbu.

#### 3.1.4 Elektrické dynamometry

Elektrické dynamometry jsou prakticky nejrozšířenější používané dynamometry. Mezi elektrické dynamometry pro frézování se řadí dynamometry indukční, kapacitní, odporové a piezoelektrické.

**Indukční dynamometr** potřebuje ke svému fungování indukční snímač, který využívá změnu indukčnosti v obvodu pro vyhodnocení sil. Pro vyhodnocení změny indukčnosti se využívají tři typy indukčních obvodů. Prvním z nich je indukční snímač s otevřeným magnetickým obvodem, se stálým magnetickým obvodem a snímač se vzduchovou mezerou, tedy s uzavřeným obvodem. Poslední zmíněná varianta se používá nejčastěji

a funguje tak, že při změně působící síly se změní velikost mezery v obvodu a tím následně i indukčnost cívky.

**Kapacitní dynamometr** využívá pro měření sil kapacitní snímač. Jako kapacitní snímač lze použít například deskový kondenzátor. Tento dynamometr funguje tak, že vznik působící síly vyvolá malou deformaci kondenzátoru a díky tomu se změní i kapacita kondenzátoru, což je následně vyhodnoceno jako změna velikosti působící síly.

**Odporový dynamometr** funguje na principu změny odporu vodiče, či polovodiče nazývaného odporový tenzometr. Tento tenzometr je pevně spojen s deformačním elementem a při deformaci elementu se deformuje i tenzometr, což vyvolá změnu jeho odporu. Nejčastějším materiálem tenzometru je slitina zvaná konstantan, jedná se o slitinu mědi a niklu.

**Piezoelektrický dynamometr** využívá piezoelektrického jevu, což je jev, který vzniká na některých typech krystalů a projevuje se tím, že při mechanickém zatížení na povrchu krystalu vzniká elektrický náboj. Tento náboj je následně nutné zesílit a převést na napětí pomocí destičky nábojového zesilovače. Typické krystaly, na kterých vzniká piezoelektrický jev, jsou například krystaly křemenu s chemickým vzorcem  $\text{SiO}_2$ , nebo uměle vytvořené krystaly  $\text{LiNbO}_3$  a  $\text{LiTaO}_3$ . Velkou výhodou těchto dynamometrů je nezávislost na okolní teplotě, vysoká tuhost a velký měřicí rozsah [15].

Z výše jmenovaných jsem pro svoji práci vybral právě poslední jmenovaný dynamometr, a to piezoelektrický rotační dynamometr od firmy Kistler. Pro měření síly ve směru osy „z“ by se dal použít i stacionární dynamometr, tím by ovšem nebylo možné naměřit řeznou složku síly  $F_c$ , a to ani nepřímou. Další jeho důležité výhody oproti ostatním možnostem jsou vysoká citlivost měření a velmi malá setrvačnost. Tyto vlastnosti jsou velice důležité z toho důvodu, že v tomto experimentu je potřeba měřit velice malé síly a nízká citlivost společně s vysokou setrvačností by způsobila zkreslení dat. Další jeho výhodou je velký rozsah měření.



Obrázek 7 Ukázka rotačního piezoelektrického dynamometru Kistler [26]

## 3.2 Nepřímé metody

Mezi nepřímé metody měření sil se obecně řadí metoda, která využívá výkonu daného stroje a metoda využívající kroučícího momentu vřeten. Obě tyto metody jsou popsány níže.

### 3.2.1 Měření sil pomocí výkonu

Nepřímá metoda určení sil při obrábění vychází ze změny výkonu elektromotoru daného obráběcího stroje. Tato metoda má tu nevýhodu, že nelze určit jednotlivé složky síly ale pouze složku tangenciální neboli řeznou složku ze vzorce, viz vzorec 2 pro řeznou sílu, ostatní složky jsou zanedbány.

$$F_c = \frac{P_{u\check{z}}}{v_c} \quad (2)$$

- $F_c$  řezná složka síly (N),
- $P_{u\check{z}}$  užitečný výkon (W),
- $v_c$  řezná rychlost ( $m \cdot \text{min}^{-1}$ ).

Samotné měření probíhá tak, že na stroji je změřen výkon za chodu na prázdko a následně je změřen i během obrábění. Výsledný užitečný výkon

získáme odečtením výkonu na prázdno od výkonu celkového, viz vzorec 3 pro užitečný výkon [16].

$$P_{už} = P_c - P_o \quad (3)$$

- $P_{už}$  užitečný výkon (W)
- $P_c$  celkový výkon (W)
- $P_o$  výkon na prázdno (W)

### 3.2.2 Měření sil pomocí kroutícího momentu

Tato metoda využívá stejně jako metoda předchozí měření celkového výkonu stroje, ovšem s tím rozdílem, že po změření výkonu během obrábění vyjede nástroj z řezu a vhodným způsobem je mechanicky brzděn do chvíle, než je dosaženo stejného celkového výkonu stroje. Z rovnosti točivých momentů dosažených obráběním a mechanickým brzděním vyplývá následující vztah.

$$M_k = \frac{F_c * D}{2} = M_{kb} \quad (4)$$

- $M_{kb}$  je točivý moment vyvolaný mechanickou brzdou (N\*m)
- $M_k$  je točivý moment vyvolaný obráběním (N\*m)
- $D$  je průměr nástroje (mm)

Výhodou této metody je, že není ovlivněna rozdílnou účinností stroje mezi obráběním a chodem na prázdno [15].

## 3.3 Porovnání jednotlivých metod

Pro zvolení vhodné metody měření je nutné si určit, k čemu daná data budou použita a které složky síly bude nutné změřit. Nepřímá metoda měření založená na principu měření výkonu je, co se týče principu měření, jednoduchá a finančně nenáročná metoda, která nám ovšem může posloužit pouze v případě hrubého odhadu tangenciální složky síly a její vyhodnocení je poměrně časově náročné. Jiné složky pomocí této metody stanovit nelze.

Na druhé straně stojí přímé metody, které využívají dynamometrů. Ovšem ani správná volba mezi jednotlivými typy dynamometrů není zdaleka tak jednoduchá, jak se může na první pohled zdát. Z důvodu vysoké

setrvačnosti a nízké frekvenci zaznamenávaných dat nelze některé z metod použít u dynamických měření. Z tohoto důvodu byl pro účely experimentu vybrán právě piezoelektrický dynamometr Kistler [15].

## 4 Nástroje pro frézování kompozitu

Vzhledem ke vzrůstajícímu trendu využívání kompozitu v průmyslu roste též potřeba vyvíjet řezné nástroje, které dostatečně odolávají opotřebením. Parametrů, které ovlivňují opotřebení, je velké množství, mezi hlavní však patří jejich geometrie, použitý materiál nástroje a povrchová úprava.

### 4.1 Používané materiály nástrojů

Při obrábění kompozitních materiálů je největším problémem vznikající teplo, které kvůli špatné vodivosti kompozitů odchází třískou a obráběným materiálem pouze ve velice malém množství. Z tohoto důvodu je nutné volit takové materiály, které dobře odolávají vysokým teplotám a zároveň abrazivním účinkům vláken v kompozitech [23].

Jedním takovým materiálem může být například povlakovaný slinutý karbid. Jako povlak zde bývají nejčastěji používány sloučeniny na bázi karbidů, nitridů a oxidů. Další možností je použití polykrystalického diamantu, jenž se jeví jako nejlepší možnost z důvodu vysoké tepelné vodivosti a relativně malého opotřebením vzhledem k povlakovaným slinutým karbidům [23].

#### 4.1.1 Slinutý karbid

Slinutý karbid je v případě obrábění kompozitních materiálů s polymerní matricí oproti běžně používaným materiálům mnohonásobně výhodnější díky jeho tepelné vodivosti, která, například oproti běžně používané rychlořezné oceli, dosahuje až čtyřnásobných hodnot [23].

V případě obrábění vysoce abrazivních materiálů ovšem není zapotřebí pouze tepelná vodivost. Další důležitou vlastností je odolnost proti abrazivnímu otěru. V případě čistých slinutých karbidů ovšem není zaručena dostatečná otěruvzdornost, proto se na slinutých karbidech používají dodatečné povlaky. Nejčastěji takto používanými povlaky jsou



povlaky z diamantu nanášeného formou CVD a povlaky z nitridu titanu, zkráceně TiN. Z těchto dvou povlaků je pro obrábění kompozitů vhodnější diamantový povlak, a to z důvodu vyšší tepelné vodivosti a menšího koeficientu tření, díky čemuž má obrobená plocha kvalitnější povrch. K jeho nevýhodám patří křehkost této vrstvy [23].

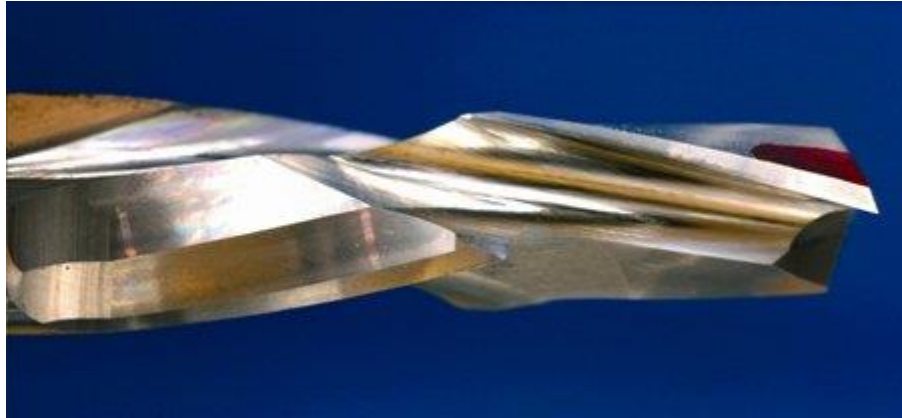
#### 4.1.2 Polykrystalický diamant

Nástroje z polykrystalického diamantu mají oproti povlakovaným slinutým karbidům mnohonásobně vyšší tepelnou vodivost, která může dosahovat až stonásobku tepelné vodivosti slinutých karbidů. Jejich další výhodou, vysoká tvrdost, je ovšem částečně i jejich nevýhodou. Tyto nástroje mají sice vysokou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, ale zároveň musí být konstruovány s málo pozitivní geometrií, protože nemají tak vysokou houževnatost. Z tohoto důvodu nezajišťují nástroje z PCD tak dobrou kvalitu řezu oproti povlakovaným slinutým karbidům [25].

## 4.2 Geometrie řezných nástrojů

Geometrie je vedle použitého materiálu nejdůležitější faktor při navrhování vhodného nástroje pro obrábění kompozitních materiálů. Správná volba geometrie může mnohonásobně snížit množství vzniklého tepla z důvodu nižší adheze, a tím zvýšit trvanlivost nástroje. Z tohoto poznatku vyplývá, že je výhodnější používat nástroje s výrazně pozitivní geometrií bříty [24].

Dalším významným poznatkem v oblasti geometrie bříty je volba sklonu šroubovice nástroje. Bylo zjištěno, že pro nejlepší výsledky kvality obrobeného povrchu je důležité používat oboustranně kompresní šroubovici nástroje. Takovýto nástroj se skládá ze dvou šroubovic uložených proti sobě. Jedna šroubovic má záporný úhel stoupání a působí kompresně na horní hranu obrobené plochy, zatímco druhá šroubovice má kladný úhel stoupání a působí kompresně na spodní stranu. Díky této geometrii vzniká kvalitní řez bez vzniku delaminace, či jiných vad [24]. Ukázku této šroubovice můžeme vidět na obrázku 8.



Obrázek 8 Ukázka dvojitě kompresní šroubovice [25]

## 5 Motivace pro experiment

Na základě předchozí rešerše věnující se kompozitním materiálům, jejich obrábění, měření sil a problémům s tím spojených bylo rozhodnuto, že se bude tato práce věnovat právě vyhodnocení sil vznikajících během frézování kompozitních materiálů, konkrétně u tenkostěnných desek, které jsou velmi málo probádanou oblastí těchto materiálů. Tyto tenkostěnné profily mají totiž oproti masivnějším dílcům mnohonásobně menší tuhost, což se projevuje právě při jejich frézování. Dále se práce věnuje vyhodnocení následného vzniku delaminace, což je velice důležitý faktor vzhledem k výsledné kvalitě povrchu. Téma této práce jsem si zvolil též z důvodu snahy přispět svými výsledky k lepšímu poznání těchto materiálů a pomoci při vývoji nových řezných nástrojů a volbě řezných podmínek.

### 5.1 Vyhodnocované experimenty

#### 5.1.1 Experiment pro vyhodnocení silových účinků

Tento experiment byl navržen v první řadě pro zjištění obrobitelnosti destiček z G/PA12 a C/PPS s tloušťkou 1 mm. K tomuto experimentu bude sloužit graf závislosti řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub  $f_z$  a graf závislosti velikosti delaminace na velikosti řezné síly  $F_c$ .

Dalším neméně důležitým cílem byla volba hladiny „z“, tzn. volba úhlu sklonu šroubovice z důvodu zjištění, zda je vhodnější využití dvojitě

kompresní šroubovice, nebo pouze záporná, případně kladná hodnota sklonu šroubovice nástroje. K tomuto vyhodnocení nám bude sloužit graf závislosti síly ve směru osy „z“  $F_z$  na velikosti posuvu na zub  $f_z$ .

#### 5.1.2 Experiment pro zjištění koeficientů měrné řezné síly

Tento experiment slouží ke zjištění koeficientů měrné řezné síly  $k_{c1}$  a  $m_c$ . Tyto koeficienty jsou velice důležité, protože pomocí nich lze odhadnout přibližnou velikost síly  $F_c$ , která bude vznikat při obrábění tohoto materiálu. Odhadnutí řezné síly  $F_c$  může následně sloužit pro přibližné určení teploty v místě řezu a tím i pro korekci řezných podmínek, aby nedošlo k poškození obráběného materiálu.

## 5.2 Materiály pro experiment

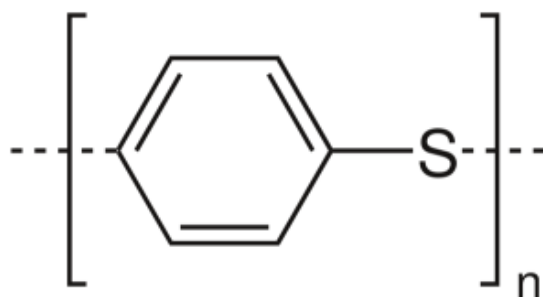
Pro samotný experiment jsem použil dva kompozitní materiály s polymerní matricí v několika tloušťkách materiálu. Prvním materiálem je G/PA12, který se skládá z matrice polyamidu 12, též nazývané jako Nylon 12, a skelných vláken. Jako druhý materiál jsem zvolil C/PPS, což je materiál s matricí z polyfenylensulfidu vyztužený uhlíkovými vlákny. Tyto materiály jsem zvolil z důvodu vysokého využití v dnešním průmyslu a díky vysokému potenciálu pro další možnosti použití.

#### 5.2.1 C/PPS

Jedná se o kompozitní materiál s vysoce kvalitní semikrystalickou matricí PPS používanou převážně v letectví a uhlíkovými vlákny T300B. Tento materiál vyniká řadou vlastností. [11] Těmi hlavními jsou pevnost v tahu, která je v porovnání s běžnou konstrukční ocelí téměř čtyřnásobná, teplotní odolnost, která je jedna z nejvyšších v porovnání s jinými termoplasty, a hustotou pouze  $1,76 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Další příznivé vlastnosti jsou nízká nasákavost vodou a vysoká samozhášivost. Na obrázku 9 je možné vidět ukázkou materiálu CPP/S, na následujícím obrázku 10 potom chemický vzorec pro polyfenylensulfidovou matrici [10].



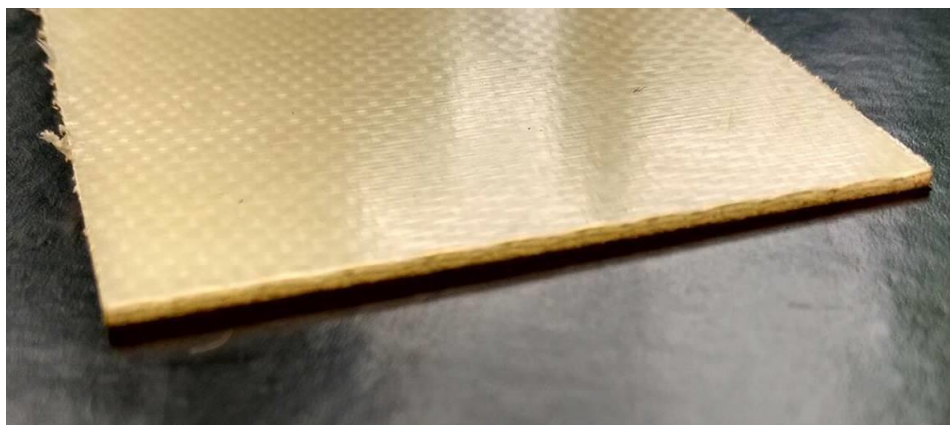
Obrázek 9 Ukázka materiálu C/PPS [20]



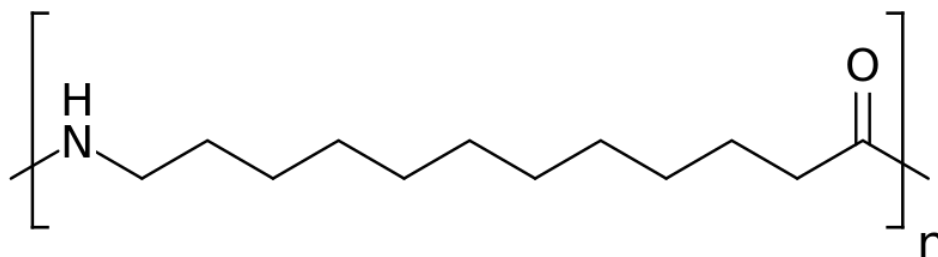
Obrázek 10 Chemický vzorec Polyfenylensulfidu [27]

### 5.2.2 G/PA12

G/PA12 je kompozit složený z polyamidové matrice (PA12) a ze skleněných vláken EC11. Matrice tohoto kompozitu má vynikající izolační vlastnosti, proto je často používána jako elektrický izolátor [12]. Další jeho přednostmi jsou vysoká odolnost vůči rázům a chemická odolnost. Pevnost tohoto materiálu je sice o necelou polovinu menší než v případě kompozitu C/PPS, ale i přesto je stále několikanásobně vyšší než u běžných ocelí, a to kolem 1900MPa v tahu. Hustota je  $2,65\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Na následujícím obrázku 11 je možné vidět ukázkou kompozitu G/PA12 a na obrázku 12 můžeme pak vidět chemický vzorec jeho polyamidové matrice [18].



Obrázek 11 Ukázka materiálu G/PA12



Obrázek 12 Chemický vzorec Polyamidu 12 [30]

## 6 Experimentální část

Tato práce má za cíl několik hlavních úkolů. V první řadě se jedná o návrh experimentu pro zjištění koeficientů měrné řezné rychlosti, dalším úkolem je stanovení závislosti jednotlivých složek síly na posuvu na zub  $f_z$  při frézování tenkých kompozitních desek a posledním neméně důležitým úkolem je vyhodnocení kvality obrobeného povrchu v závislosti na posuvu na zub  $f_z$ .

### 6.1 Použité strojní a měřicí vybavení

Celý experiment byl měřen na obráběcím centru MCFV 5050 LN. Jedná se o tříosé frézovací centrum se stranovým talířovým zásobníkem a upínacím kuželem SK40. Jednotlivé Parametry popsány v tabulce 1. Ukázka stroje na obrázku 13.

Tabulka 1 Parametry obráběcího centra MCFV 5050 LN

Parametr	Hodnota
Pracovní pojezdy (X, Y, Z) [mm]	500, 400, 400
Pracovní posuv [m/min]	80
Rychloposuv [m/min]	80
Zrychlení (X, Y, Z) [m/s <sup>2</sup> ]	20, 20, 15
Výkon vřetena [kW]	18
Maximální otáčky [min <sup>-1</sup> ]	15000



Obrázek 13 Ukázka obráběcího centra MCFN 5050 LN [27]

Jako přístroj pro měření jednotlivých složek síly byl zvolen rotační dynamometr od firmy Kistler. Jedná se o čtyř složkový piezoelektrický dynamometr, pomocí kterého lze měřit síly ve směrech osy „x“, osy „y“ a osy „z“, dále lze měřit moment síly ve směru osy „z“. Maximální zatížení, citlivost a další údaje jsou uvedeny v tabulce 2, jeho ukázkou je možné vidět na obrázku 14.

Tabulka 2 Parametry rotačního dynamometru Kistler [28]

<b>Parametry</b>				
	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	M <sub>z</sub>
Max. zatížení	5 kN	5 kN	20 kN	200Nm
Citlivost	2 mV/N	2 mV/N	0,5 mV/N	50 mV/N
Max. otáčky	10000 ot·min <sup>-1</sup>			
Vlastní frekvence	2000 Hz			
Upínání nástroje	Kleština			



Obrázek 14 Ukázka hlavy rotačního dynamometru Kistler [28]

K samotnému obrobení povrchu kompozitních desek byla použita sada čtyř monolitních nástrojů ze slinutého karbidu s povlakem z polykrystalického diamantu, tento povlak byl nanášen metodou CVD. Všechny nástroje v sadě měly pět zubů, dvojité kompresní šroubovici s rozdílnými úhly čela a stoupání šroubovice a jejich průměr byl 12 mm. Jednotlivé úhly nástrojů vypsány v tabulce 3. Na obrázku je vidět ukázka jednoho z nástrojů, a to nástroj T81.

Tabulka 3 Řezné úhly použitých nástrojů

Nástroj	Úhel čela [°]	Úhel stoupání šroubovice [°]
T80	25	15
T81	25	5
T83	15	15
T84	15	5



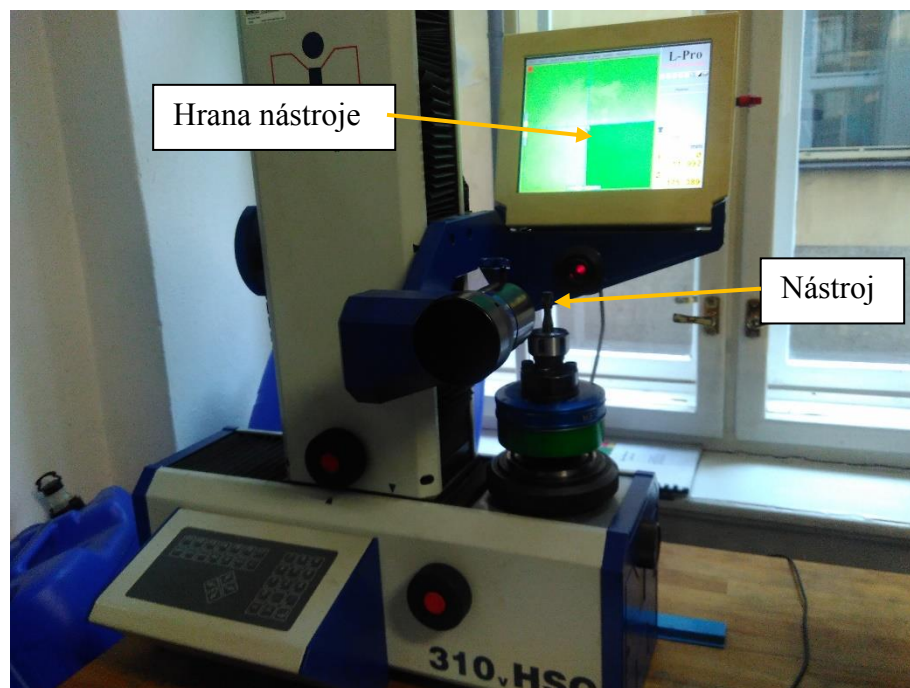
Obrázek 15 Ukázka nástroje T81

Jelikož nástroje mají dvojitě kompresní šroubovici, tak je nutné, aby řez vedl přesně místem jejich překrytí. Z tohoto důvodu musel být použit vertikální seřizovací přístroj BMD 310vHSC. Parametry tohoto přístroje jsou uvedeny v tabulce 4, jeho fotku je možné vidět na obrázku 16.

Tabulka 4 Parametry seřizovacího stroje BMD 300v HSC

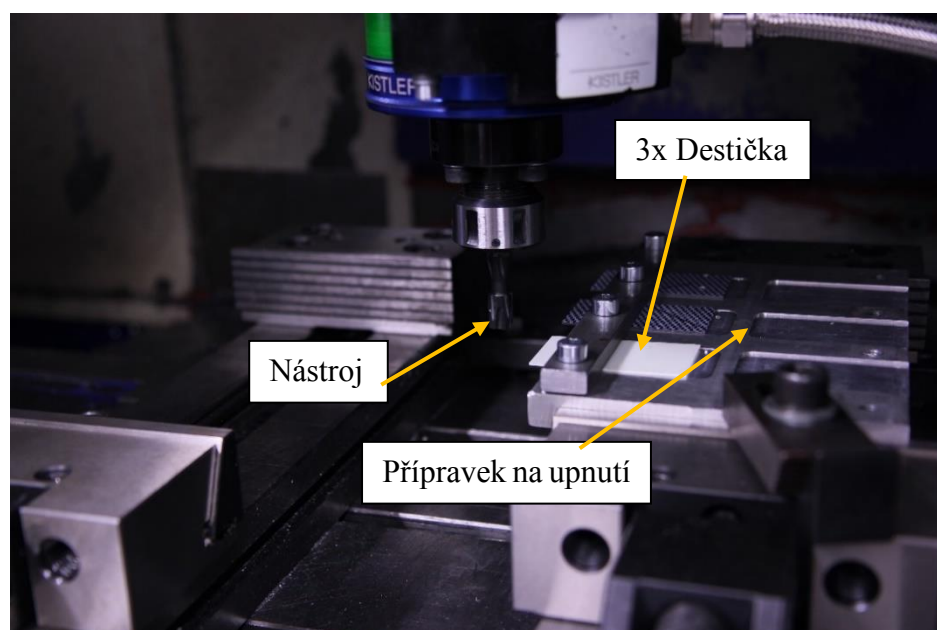
Parametr	Hodnota
Max. průměr nástroje [mm]	300
Max. délka nástroje [mm]	300
Rozlišení [mm]	0,001
Házení dutiny vřetena [mm]	0,002





Obrázek 16 Seřizovací přístroj BMD 310v HSC

Upnutí destiček ve stroji bylo řešeno pomocí speciálního přípravku, který navrhl a zkonstruoval kolega Adam Třešňák. Přípravek je řešen tak, že je možné v něm upnout najednou vedle sebe až tři destičky, což značně urychluje měření. Přípravek je vyroben z duralu, upínací most je řešen pomocí ocelového hranolu připevněného pomocí čtyř imbusových šroubů, jak je možné vidět na obrázku 17.



Obrázek 17 Ukázka upnutého přípravku s deskami připravenými na frézování

## 6.2 Návrh experimentu

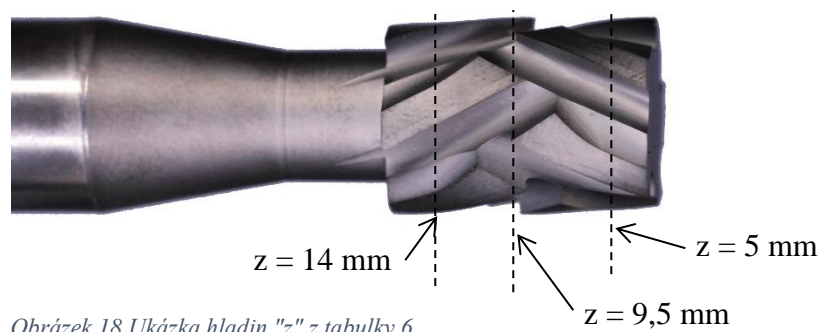
Experimentální část je rozdělena na dva samostatné experimenty. První experiment je zaměřený na stanovení řezné síly  $F_c$  v závislosti na posuvu na zub  $f_z$  a jeho úkolem je porovnat vliv jednotlivých geometrií daných nástrojů na silové účinky. Druhá část je zaměřena na stanovení závislosti měrné řezné síly na průměrné tloušťce třísky. V obou experimentech je následně též vyhodnocena delaminace pomocí programu Adobe Photoshop. Pro ověření správnosti naměřených výsledků bylo každé měření měřeno dvakrát. Všechna měření probíhala za řezné rychlosti  $100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

### 6.2.1 Experiment pro porovnání silových účinků

Z důvodu nízké prozkoumanosti v oblasti frézování tenkostěnných kompozitních desek byl tento experiment zaměřen na snahu o zjištění obrobitelnosti a vývoje jednotlivých složek sil u tenkostěnných desek o tloušťce 1 mm, proto byly zvoleny tři hodnoty posuvu na zub  $f_z$  pro každý materiál, což je vidět v tabulce 6. Pro následné vyhodnocení vlivu sklonu šroubovice nástroje na sílu ve směru osy „z“ byly zvoleny tři hladiny nástroje, ve kterých daný nástroj obráběl, což je vidět na obrázku 18. V tabulce 6 se jedná o sloupec s názvem „z“ a hodnoty v tabulce značí vzdálenost konce nástroje ke středu obráběného materiálu. Tyto hladiny byly měřeny při stejné hodnotě posuvu na zub  $f_z = 0,1 \text{ mm}$ .

Tabulka 5 Návrh experimentu na stanovení silových účinků a velikosti delaminace

	Materiál	$v_c [\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$	$f_z [\text{mm}\cdot\text{zub}^{-1}]$	z [mm]
1	C/PPS	100	0,05	9,5
2	C/PPS		0,1	9,5
3	C/PPS		0,15	9,5
4	G/PA12		0,05	9,5
5	G/PA12		0,10	9,5
6	G/PA12		0,15	9,5
7	C/PPS		0,1	5
8	G/PA12		0,1	5
9	C/PPS		0,1	14
10	G/PA12		0,1	14



Obrázek 18 Ukázka hladin "z" z tabulky 6

### 6.2.2 Experiment na stanovení koeficientů měrné řezné síly

Tento experiment měl za úkol stanovení koeficientů měrné řezné síly  $k_{c1}$  a  $m_c$  pro 3 mm silné desky z materiálů G/PA12 a C/PPS. Tyto koeficienty lze získat ze závislosti mezi měrnou řeznou silou  $K_c$  na průměrné tloušťce třísky  $h_m$ . Pro tento účel byl navržen experiment dle následující tabulky.

Tabulka 6 Návrh experimentu na zjištění závislosti  $K_c$  na  $h_m$

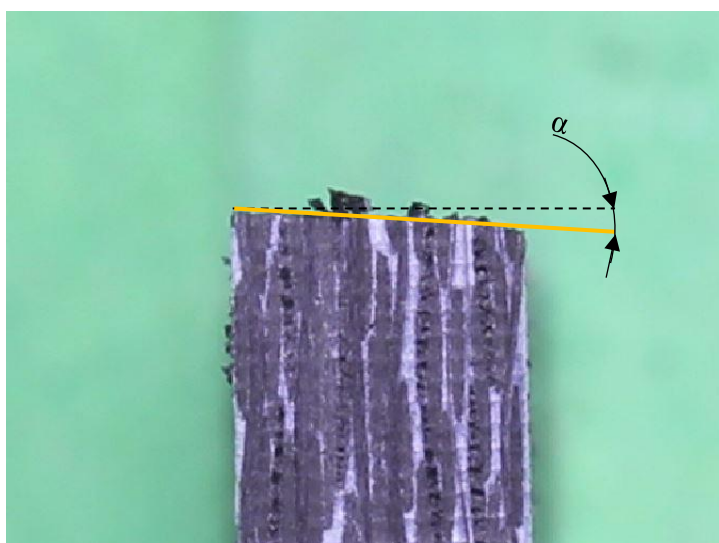
	materiál	$v_c$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	$f_z$ [ $mm \cdot zub^{-1}$ ]
1	C/PPS	100	0,03
2	C/PPS		0,05
3	C/PPS		0,07
4	C/PPS		0,1
5	C/PPS		0,13
6	C/PPS		0,15
7	G/PA12		0,03
8	G/PA12		0,05
9	G/PA12		0,07
10	G/PA12		0,1
11	G/PA12		0,13
12	G/PA12		0,15

## 6.3 Postup měření

V této kapitole je stručně popsán průběh experimentu začínající výrobou destiček o vhodném rozměru až do naměření potřebných dat.

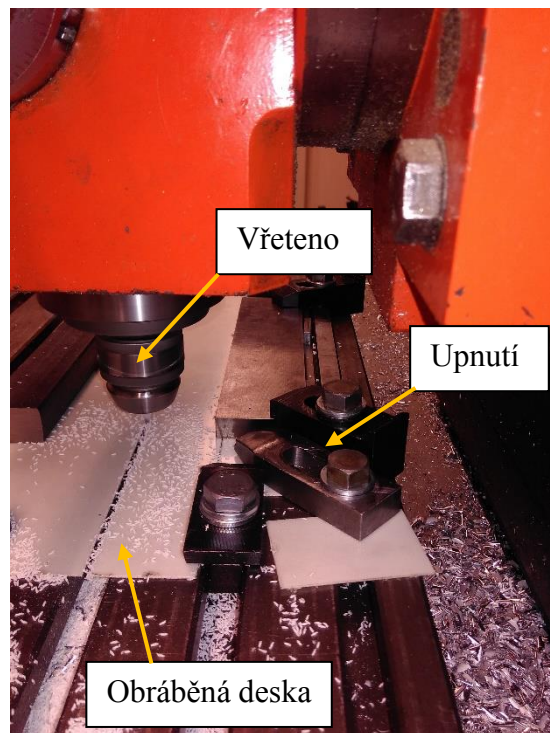
### 6.3.1 Výroba destiček o tloušťce 1 mm

V první řadě bylo nutné připravit si vhodný rozměr destiček, což znamenalo nadělit polotovar o rozměrech 600x400 mm na jednotlivé destičky o velikosti 40x70mm, aby bylo možné je zasunout do speciálního přípravku. Další uvažovaná možnost byla použití vodního paprsku, která se ale nakonec ukázala jako nevhodná varianta z důvodu vysoké ceny a šikmého průřezu, který je krajně nevhodný při následném vyhodnocení velikosti delaminace. Výsledek řezání vodním paprskem je patrný na obrázku 19. Řez se oproti kolmé hraně liší o úhel  $\alpha$ .



Obrázek 19 Ukázka řezu vodním paprskem

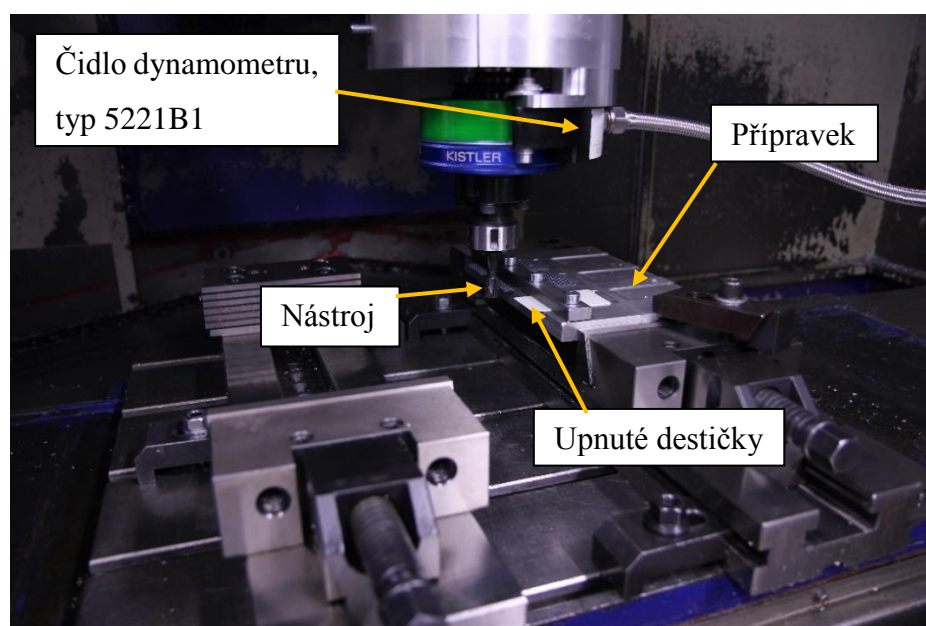
Výroba destiček tedy probíhala na konzolové frézce FNGJ 40, viz obrázek 20. Deska byla upnuta přímo na stůl a jednotlivé řezy probíhaly v drážce stolu. Tato metoda byla použita kvůli nutnosti dostatečného podepření desky z důvodu zamezení jejím vibracím, v případě nedostatečně tuhého upnutí by totiž obráběná deska vibrovala a tím opotřebovávala nástroj v mnohem větším rozsahu. K dělení materiálu byla použita tříbřitá fréza ze slinutého karbidu s diamantovým povlakem nanášeným metodou CVD od výrobce SECO. Tato fréza měla průměr 3 mm z důvodu snížení prořezu materiálu na minimum. Při výrobě bylo nutné dbát na dodržení stále stejné orientace vláken. V případě nedodržení stejné orientace u všech vyrobených destiček by mohly být ovlivněny výsledky měření.



Obrázek 20 Ukázka výroby destiček na frézce

### 6.3.2 Postup měření sil

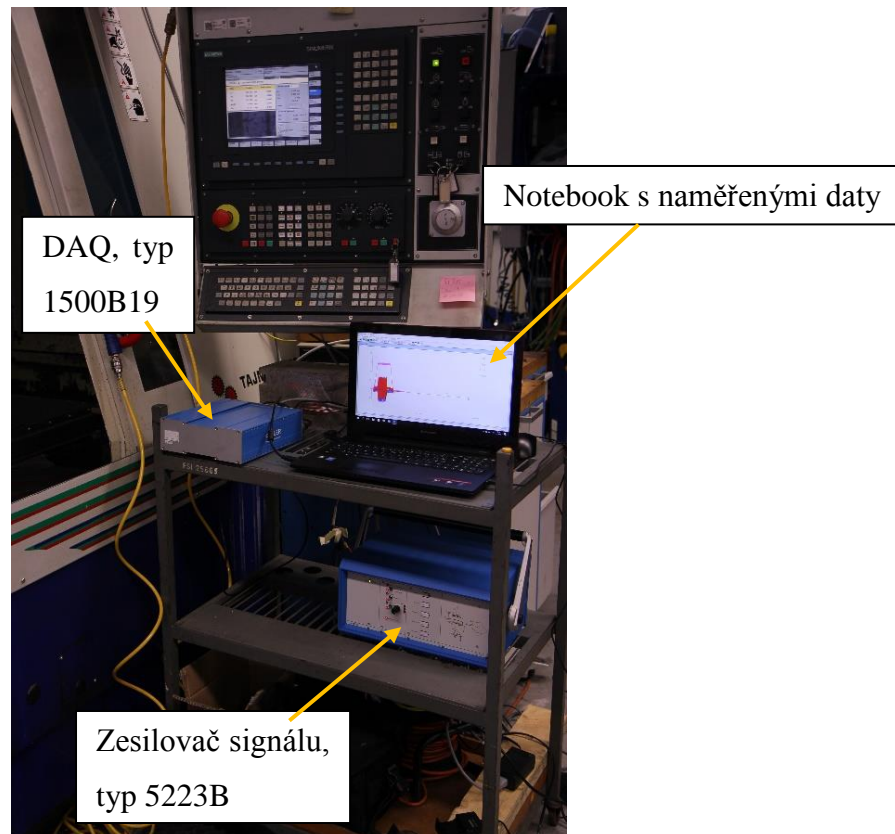
Prvním krokem při měření sil bylo upnutí destiček do výše zmíněného přípravku a jejich označení, viz obrázek 21. Po správném upnutí následovalo nastavení parametrů dle tabulky pro návrh experimentu. Dalším krokem bylo zarovnání destiček na stejnou délku pro zajištění relevantnosti dat a následně samotné měření.



Obrázek 21 Ukázka pracovního prostoru stroje



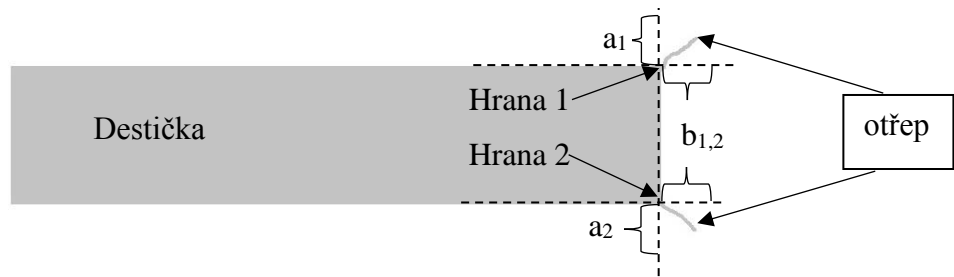
Data byla znamenávána na notebook připojený k dynamometru, viz obrázek 22. K záznamu dat byl použit specializovaný software Dynoware. Předposledním krokem bylo uložení záznamu pod názvem dané destičky a opatrné vyjmutí destiček. Delaminace vyjmutých destiček byla ihned po vyjmutí zaznamenána na fotoaparát, aby nedošlo k poškození v důsledku manipulace se vzorky.



Obrázek 22 Ukázka pracovního prostoru při záznamu dat zesilovač a DAQ

### 6.3.3 Zaznamenávání delaminace

Otřepy každé destičky byly zaznamenávány ze tří směrů kolmých na plochu destičky digitálním fotoaparátem Canon EOS 550D s možností záznamu ve FHD rozlišení, viz obrázek 24. Takto, pomocí tří kolmých směrů, byly destičky foceny z toho důvodu, aby bylo možné vypočítat reálnou plochu delaminace, která při obrábění vznikala, viz obrázek 23. Vzorce pro výpočet reálné plochy delaminace, viz rovnice 5 a 6. Následné vyhodnocení velikosti otřepů bylo provedeno v programu Adobe Photoshop CS6.



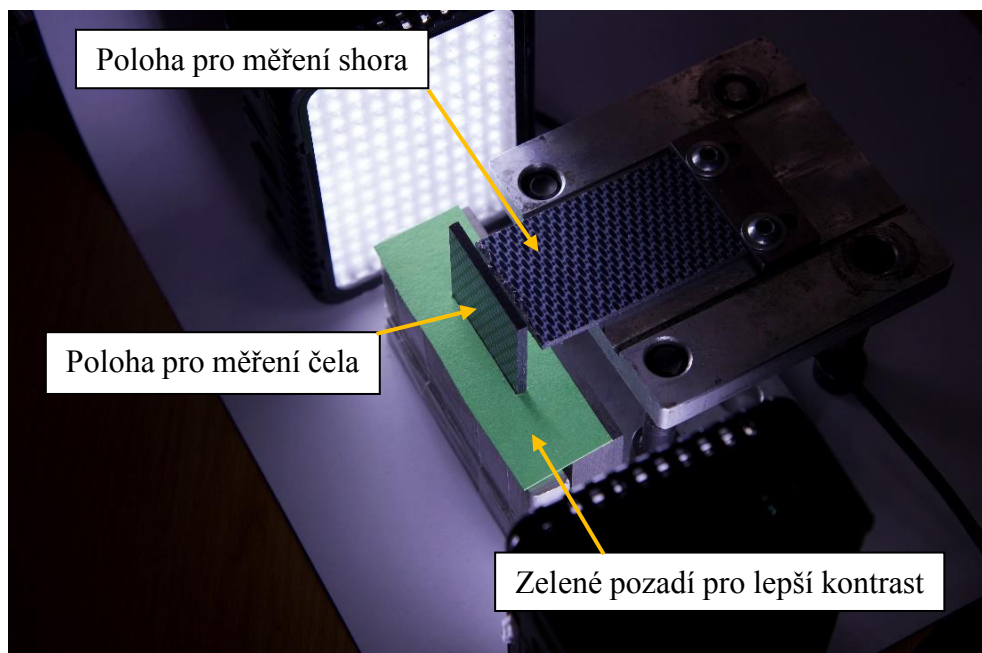
Obrázek 23 Ukázka výpočtu reálné plochy delaminace

$$A_{1,2} = \sqrt{(a_{1,2}^2 + b_{1,2}^2)} \quad (5)$$

- $A_{1,2}$  reálná plocha delaminace ( $\text{mm}^2$ ),
- $a_{1,2}$  průmět otřepu do osy „a“ (mm),
- $b_{1,2}$  průmět otřepu do osy „b“ (mm).

$$A_{max} = A_1 + A_2 \quad (6)$$

- $A_1$  je plocha delaminace u hrany 1 ( $\text{mm}^2$ ),
- $A_2$  je plocha delaminace u hrany 2 ( $\text{mm}^2$ ).



Obrázek 24 Ukázka sestavy pro záznam otřepů

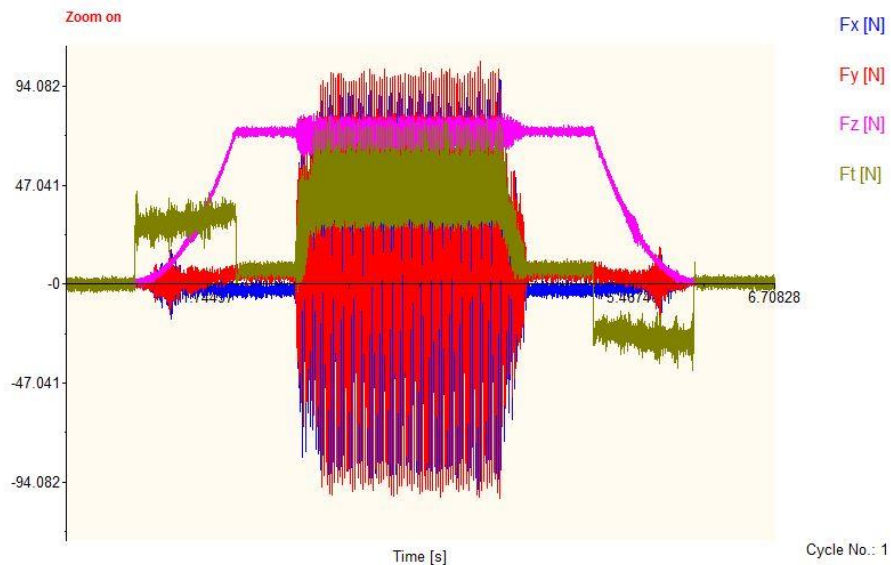
## 6.4 Zpracování dat

Tato kapitola je zaměřena na získávání konečných výsledků z dat naměřených použitými přístroji. Jedná se o vyhodnocení silových účinků zaznamenaných dynamometrem a vyhodnocení otřepů zaznamenaných fotoaparátem Canon.

### 6.4.1 Vyhodnocení sil

K vyhodnocení silových účinků byly potřeba tři složky síly, a to řezná složka síly  $F_c$ , normálová složka řezné síly  $F_{cN}$  a síla ve směru osy „z“  $F_z$ . Tyto složky bylo možné získat přímo z dat dynamometru. Po prvním měření bylo ovšem zjištěno, že po vynulování složky  $F_c$  a  $F_{cN}$ , přepočítané dynamometrem neodpovídají, a proto bylo nutné zaznamenávat také složky sil ve směrech osy „x“ a „y“ a potřebné složky síly  $F_c$  a  $F_{cN}$  dopočítat ručně a určit tak nulovou hodnotu. Druhá možnost byla určení řezné síly  $F_c$  z kroutícího momentu  $M_z$ . Pro záznam sil  $F_x$  a  $F_y$  získaných z dynamometru byl použit specializovaný software Dynoware, ze kterého byla data následně exportována do textového souboru. Tento textový soubor byl poté nahrán do tabulky v programu Microsoft Excel, která byla vytvořena s pomocí vedoucího bakalářské práce Ing. Petra Maška speciálně pro účely vyhodnocení těchto dat. Z této tabulky už byly dopočítané obě složky síly  $F_c$  a  $F_{cN}$  a spolu se silou  $F_z$  mohly být vytvořené potřebné grafy závislosti jednotlivých složek síly na posuvu na zub  $f_z$ . Na obrázku 25 je možné vidět data zaznamenaná programem Dynoware.





Obrázek 25 Ukázka dat zaznamenaných programem Dynoware

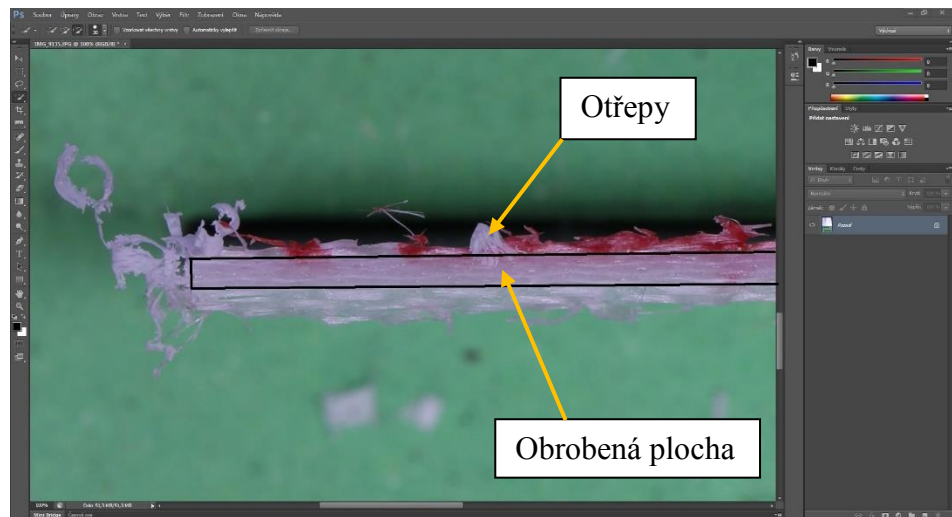
#### 6.4.2 Vyhodnocení delaminace

Vyhodnocení velikosti delaminace u kompozitních materiálů se standardně provádí metodou určení delaminačního faktoru, který byl popsán v rešeršní části. V této práci byla pro vyhodnocení zvolena metoda podobná, která ale pracuje s celkovou plochou delaminace porovnávanou s celkovou plochou řezu, díky čemuž by měla data vycházet mnohem přesněji, viz vzorec 5.

$$F_{dA} = \frac{A_{max}}{A_d} \quad (7)$$

- $F_{dA}$  je delaminační faktor plochy,
- $A_{max}$  je celková plocha delaminace,
- $A_d$  je obráběná plocha.

Vyhodnocení probíhalo v programu Adobe Photoshop, kam byl nejprve nahrán daný záznam a určen vztah mezi počtem pixelů a reálnou délkou destičky. Poté v tomto záznamu byla označena celková plocha otřepů náležících k dané hraně pomocí funkce Nástroj pro rychlý výběr, a nakonec byla celková plocha otřepů zaznamenána a uložena do příslušné tabulky v MS Excel. Na obrázku 24 je možné vidět ukázkou vyhodnocovaného souboru.



Obrázek 26 Ukázka vyhodnocení otřepů v programu Adobe Photoshop

#### 6.4.3 Vyhodnocení závislosti $K_c$ na $h_m$

V tomto experimentu bylo v první řadě důležité určit závislost měrné řezné síly  $K_c$  na průměrné tloušťce třísky  $h_m$  a z těchto závislostí následně získat koeficienty měrné řezné síly  $k_{c1}$  a  $m_c$ . Tyto koeficienty byly získány výpočtem z následujících vztahů:

$$K_c = \frac{k_{c1}}{h_m^{m_c}} \quad (8)$$

- $K_c$  je měrná řezná síla (MPa),
- $h_m$  je průměrná tloušťka třísky (mm),
- $k_{c1}$  a  $m_c$  jsou empirické konstanty [33].

Průměrná tloušťka třísky  $h_m$  byla získána následujícím vztahem:

$$h_m = f_z \times \sin \phi \quad (9)$$

- $f_z$  je posuv na zub (mm/zub),
- $\sin \phi$  je sinus úhlu záběru frézy, což lze vidět na obrázku 27.

Díky průměrné tloušťce třísky  $h_m$  je možné vypočítat celkovou plochu řezu  $A_d$ , která je nutná pro konečný výpočet řezné síly  $F_c$ , viz vzorec 8:

$$A_D = b_m \times h_m \quad (10)$$

- $b_m$  je průměrná tloušťka třísky,
- $h_m$  je průměrná šířka třísky.

Pro tento výpočet je ovšem nutné znát i průměrnou šířku třísky  $b_m$ , kterou lze získat z následujícího vztahu:

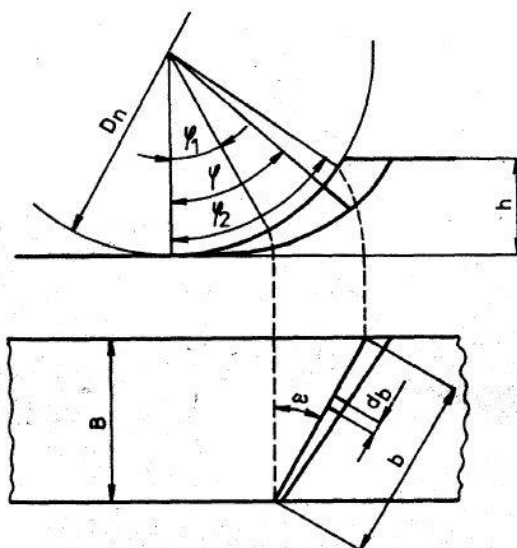
$$b_m = \frac{a_p}{\cos \omega} \quad (11)$$

- $a_p$  je hloubka třísky (mm),
- $\cos \omega$  je cosinus úhlu stoupání šroubovice nástroje, tento úhel je zobrazen na obrázku 27.

Při zpětném dopočítání řezné síly  $F_c$  lze při znalosti ostatních veličin už jen dosadit do následujícího vzorce:

$$F_c = K_c * A_D \quad (12)$$

- $K_c$  je měrná řezná síla (MPa),
- $F_c$  je řezná složka síly (N),
- $A_d$  je plocha řezu ( $\text{mm}^2$ ) [32].



Obrázek 27 Znárodnění úhlu  $\phi$  a úhlu  $\omega$  [32]

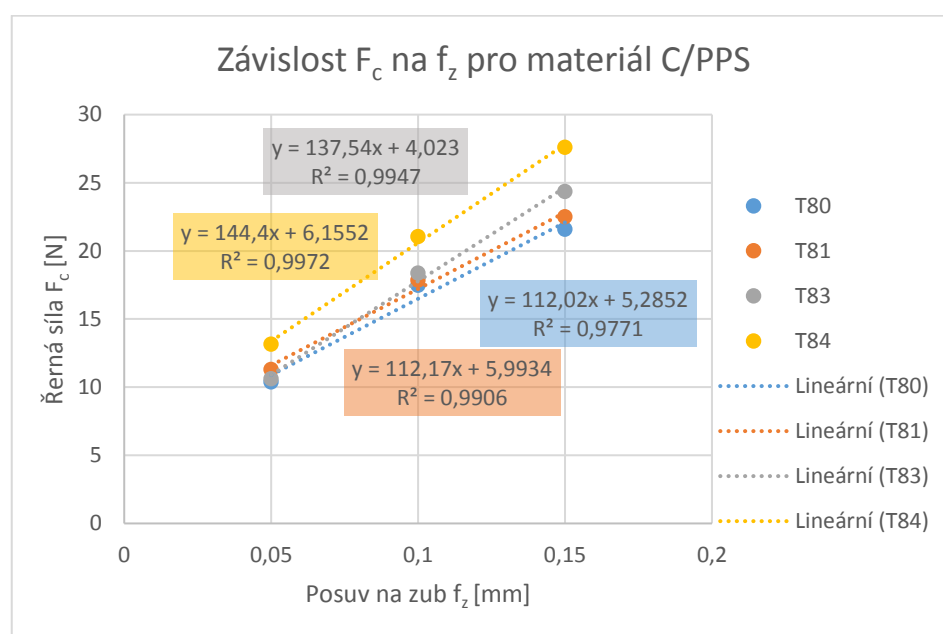
Po výpočtu potřebných veličin byl vytvořen graf závislosti měrné řezné síly  $K_c$  na průměrné tloušťce třísky  $h_m$  v programu MS Excel.

## 6.5 Vyhodnocení silových účinků

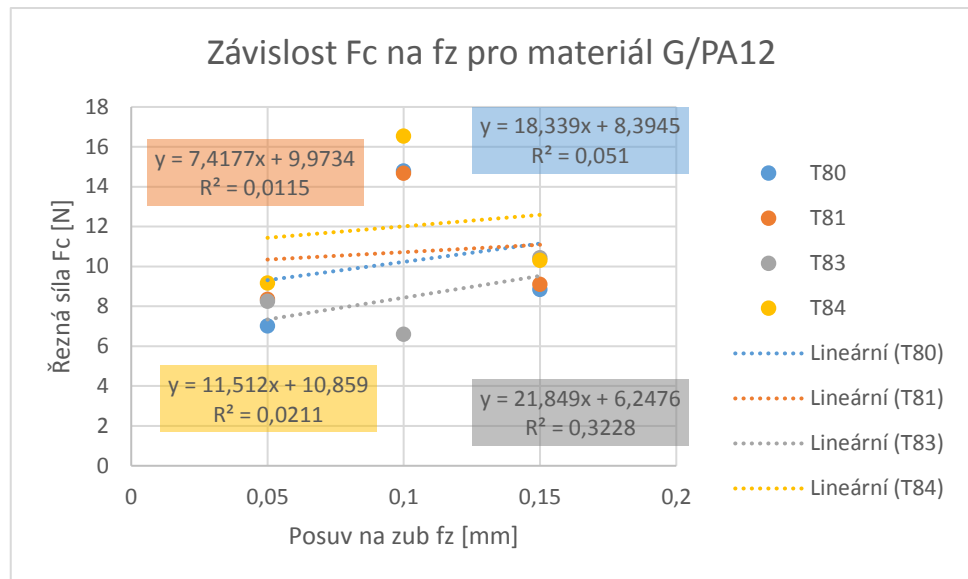
Jak již bylo zmíněno výše, tento experiment byl zaměřený na porovnání silových účinků jednotlivých nástrojů pomocí závislosti řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub  $f_z$  a dále na porovnání následné kvality povrchu po frézování pomocí určení celkové delaminace v závislosti na řezné síle.

### 6.5.1 Vyhodnocení sil

Vyhodnocení probíhalo v programu MS Excel, ve kterém byly následně sestaveny i grafy zobrazující jednotlivé nástroje v závislosti jednotlivých složek síly na posuvu na zub  $f_z$ . Předpoklad správnosti dat byl takový, že závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub  $f_z$  by měla být lineárně stoupající.



Graf 1 Závislost řezné síly na posuvu na zub pro materiál C/PPS a tloušťku destičky 1 mm

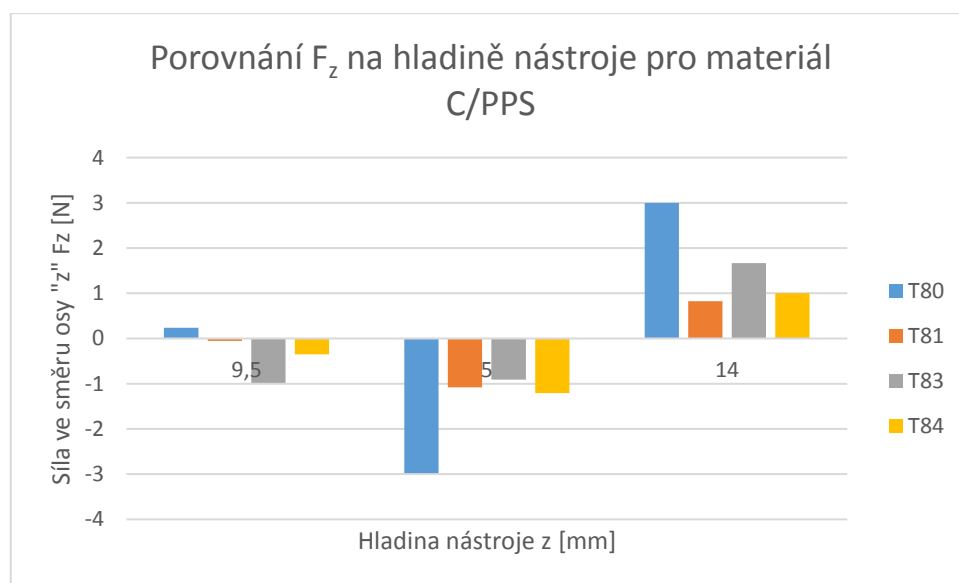


Graf 2 Závislost řezné síly na posuvu na zub pro materiál G/PA12 a tloušťku destičky 1 mm

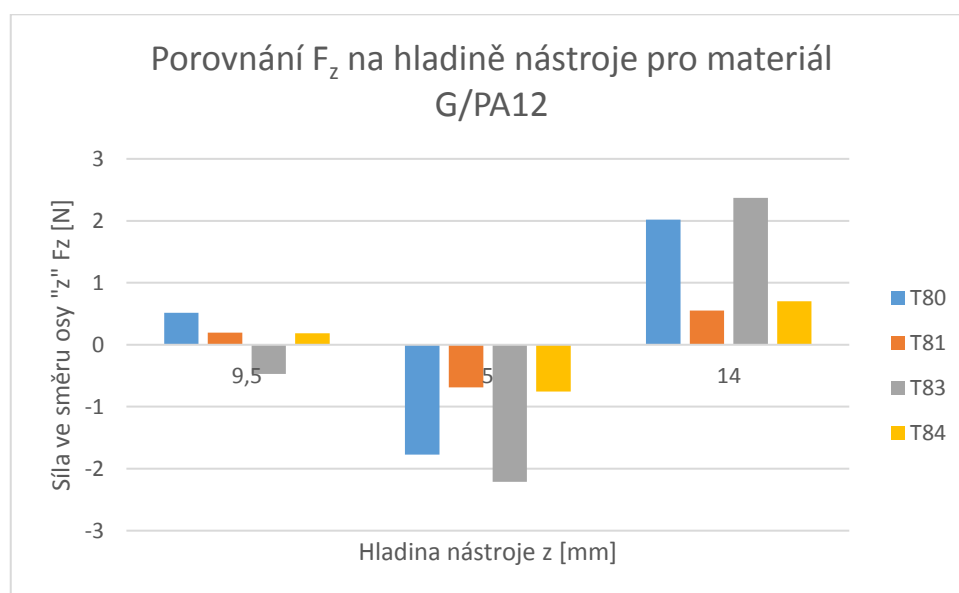
Z grafu 1 je patrné, že nejvyšších řezných sil dosahuje nástroj T84, jehož úhel čela je  $15^\circ$  a úhel sklonu šroubovice je  $5^\circ$ . Naopak nejnižších, a tedy pravděpodobně i nejlepších hodnot dosahuje nástroj T80 s úhlem čela  $25^\circ$  a úhlem sklonu šroubovice  $15^\circ$ . Z grafu je též patrné, že zatímco u nástrojů T80 a T81 je směrnice grafu nízká, tak u nástrojů T83 a T84 je směrnice o několik procent vyšší, což je pravděpodobně způsobeno velikostí úhlu čela těchto nástrojů.

V grafu 2 je vidět, že naměřená data neodpovídají teoretickému předpokladu o lineární závislosti. Tento jev může být způsobený hned několika faktory. Tím podle mne nejvíce pravděpodobným je, že došlo k rozechvění obráběného materiálu, jelikož materiál G/PA12 má mnohem menší pevnost než materiál C/PPS. Dalším možným faktorem by mohlo být to, že se pohybujeme v relativně malém rozsahu sil a tuto chybu by mohl způsobovat samotný dynamometr. Tato teorie je ale velice nepravděpodobná už jen z toho důvodu, že u druhého obráběného materiálu k podobnému jevu nedošlo. Bylo by tedy vhodné tento experiment zopakovat a daný jev blíže prozkoumat, to už ale není v rozsahu této práce.

V následujících dvou grafech můžeme vidět porovnání velikostí sil ve směru osy „z“ v závislosti na hladině nástroje pro oba obráběné nástroje. Obecný předpoklad je takový, že při nižší hladině nástroje bude materiál na nástroj působit silou směrem dolů, takže síla ve směru osy „z“ bude záporná. Přesně naopak by tomu mělo být v případě vyšší hladiny nástroje, tam by měl působit materiál na nástroj směrem nahoru, síla  $F_z$  by tedy měla být kladná. V místě překrytí obou šroubovic by se měla síla  $F_z$  blížit k nule, jedná se o hladinu nástroje 9,5 mm.



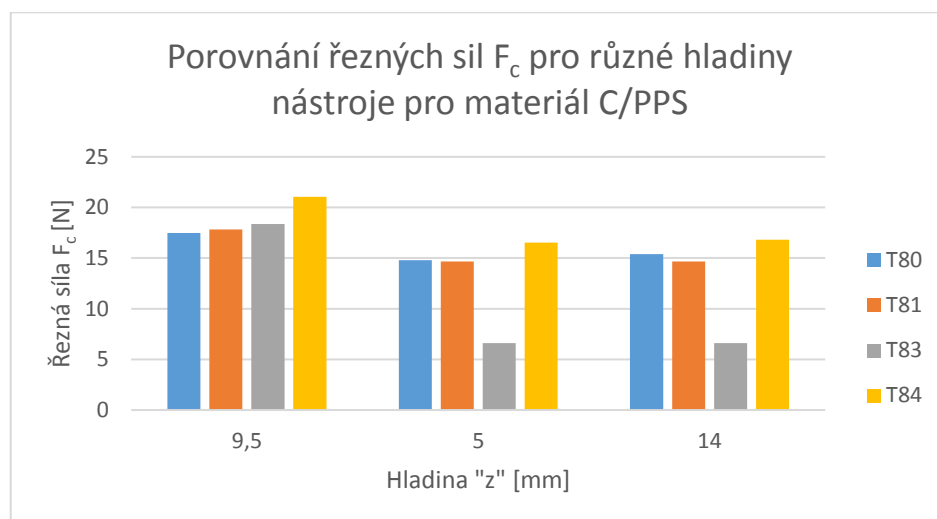
Graf 3 Graf závislosti síly ve směru osy „z“  $F_z$  na hladině nástroje z pro materiál C/PPS



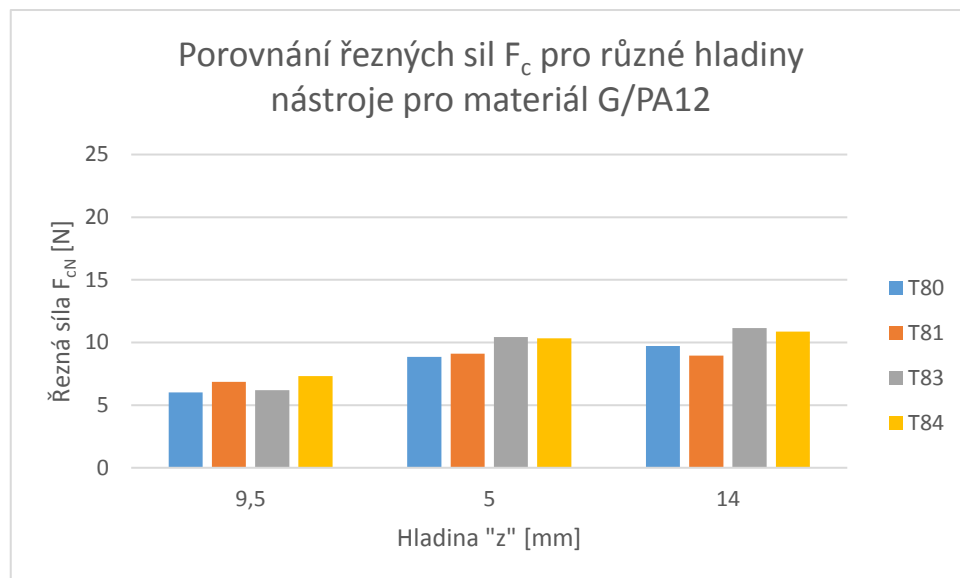
Graf 4 Graf závislosti síly ve směru osy „z“  $F_z$  na hladině nástroje z pro materiál G/PA12

Z grafů 1 a 2 je patrné, že se potvrzuje předpoklad závislosti úhlu sklonu šroubovice na směru a velikosti síly  $F_z$ . V případě, kdy dochází k překrytí obou šroubovic, tedy v hladině  $z = 9,5$  mm, jsou síly téměř nulové, mírné vychýlení mohlo být způsobeno nepřesným upnutím nástroje do kleštiny. Z grafů je též patrné, že největší vliv na velikost síly do osy „z“ mají nástroje T80 a T83, což je s největší pravděpodobností dáno jejich úhlem stoupání šroubovice. Pro co nejnižší sílu ve směru osy „z“ se tedy zdá být lepší nižší úhel stoupání šroubovice.

V následujících sloupcových grafech máme možnost vidět porovnání řezných sil  $F_c$  a  $F_{cN}$  při stejné hodnotě posuvu, a to  $f_z = 0,1$  mm. Můžeme zde vidět porovnání sil pro všechny použité nástroje a oba použité materiály.

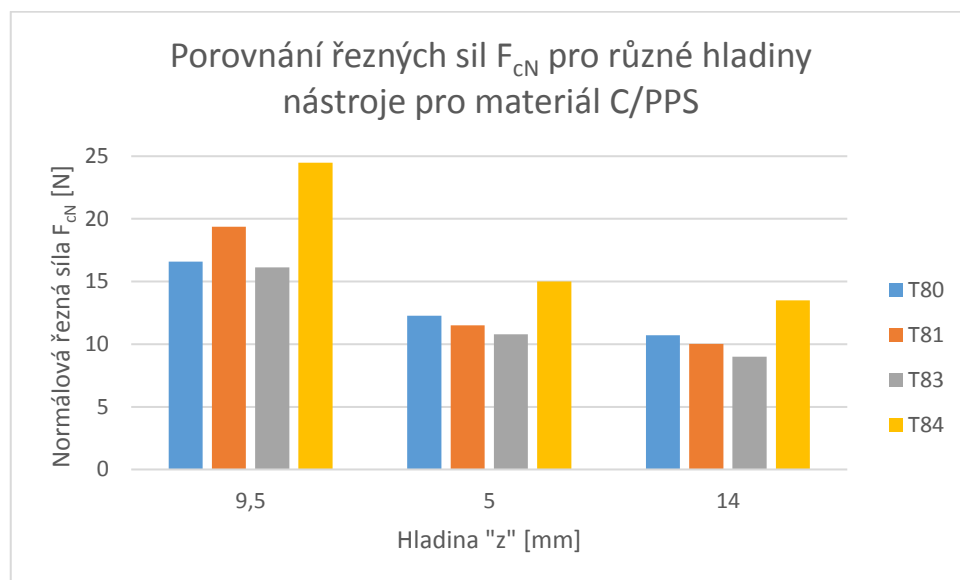


Graf 5 Porovnání řezných sil  $F_c$  pro různé hladiny nástroje pro materiál C/PPS



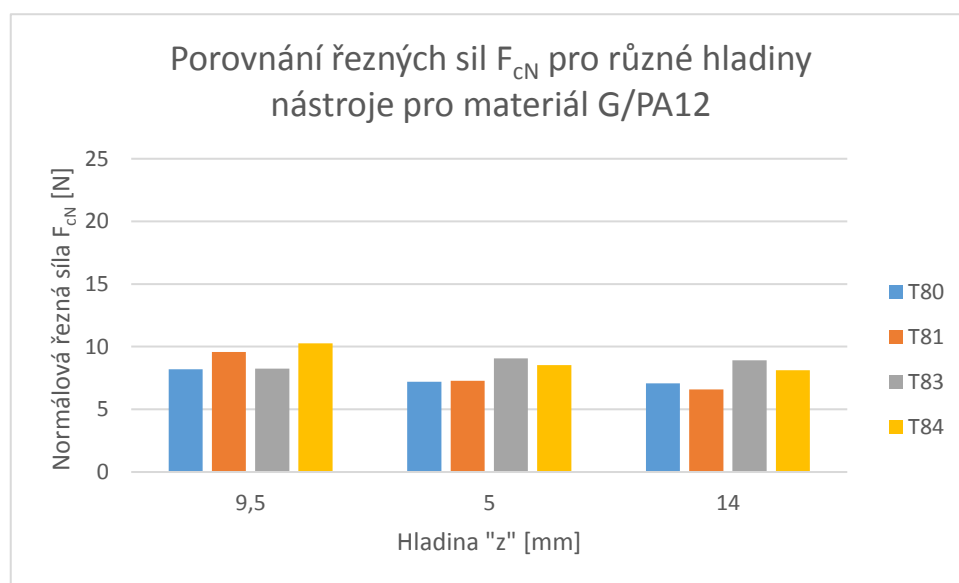
Graf 6 Porovnání řezných sil  $F_c$  pro různé hladiny nástroje pro materiál G/PA12

Z grafů 5 a 6 je patrné, že různé hladiny „z“, ve kterých se nástroje pohybovaly, neměly na velikost řezné síly  $F_c$  téměř žádný vliv. Z grafů je pouze patrné, že u materiálu C/PPS docházelo k vyšším řezným silám než u materiálů G/PA12, což je vzhledem k jejich rozdílné pevnosti předvídatelné.



Graf 7 Porovnání řezných sil  $F_{cN}$  pro různé hladiny nástroje pro materiál C/PPS



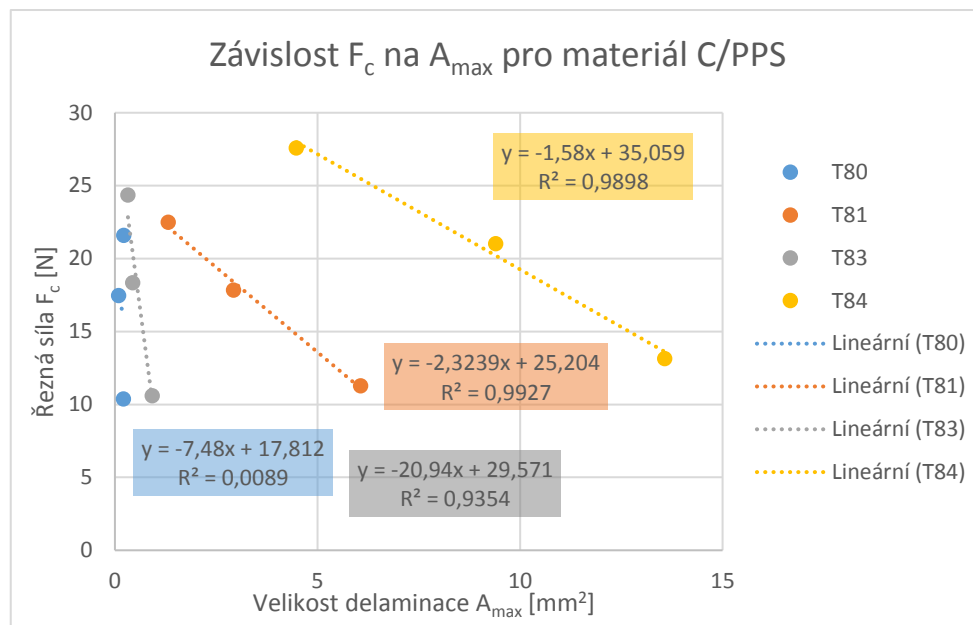


*Graf 8 Porovnání řezných sil  $F_{cN}$  pro různé hladiny nástroje pro materiál G/PA12*

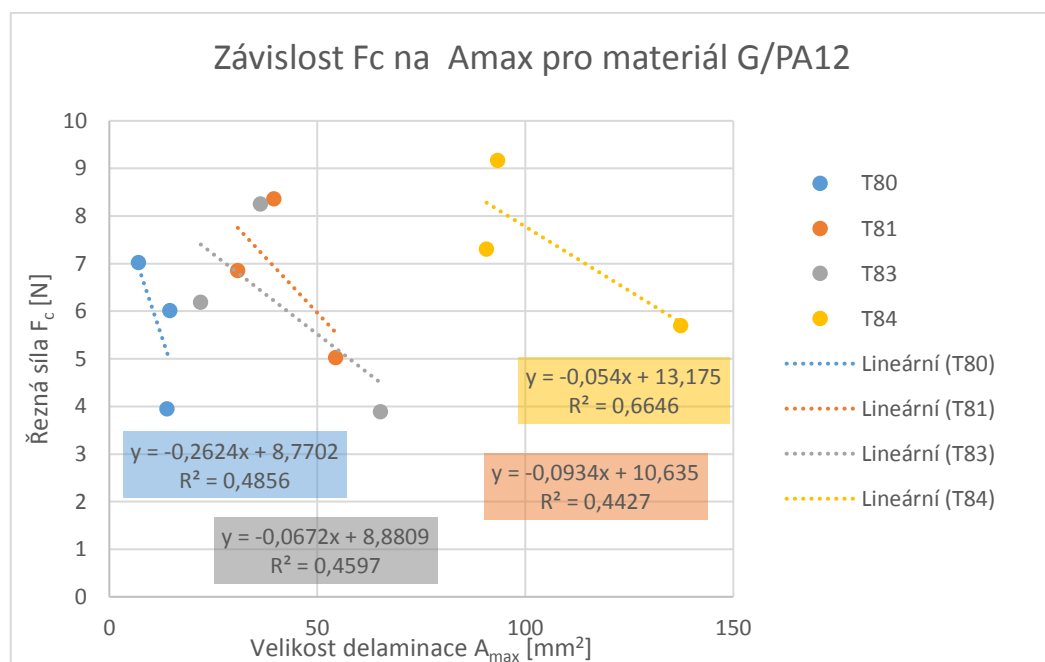
Z předchozích dvou grafů je patrné, že vliv hladiny „z“, ve které se nástroje pohybovaly, má na normálovou řeznou sílu  $F_{cN}$  minimální vliv stejně jako v případě řezné síly  $F_c$ , viz grafy 5 a 6.

#### 6.5.2 Vyhodnocení otřepů

Vyhodnocení otřepů probíhalo v programu Adobe Photoshop CS6, ze kterého byla následně exportována data o celkové ploše delaminace do programu MS Excel. V tomto programu už byly sestaveny grafy závislosti velikosti plochy delaminace na řezné síle, které můžeme vidět níže v grafech 9 a 10.



Graf 9 Porovnání vlivu řezné síly  $F_c$  na vznik delaminace pro jednotlivé nástroje u materiálu C/PPS



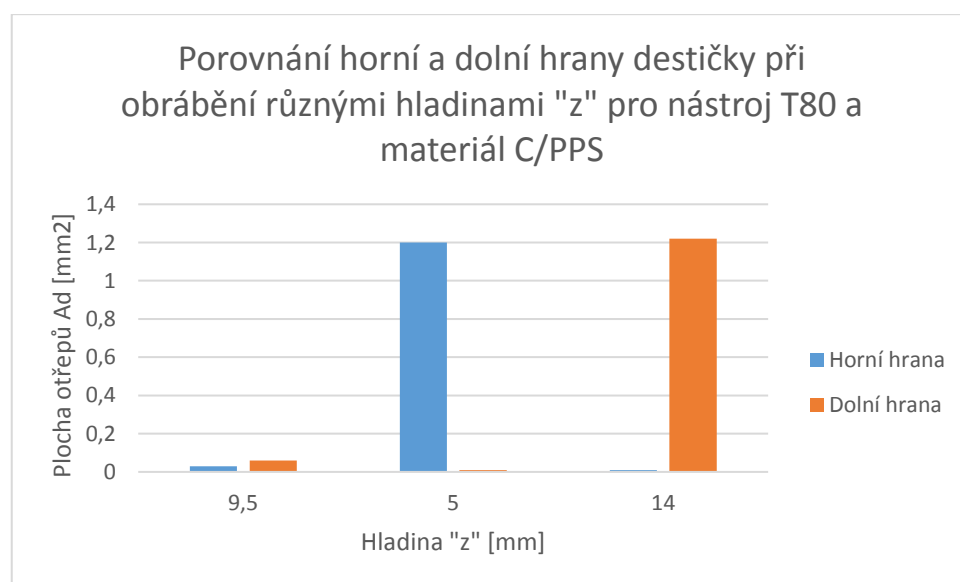
Graf 10 Porovnání vlivu řezné síly  $F_c$  na vznik delaminace pro jednotlivé nástroje u materiálu G/PA12

Z grafu 9 je patrné, že mezi velikostí plochy delaminace a řeznou silou existuje lineární závislost. Z grafu je též patrný vliv geometrie na velikost celkové delaminace, protože zatímco u nástroje T80 velikost delaminace

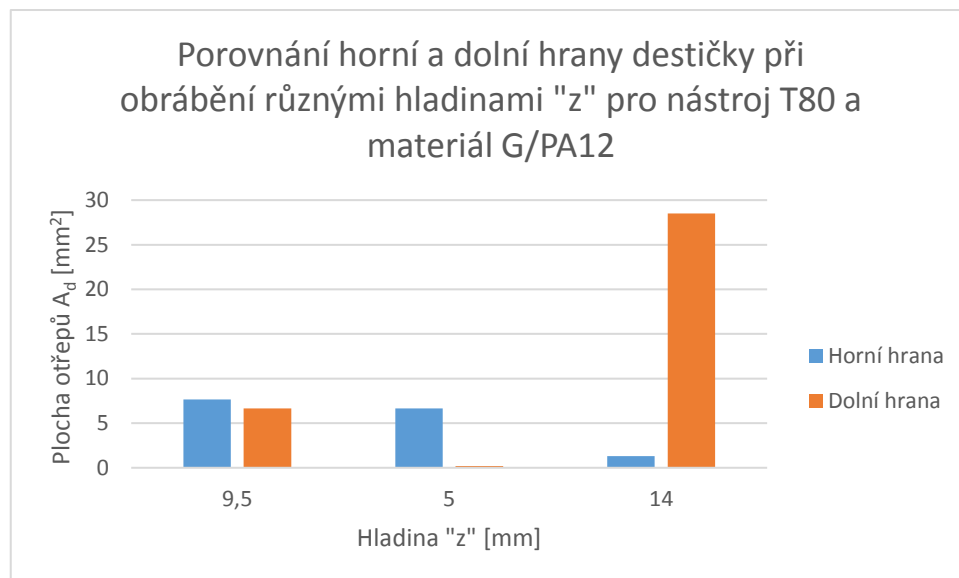
velice rychle klesá v závislosti na řezné síle, tak u nástroje T84 má tato závislost pozvolnější charakter.

Data v grafu 10 představují výsledky velikosti delaminace u materiálu G/PA12. Z grafu je též patrný klesající trend závislosti řezné síly na velikosti delaminace stejně jako v případě materiálu C/PPS, ale není zde zcela patrná mocinná závislost. Tento jev může být pravděpodobně způsoben nižší pevností obráběného materiálu a tím i vyšším množstvím faktorů, které tento jev mohou ovlivnit. Prvním z těchto faktorů může být, že velikosti sil, kterých se při frézování dosahovalo, jsou velice malé a je možné, že část silových účinků byla vyhodnocena pouze jako signálový šum. Dalším možným faktorem je samotná metoda zaznamenávání otřepů. Při vyhodnocení tohoto materiálu vznikalo velké množství otřepů, které se mohly překrývat, případně mohly být tvarově zdeformované, což vedlo k nepřesnému určení jejich reálné plochy.

Vzhledem k hladinám „z“, ve kterých nástroje obráběly, byla též vyhodnocena velikost otřepů na obou stranách destičky. Vyhodnocení těchto otřepů v závislosti na hladině „z“ bylo vyhodnoceno pro nástroj T80 a oba použité materiály. Tato porovnání je možné pozorovat v grafech 11 a 12.



*Graf 11 Porovnání horní a dolní hrany destičky při obrábění různými hladinami "z" pro nástroj T80 a materiál C/PPS*



*Graf 12 Porovnání horní a dolní hrany destičky při obrábění různými hladinami "z" pro nástroj T80 a materiál G/PA12*

Jak je možné pozorovat v grafech 11 a 12, velikost otřepů je silně závislá na sklonu šroubovice nástroje, viz hladiny „5“ a „14“. U hladiny „9,5“, kde byla použita dvojitě kompresní šroubovice, docházelo k relativně podobným plochám otřepů. U ostatních nástrojů vznikal podobný trend závislosti plochy otřepů na jednotlivých hladinách „z“. Nástroj T80 byl vybrán z důvodu nejnižšího výskytu otřepů.

### 6.5.3 Dílčí závěr

Tento experiment potvrdil teoretické předpoklady o závislosti řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub  $f_z$ , a to tak, že závislost této síly na posuvu je lineárně závislá s posuvem a má rostoucí trend, čímž byla potvrzena správnost naměřených dat.

Dále bylo zjištěno, že u nástrojů T80 a T81 dochází k mírnějšímu nárůstu řezné síly  $F_c$  v závislosti na posuvu na zub  $f_z$ , než u nástrojů T83 a T84. Toto chování může být způsobeno rozdílným úhlem čela, které má v případě nástrojů T80 a T81 velikost  $25^\circ$  a v případě nástrojů T83 a T84 má velikost  $15^\circ$ .

Z grafů pro porovnání sil působících ve směru osy „z“ bylo zjištěno, že největší vliv na tuto složku mají nástroje T80 a T83, jejichž úhly stoupání šroubovice dosahují hodnoty  $15^\circ$ , naopak nejmenší vliv měly nástroje T81 a T84, jejich úhel stoupání šroubovice byl pouze  $5^\circ$ .

Z těchto výsledků je patrné, že při vyšším úhlu stoupání šroubovice nástroje roste síla ve směru osy „z“.

Poslední část tohoto experimentu byla zaměřena na zjištění závislosti velikosti plochy delaminace na řezné síle. Jak je možné vidět v předchozích grafech, tato závislost má mocninný klesající charakter u všech nástrojů a obou materiálů.

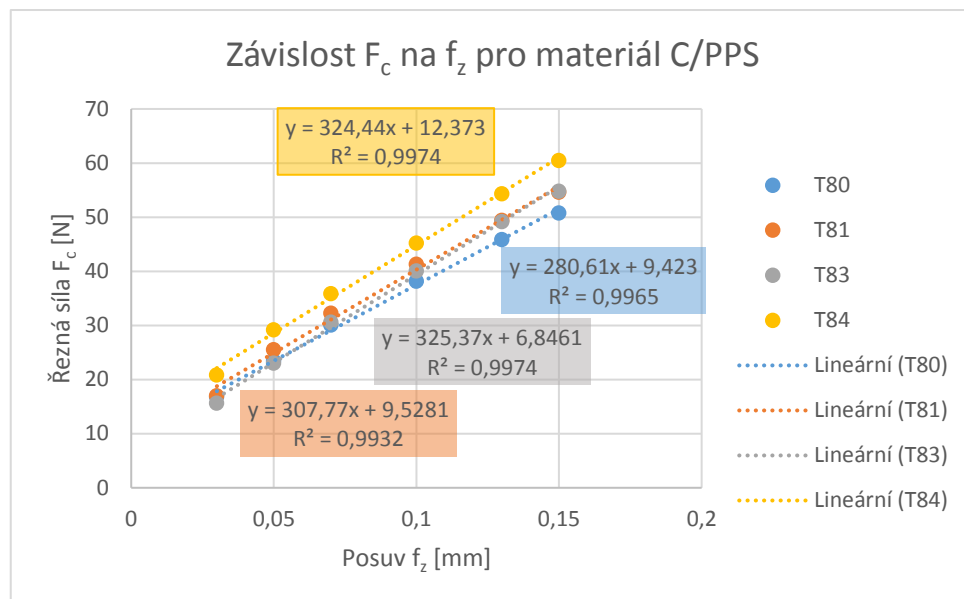
## 6.6 Vyhodnocení experimentu pro stanovení koeficientů $k_{c1}$ a $m_c$

Tento experiment byl zaměřen na zjištění koeficientů měrné řezné síly v závislosti na průměrné tloušťce třísky. Z teorie obrábění vyplývá, že tato závislost by měla mít mocninný charakter a měrná řezná síla by měla mít se stoupající tloušťkou třísky klesající mocninný charakter.

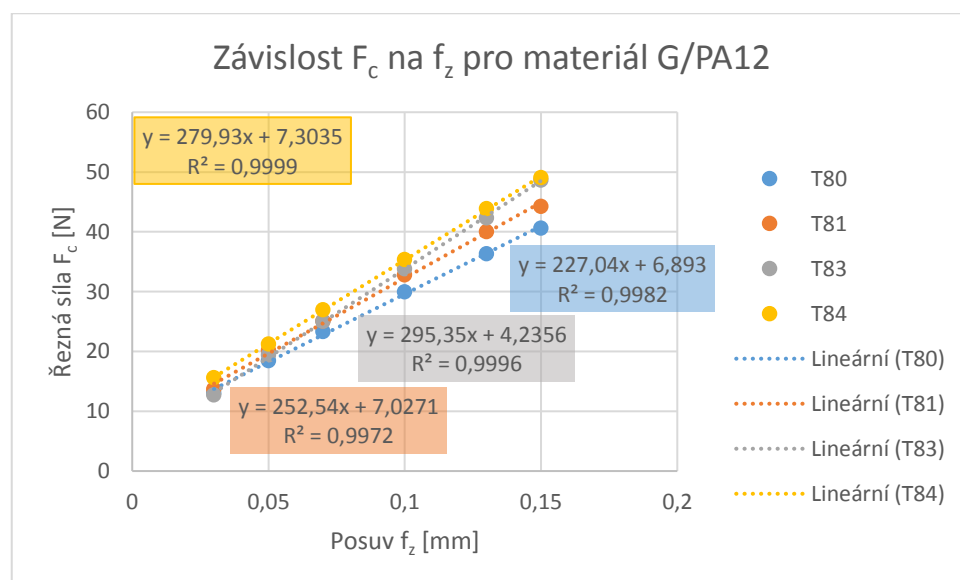
Pro ověření výsledků z předchozího experimentu o závislosti velikosti řezných sil na delaminaci a posuv na zub jednotlivých nástrojů byla tato vyhodnocení provedena i v tomto experimentu z naměřených dat.

### 6.6.1 Vyhodnocení sil

Zde by, opět jako v předchozím experimentu, měla vycházet lineární závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub  $f_z$  se stoupajícím trendem pro všechny nástroje a oba použité materiály jako ověření správnosti měření, viz grafy 13 a 14.



Graf 13 Závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub  $f_z$  pro materiál C/PPS



Graf 14 Závislost řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub  $f_z$  pro materiál G/PA12

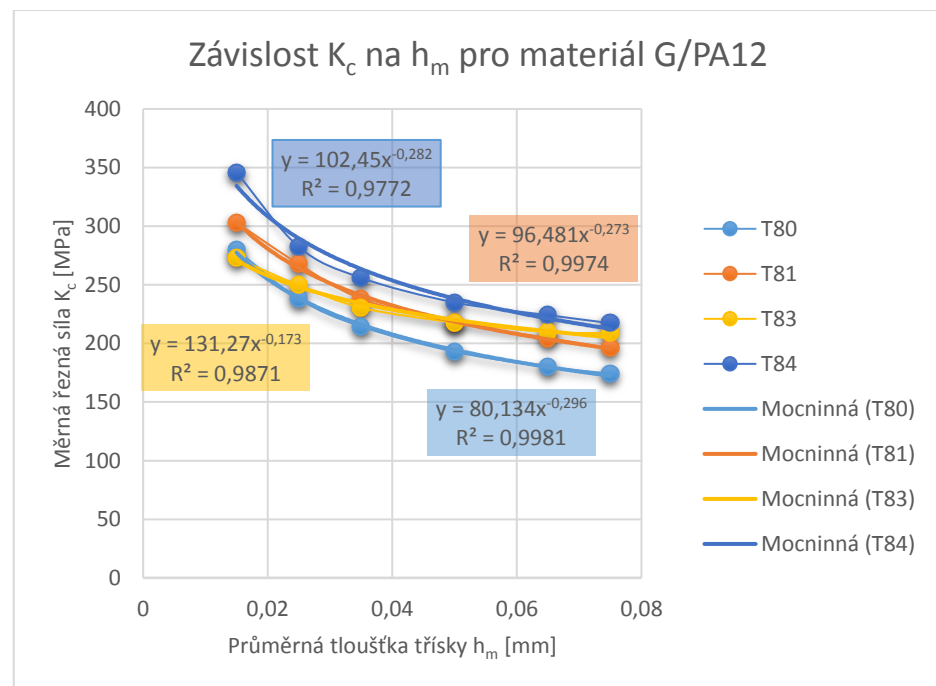
Z obou předchozích grafů je patrné, že závislost řezné síly na posuvu na zub je opravdu lineárně závislá a má rostoucí trend, což potvrzuje správnost měření.

Z těchto grafů se též potvrzuje domněnka z předchozího experimentu, a to, že nejvyšších řezných sil dosahuje nástroj T84, kdežto nejnižších hodnot dosahuje opět nástroj T80, z čehož plyne, že pro obrábění kompozitních desek je pravděpodobně lepší vyšší úhel čela v kombinaci s vysokým

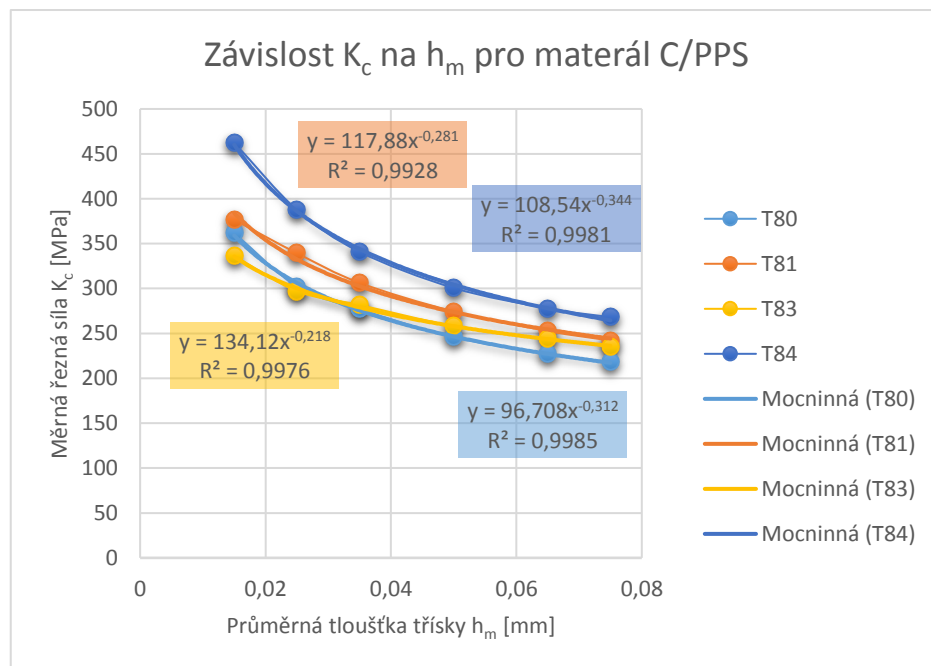
úhlem stoupání šroubovice oproti nízkým hodnotám úhlu čela a nízkým hodnotám úhlu stoupání šroubovice vzhledem k výsledné kvalitě povrchu, což nám částečně potvrzuje i výsledek jednoho z předchozích testů, kde při klesající řezné síle klesalo i množství otřepů, které po obrábění vznikaly.

#### 6.6.2 Stanovení závislosti $K_c$ na $h_m$

Tento experiment byl zaměřen na zjištění závislosti měrné řezné síly na tloušťce odřezávané vrstvy a na zjištění koeficientů měrné řezné síly. Z tohoto důvodu byl sestaven graf závislosti měrné řezné síly na průměrné tloušťce třísky pro oba použité materiály, viz graf 15 a graf 16. Z těchto grafů následně byly odečteny hodnoty koeficientů  $k_{c1}$  a  $m_c$ .



Graf 15 Závislost měrné řezné síly na průměrné tloušťce třísky pro materiál G/PA12



Graf 16 Závislost měrné řezné síly na průměrné tloušťce třísky pro materiál C/PPS

Z grafů je patrné, že měrná řezná síla se v závislosti na průměrné tloušťce třísky exponenciálně snižuje. Tento výsledek nám potvrzuje i hodnota spolehlivosti  $R^2$ .

Na základě následujícího vzorce pro výpočet měrné řezné síly  $K_c$  byly sestaveny následující dvě tabulky koeficientů měrné řezné síly  $k_{c1}$  a  $m_c$ . První tabulka odpovídá koeficientům pro materiál G/PA12, druhá tabulka odpovídá výsledkům pro materiál C/PPS.

$$K_c = \frac{k_{c1}}{h_m^{m_c}} \quad (12)$$

- $K_c$  je měrná řezná síla (MPa),
- $h_m$  je průměrná tloušťka třísky (mm),
- $k_{c1}$  a  $m_c$  jsou empirické konstanty [33].

Tabulka 7 Tabulka koeficientů měrné řezné síly pro materiál G/PA12

Nástroj	$k_{c1}$	$m_c$
T80	80,134	0,312
T81	96,481	0,273
T83	131,27	0,173
T84	102,45	0,282



Tabulka 8 Tabulka koeficientů měrné řezné síly pro materiál C/PPS

Nástroj	$k_{c1}$	$m_c$
T80	96,708	0,312
T81	117,88	0,281
T83	134,12	0,218
T84	108,54	0,344

### 6.6.3 Dílčí závěr

Tento experiment byl primárně zaměřený na určení koeficientů měrné řezné síly  $K_c$ . Dále pak byly v experimentu vyhodnoceny závislosti řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub  $f_z$ , což nám pouze potvrdilo chování jednotlivých geometrií nástrojů při obrábění, tedy, že nejmenších řezných sil dosahoval nástroj T80, naopak nástroj T84 dosahoval sil největších.

## 7 Závěr

Tato práce byla primárně zaměřena na frézování kompozitních desek. V rešeršní části byla teoreticky popsána problematika v oblasti frézování kompozitních materiálů. Byly zde popsány základní informace o kompozitech z hlediska jejich složení a rozdělení, dále bylo pojednáno o různých možnostech měření silových účinků na frézce a konec rešeršní části byl věnován obráběcím nástrojům používaným na frézce, kde byla blíže rozebrána geometrie a také použité materiály pro nástroje vhodné pro frézování kompozitů.

V části experimentální bylo následně vypracováno několik experimentů zaměřených na silové účinky mezi nástroji a obráběným materiálem.

V prvním experimentu bylo hlavním cílem zjistit obrobitelnost destiček o tloušťce 1 mm a porovnat geometrie použitých nástrojů. K tomu byly použity grafy závislosti řezné síly  $F_c$  na posuvu na zub  $f_z$ . Druhý úkol tohoto experimentu byl porovnat jednotlivé nástroje vzhledem k síle působící ve směru osy „z“ a vzhledem k hladině „z“, ve které obráběly. K porovnání těchto sil ve směru osy „z“ bylo využito sloupcových grafů. Posledním úkolem tohoto experimentu bylo stanovit závislost mezi řeznou

silou  $F_c$  a celkovou plochou delaminace  $A_{max}$  vzniklou při frézování a následně vyhodnotit velikost otřepů v závislosti na různých hladinách „z“ nástroje.

Z dat naměřených v prvním experimentu bylo zjištěno, že nejnižších, a tedy i nejlepších hodnot velikosti řezné síly  $F_c$  v závislosti na posuvu na zub dosáhl nástroj T80, jehož úhel čela je  $25^\circ$  a úhel stoupání šroubovice je  $15^\circ$ . Dále bylo potvrzeno, že při frézování šroubovicí s kladným stoupáním byla síla působící ve směru osy „z“ záporná a při frézování záporným úhlem stoupání kladná. Při frézování dvojité kompresní šroubovicí docházelo k téměř nulovým silám ve směru osy „z“. V tomto testu se též potvrdilo, že nejvyšších sil ve směru osy „z“ dle předpokladu dosahují nástroje T80 a T83. Tento fakt je s nejvyšší pravděpodobností způsoben vyšším úhlem sklonu šroubovice, a to  $15^\circ$  oproti nástrojům T81 a T84, které měly úhel stoupání šroubovice pouze  $5^\circ$ . V posledním úkolu tohoto experimentu byla stanovena klesající závislost řezné síly  $F_c$  na velikosti plochy delaminace  $A_{max}$ , což bylo potvrzeno u všech použitých nástrojů. Co se týče plochy delaminace v závislosti na hladině „z“ nástroje, potvrdila se domněnka, že velikost otřepů na horní, či dolní straně destičky je silně závislá na sklonu šroubovice nástroje.

Druhý experiment byl zaměřený na obrábění destiček o tloušťce 3 mm. V tomto experimentu bylo hlavním cílem určit koeficienty měrné řezné síly  $K_c$ , a to  $K_{c1}$  a  $m_c$ . Toho bylo dosaženo pomocí grafu závislosti měrné řezné síly  $K_c$  na průměrné tloušťce třísky  $h_m$ .

## 8 Seznam použité literatury

- [1] *Definice a historie* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/historie.pdf>
- [2] [https://drive.google.com/file/d/0B8vQSuH1vL\\_vckxkMGhoMjYtbWs/view](https://drive.google.com/file/d/0B8vQSuH1vL_vckxkMGhoMjYtbWs/view)
- [3] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [4] *Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialupouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
- [5] JANCÁR, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů* 1. vyd. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [6] HUMÁR, A. *Obrábění vláknově vyztužených kompozitů: Machining fibre reinforced composites: teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru strojírenská technologie*. Brno: VUTIUUM, 2004. 26 s. ISBN 80-214-2740-x.
- [7] *Technologie výroby kompozitů* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/technologie.pdf>
- [8] KUŽNÍK, Jan. *Mark ONE je první tiskárna na světě, která tiskne z uhlíkových vláken* [online]. 2014 [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: [http://technet.idnes.cz/3d-tiskarna-mark-one-tiskne-z-uhlikovych-vlaken-flu-/hardware.aspx?c=A140128\\_235230\\_hardware\\_kuz](http://technet.idnes.cz/3d-tiskarna-mark-one-tiskne-z-uhlikovych-vlaken-flu-/hardware.aspx?c=A140128_235230_hardware_kuz)
- [9] KŘENA, Josef. *Termoplastové kompozity v leteckých aplikacích* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <http://www.csm-kompozity.wz.cz/RTLaplikace.pdf>
- [10] *PPS – polyfenylensulfid* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pps.html>
- [11] *Ertalon* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <http://www.vmplast.cz/sortiment/polyamid/ertalon/>

- [12] BRYCHTA, J., ČEP, R., SADÍLEK, M., NOVÁKOVÁ, J., PETŘKOVSKÁ, L. Nové směry v progresivním obrábění. [online]. [vid. 1. 5. 2013]. 1. vyd. Ostrava:Ediční středisko VŠB-TUO, 2007. 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>.
- [13] CHILDS, T. Metal machining: Theory and applications. Elsevier, 2000, 408 s. ISBN 0-340-69159-X.
- [14] ČEP, Robert. *PŘÍMÉ MĚŘENÍ SIL A MOMENTŮ* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_09.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_09.pdf)
- [15] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [16] [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: [http://www.fibreglast.com/product/Prepreg\\_3K\\_Plain\\_Weave\\_Carbon\\_Fiber\\_Fabric\\_03115/All\\_Carbon\\_Fiber](http://www.fibreglast.com/product/Prepreg_3K_Plain_Weave_Carbon_Fiber_Fabric_03115/All_Carbon_Fiber)
- [17] *KOMPOZITNÍ MATERIÁLY* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6\\_kompozitni-materialy.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf)
- [18] Technologie výroby kompozitů. [online]. 30.12.2005 [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejichpopis-a-schemata.html>
- [19] *Thermoplastic composites “clip” time, labor on small but crucial parts* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-composites-clip-time-labor-on-small-but-crucial-parts>
- [20] BAUMRUK, Martin. *Mechanika kompozitních materiálů, analytické metody výpočtu stabilitních úloh kompozitních desek a sendvičových panelů a jejich porovnání s MKP* [online]. [cit. 2017-07-04]. Dostupné z: [http://www.kompozity.info/clanky/compdb/ztrata\\_stability\\_kompozitu.pdf](http://www.kompozity.info/clanky/compdb/ztrata_stability_kompozitu.pdf)

- [21] SEDLÁČEK, Jan. Problémy při obrábění kompozitních materiálů. *MM Spektrum* [online]. Brno, 2007, **2007**(4) [cit. 2017-07-04]. Dostupné z:  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [22] Uhlíkové vlákno. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-07-11]. Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9\\_vl%C3%A1kno](https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9_vl%C3%A1kno)
- [23] SEDLÁČEK, Jan. Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2006, (6), 28 [cit. 2017-07-05]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [24] ZEMAN, Pavel. PRODUKTIVNÍ A HOSPODÁRNÉ OBRÁBĚNÍ VLÁKNOVÝCH KOMPOZITU. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2014, (5), 24 [cit. 2017-07-05]. ISSN 1212-2572. Dostupné z:  
<http://www.mmspektrum.com/clanek/produktivni-a-hospodarne-obrabeni-vlaknovych-kompozitu.html>
- [25] ZEMAN, Pavel a Petr MAŠEK. Efektivní frézování kompozitů s termoplastickou maticí. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2013, (5), 60 [cit. 2017-07-05]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/efektivni-frezovani-kompozitu-s-termoplastickou-matrici.html>
- [26] Cutting Force Measurements with Kistler. *Kistler* [online]. [cit. 2017-07-11]. Dostupné z:  
<https://www.kistler.com/no/en/products/products-by-applications/>
- [27] Servomechanismy a automatizace. *Katedra výrobních systémů* [online]. [cit. 2017-07-11]. Dostupné z:  
<http://www.kvs.tul.cz/serva>

- [28] Měřicí vybavení KTO/RTI. *Západočeská univerzita* [online]. [cit. 2017-07-11]. Dostupné z: [http://www.kto.zcu.cz/o-katedre/Vybaveni\\_katedry/merici\\_vybaveni\\_KTO.html](http://www.kto.zcu.cz/o-katedre/Vybaveni_katedry/merici_vybaveni_KTO.html)
- [29] *Rozdělení plastů a jejich průmyslové zpracování* [online]. [cit. 2017-07-11]. Dostupné z: <http://ucivozs.sweb.cz/plast2.html>
- [30] Nylon 12. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-07-11]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nylon\\_12](https://en.wikipedia.org/wiki/Nylon_12)
- [31] COLLIGAN, K.; RAMULU, M. Delamination in surface plies of graphite/epoxy caused by the edge trimming process. In: *Processing and Manufacturing of composite materials*. 1991. p. 113-125.
- [32] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [33] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2.

## 9 Seznam obrázků

Obrázek 1 Ukázka velikosti uhlíkového vlákna v porovnání s lidským vlasem [23].....	13
Obrázek 2 Typy tkanin [4] .....	14
Obrázek 3 Nanášení stříkáním [19].....	15
Obrázek 4 Ukázka lisování kompozitu [19].....	16
Obrázek 5 Ukázka navíjení formou šroubovice [8] .....	17
Obrázek 6 Porovnání jednotlivých typů delaminace [31].....	18
Obrázek 7 Ukázka rotačního piezoelektrického dynamometru Kistler [26] .....	22
Obrázek 8 Ukázka dvojité kompresní šroubovice [25].....	26
Obrázek 9 Ukázka materiálu C/PPS [20].....	28
Obrázek 10 Chemický vzorec Polyfenylensulfidu [27] .....	28
Obrázek 11 Ukázka materiálu G/PA12.....	29
Obrázek 12 Chemický vzorec Polyamidu 12 [30] .....	29
Obrázek 13 Ukázka obráběcího centra MCFN 5050 LN [27] .....	30
Obrázek 14 Ukázka hlavy rotačního dynamometru Kistler [28] .....	31
Obrázek 15 Ukázka nástroje T81 .....	32
Obrázek 16 Seřizovací přístroj BMD 310v HSC .....	33
Obrázek 17 Ukázka upnutého přípravku s deskami připravenými na frézování.....	33
Obrázek 18 Ukázka hladin "z" z tabulky 6 .....	35
Obrázek 19 Ukázka řezu vodním paprskem .....	36
Obrázek 20 Ukázka výroby destiček na frézce .....	37
Obrázek 21 Ukázka pracovního prostoru stroje.....	37
Obrázek 22 Ukázka pracovního prostoru při záznamu dat zesilovač a DAQ .....	38
Obrázek 23 Ukázka výpočtu reálné plochy delaminace .....	39
Obrázek 24 Ukázka sestavy pro záznam otřepů.....	39
Obrázek 25 Ukázka dat zaznamenaných programem Dynoware.....	41
Obrázek 26 Ukázka vyhodnocení otřepů v programu Adobe Photoshop42	
Obrázek 27 Znázornění úhlu $\phi$ a úhlu $\omega$ [32].....	43

## 10 Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry obráběcího centra MCFV 5050 LN .....	30
Tabulka 2 Parametry rotačního dynamometru Kistler [28] .....	31
Tabulka 3 Řezné úhly použitých nástrojů .....	32
Tabulka 4 Parametry seřizovacího stroje BMD 300v HSC .....	32
Tabulka 6 Návrh experimentu na stanovení silových účinků a velikosti delaminace.....	34
Tabulka 7 Návrh experimentu na zjištění závislosti $K_c$ na $h_m$ .....	35
Tabulka 8 Tabulka koeficientů měrné řezné síly pro materiál G/PA12..	56
Tabulka 9 Tabulka koeficientů měrné řezné síly pro materiál C/PPS ....	57



# 11 Seznam grafů

Graf 1 Závislost řezné síly na posuvu na zub pro materiál C/PPS a tloušťku destičky 1 mm .....	44
Graf 2 Závislost řezné síly na posuvu na zub pro materiál G/PA12 a tloušťku destičky 1 mm.....	45
Graf 3 Graf závislosti síly ve směru osy „z“ $F_z$ na hladině nástroje z pro materiál C/PPS .....	46
Graf 4 Graf závislosti síly ve směru osy „z“ $F_z$ na hladině nástroje z pro materiál G/PA12.....	46
Graf 5 Porovnání řezných sil $F_c$ pro různé hladiny nástroje pro materiál C/PPS .....	47
Graf 6 Porovnání řezných sil $F_c$ pro různé hladiny nástroje pro materiál G/PA12.....	48
Graf 7 Porovnání řezných sil $F_{cN}$ pro různé hladiny nástroje pro materiál C/PPS .....	48
Graf 8 Porovnání řezných sil $F_{cN}$ pro různé hladiny nástroje pro materiál G/PA12.....	49
Graf 9 Porovnání vlivu řezné síly $F_c$ na vznik delaminace pro jednotlivé nástroje u materiálu C/PPS.....	50
Graf 10 Porovnání vlivu řezné síly $F_c$ na vznik delaminace pro jednotlivé nástroje u materiálu G/PA12 .....	50
Graf 11 Porovnání horní a dolní hrany destičky při obrábění různými hladinami "z" pro nástroj T80 a materiál C/PPS.....	51
Graf 12 Porovnání horní a dolní hrany destičky při obrábění různými hladinami "z" pro nástroj T80 a materiál G/PA12 .....	52
Graf 13 Závislost řezné síly $F_c$ na posuvu na zub $f_z$ pro materiál C/PPS	54
Graf 14 Závislost řezné síly $F_c$ na posuvu na zub $f_z$ pro materiál G/PA12 .....	54
Graf 15 Závislost měrné řezné síly na průměrné tloušťce třísky pro materiál G/PA12.....	55
Graf 16 Závislost měrné řezné síly na průměrné tloušťce třísky pro materiál C/PPS .....	56