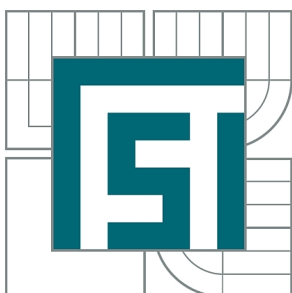


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## PREDIKCE SIL A KVALITY OPRACOVÁNÍ PŘI FRÉZOVÁNÍ S VYSOKÝMI POSUVY

PREDICTION OF CUTTING FORCES AND QUALITY OF SURFACE WHEN MILLING WITH HIGH FEEDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVEL MIKEL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Pavel Mikel

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Predikce sil a kvality opracování při frézování s vysokými posuvy**

v anglickém jazyce:

### **Prediction of cutting forces and quality of surface when milling with high feeds**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Predikce sil a kvality opracování při frézování s vysokými posuvy pro vybrané materiály.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Teoretický rozbor problému.

Návrh experimentálních zkoušek.

Realizace experimentů, jejich statistické vyhodnocení.

Diskuze.

Závěry.

Seznam odborné literatury:

- TLUSTY, J. Manufacturing Process and Equipment. 1st edition. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.
- HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- DeGarmo, P.E., Black, J.T., Kohser, R.A. Materials and Processes in Manufacturing. John Wiley and Sons. 2012. 11th edition. 1184 s. ISBN-13 978-0-470-92467-9.
- Kramar, D., Kopac, J. High Performance Manufacturing Aspect of Hard-to Machine Materials. Advances in Production Engineering & Management. s. 1-14. 2009. SSN 1854-6250.
- SHAW, M.C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005, pp. 651, ISBN 0-19-514206-3
- PÍŠKA, M, a kol. Speciální technologie obrábění. Učební text pro FSI, ISBN 978-80-214-4025-8, CERM, Brno, 2009, s. 248
- High Feed Milling. Dostupné na:  
[http://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Milling/Highfeedmilling/gb\\_hfm\\_brochure\\_lr.pdf](http://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Milling/Highfeedmilling/gb_hfm_brochure_lr.pdf)  
[cit. 11.11.2012]

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19.11.2012

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

V teoretické studii je popsána analýza silového zatížení a kvalita opracování povrchu při frézování. V experimentu je kladen důraz na stanovení sil a jakosti povrchu při frézování v závislosti na změně posuvové rychlosti. Konkrétně stanovení měrné řezné síly  $k_c$  a řezné síly  $F_c$  u materiálů z hliníkové slitiny AlSi9Cu3, titanové slitiny Ti6Al4V a oceli C45, použitým nástrojem byla fréza pro vysoké posuvy. V experimentální části je dále obsaženo statistické vyhodnocení naměřených dat, ze kterého lze vidět určitý předpoklad změny silového zatížení a drsnosti povrchu při změně rychlosti posuvu.

### Klíčová slova

čelní frézování, vysoký posuv, silová analýza, měrná řezná síla, řezná síla, drsnost povrchu

## ABSTRACT

Theoretical study describes force analysis and quality of surface when milling. In the experiment the emphasis is on determining forces and surface quality in milling in response to changes in feed rate. Especially determination of specific cutting force  $k_c$  and cutting force  $F_c$  at materials from aluminium alloy AlSi9Cu3, titanium alloy Ti6Al4V and steel C45, the used tool was a milling cutter for high feeds. In the experimental section is furthermore contained statistical evaluation data which demonstrate a certain prediction changes of cutting load and surface roughness when changing feeds.

### Key words

face milling, high feed, force analysis, specific cutting force, cutting force, roughness

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MIKEL, Pavel. *Predikce sil a kvality opracování při frézování s vysokými posuvy*. Brno 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 59 s. příloh 5. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, Csc.

### **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Predikce sil a kvality opracování při frézování s vysokými posuvy** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Bc. Pavel Mikel

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Ing. Miroslavu Piškovi, Csc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

**OBSAH**

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| ABSTRAKT .....                                               | 4  |
| PROHLÁŠENÍ.....                                              | 5  |
| PODĚKOVÁNÍ .....                                             | 6  |
| OBSAH.....                                                   | 7  |
| ÚVOD.....                                                    | 9  |
| 1 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU .....                           | 10 |
| 1.1 Úvod do frézování.....                                   | 10 |
| 1.2 Technologie HFM .....                                    | 11 |
| 1.3 Nástroje pro HFM .....                                   | 12 |
| 1.4 Použití HFM.....                                         | 14 |
| 1.5 Mechanismus tvorby třísky .....                          | 14 |
| 1.6 Tvary třísek .....                                       | 15 |
| 1.7 Ovlivnění kvality opracování při frézování .....         | 18 |
| 1.7.1 Měření drsnosti povrchu .....                          | 20 |
| 1.8 Analýza průřezu třísky a silového zatížení .....         | 21 |
| 1.9 Silové vztahy procesu řezání.....                        | 22 |
| 1.10 Měrný řezný odpor (měrná řezná síla) .....              | 24 |
| 1.11 Rozdělení sil při čelním frézování.....                 | 25 |
| 1.12 Měření silového zatížení při frézování .....            | 27 |
| 1.12.1 Piezoelektrické snímače sil .....                     | 28 |
| 2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK .....                       | 29 |
| 2.1 Zkušební materiály.....                                  | 29 |
| 2.1.1 Hliníková slitina AlSi9Cu3.....                        | 29 |
| 2.1.2 Ocel C45 .....                                         | 30 |
| 2.1.3 Titanová slitina Ti6Al4V .....                         | 30 |
| 2.2 Obráběcí stroj.....                                      | 31 |
| 2.3 Řezný nástroj.....                                       | 32 |
| 2.4 Řezné podmínky.....                                      | 32 |
| 2.5 Aparatura pro měření sil.....                            | 33 |
| 2.6 Zařízení pro měření kvality povrchu.....                 | 35 |
| 2.7 Teoretický výpočet sil .....                             | 36 |
| 2.8 Teoreticky vypočtená drsnost povrchu .....               | 37 |
| 3 REALIZACE EXPERIMENTŮ, JEJICH STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ..... | 38 |
| 3.1 Hodnocení časových průběhů silového zatížení .....       | 38 |

|       |                                                |    |
|-------|------------------------------------------------|----|
| 3.1.1 | Statistické hodnocení složek řezných sil ..... | 41 |
| 3.2   | Výpočet maximálního průřezu třísky .....       | 43 |
| 3.3   | Určení měrné řezné síly (odporu) .....         | 45 |
| 3.3.1 | Statistické hodnocení měrné řezné síly.....    | 47 |
| 3.4   | Výpočet střední tloušťky třísky.....           | 49 |
| 3.4.1 | Statistické zhodnocení .....                   | 50 |
| 3.5   | Kvalita opracování .....                       | 52 |
| 3.6   | Srovnání hodnot .....                          | 53 |
|       | DISKUZE .....                                  | 57 |
|       | ZÁVĚR .....                                    | 59 |
|       | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....                  | 60 |
|       | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....       | 62 |
|       | SEZNAM PŘÍLOH.....                             | 64 |



## ÚVOD

V současné době je kladen neustálý tlak na snižování výrobních nákladů a výrobních cen. To obnáší samozřejmě vyšší požadavky na řezný proces a tím vede cesta k nejnovějším trendům třískového obrábění.

Frézování s vysokými posuvy (metoda HFM) je progresivní obráběcí metoda, která si získává pozornost pro svou všestrannost ve výrobním procesu a hlavně pro svou vysokou produktivitu, při které však neklesají požadavky na kvalitu opracování.

Nasazení této progresivní metody do výroby je velice rozmanité pro svou tuhost a délku vyložení je možné použít pro vrtání válců, hrubování kapes a dutin forem a také na výrobu součástí, které jsou používány v leteckém průmyslu a jsou vyrobené z kalených ocelí a teplotně odolných slitin.

Tato práce je zaměřena na analýzu silového zatížení a jakosti povrchu při frézování vybraných vzorků z různých materiálů. Dále je uvedena statistická analýza, která má za úkol předpovědět trend růstu silového zatížení a kvality povrchu při změně posuvové rychlosti.



Obr. 1. HFM frézování [3].

# 1 TEORETICKÝ ROZBOR PROBLÉMU

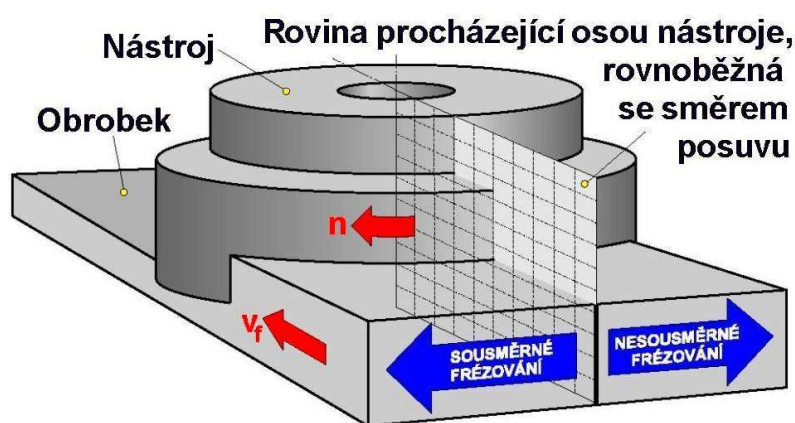
## 1.1 Úvod do frézování

Frézování je jednou ze základních metod úběru materiálu třískovým obráběním. Tato obráběcí metoda je založena na principu, při kterém se materiál obrobku odebírá břity otáčejícího se nástroje. Posuv nejčastěji koná součást, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou posuvové pohyby plynule měnitelné (např. obráběcí centra). Řezný proces je přerušovaný, každý zub odřezává krátké třísky proměnné tloušťky [1].

Z technologického hlediska je podle frézovacího nástroje rozděleno na [1]:

- válcové (frézování obvodem),
- **čelní** (frézování čelem),
- okružní,
- planetové.

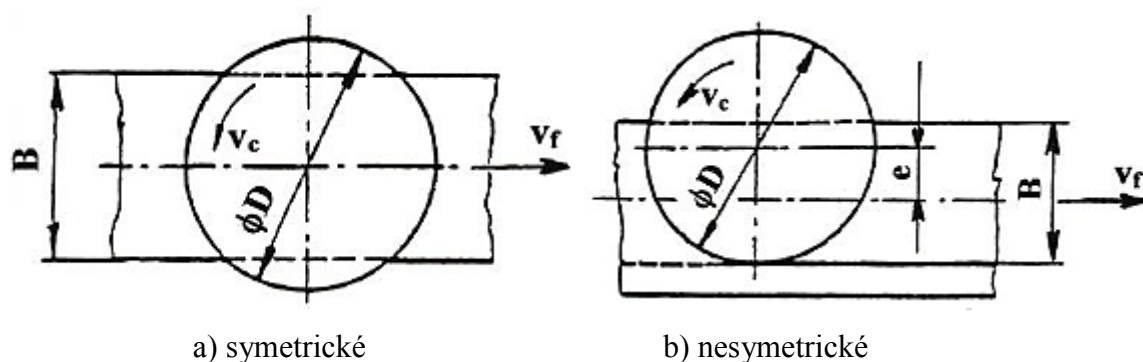
**Čelní frézování** je jednou z nejrozšířenějších metod pro obrábění rovinných ploch. Při čelním frézování je materiál odebírán břity na obvodě i na čele nástroje – obr. 1.1. Nástroj pracuje v přerušovaném řezu. Při vniknutí břitu do materiálu obrobku je vystaven intenzivním rázům. Břit je vystaven také teplotním rázům [1].



Obr. 1.1 Schéma čelního frézování [4].

Čelní fréza pracuje při frézování sousledně i nesousledně. Podle polohy osy frézy vzhledem k frézované ploše je frézování rozlišeno na [4]:

- symetrické,
- nesymetrické.



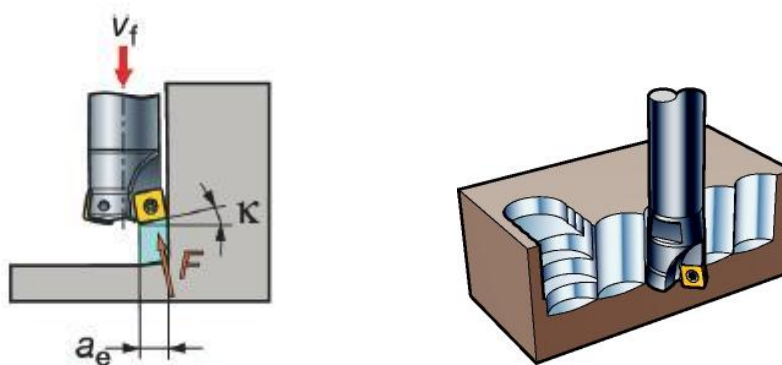
Obr. 1.2 Čelní frézování [4].

## 1.2 Technologie HFM

Frézování s vysokými posuvy HFM (High Feed Milling) je poměrně nová produktivní metoda dosahující 3x rychlejšího obrábění než je možno u klasického obrábění. Jejimi charakteristickými rysy jsou malý úběr materiálu (do cca  $a_p = 2$  mm), vysoký posuv na zub (2,5–3,5 mm) a šetrnost nástroje [2].

Výhodou břitových destiček HFM metody je malý úhel nastavení hlavního ostří. Proto působí minimální radiální a maximální axiální řezné síly. Výsledkem zmenšení radiální složky silového zatížení je snížení rizika vibrací a tím zvýšení stability obrábění. Důsledkem tohoto snížení radiální síly je umožněna konstrukce fréz s velkým vyložení, až  $7 \times D$ . Tyto nástroje jsou vhodné pro frézování s axiálním přísuvem, tzv. axiální frézování – plunging. Použití fréz je především pro výrobu forem [2, 3].

Při axiálním frézování (obr. 1.3) probíhá řez na čele nástroje místo na obvodu. Tento fakt udává změnu charakteru řezných sil z převážně radiálních a na axiální a tím i menší riziko vzniku vibrací. Tento způsob frézování lze přirovnat k vyvrtávací operaci s přerušovaným řezem. Nároky na stroj i hlučnost procesu jsou nízké [5].



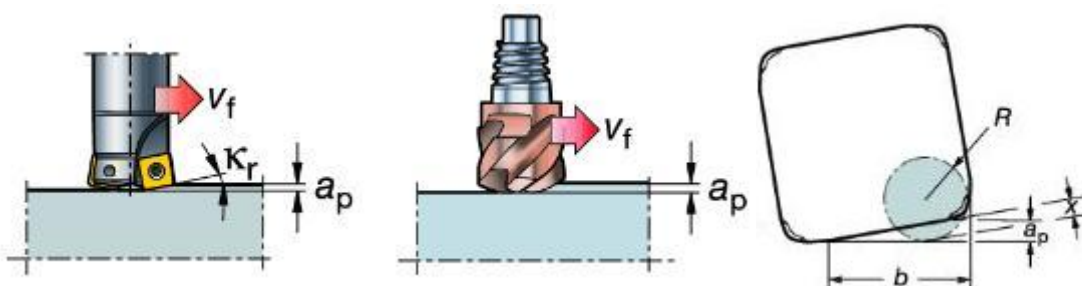
Obr. 1.3 Axiální frézování [5].

Obecně je pro tento druh frézování doporučeno [5]:

- použití stroje s horizontální orientací vřetena,
- použití řezné kapaliny k lepšímu odvedení třísek,
- kvůli zamezení vibracím používat menší hloubku řezu.

### 1.3 Nástroje pro HFM

Břítové destičky jsou rozměrově a tvarově robustné s velkým poloměr špičky a malým úhlem nastavení hlavního ostří (obr. 1.4). To znamená, že mohou pracovat při vysokých rychlostech bez nebezpečí přetížení břítové destičky a tedy splňovat podmínky bezpečného obrábění. A také současně splňovat zlepšenou stabilitu a spolehlivost procesu řezání. Avšak při maximální řezné hloubce  $a_p$  je 2 mm.

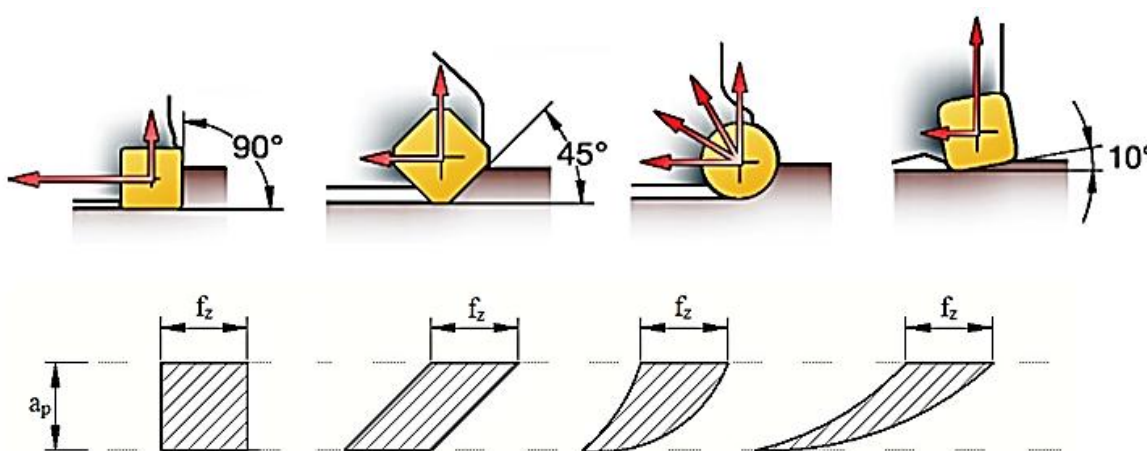


Obr. 1.4 Schéma geometrie fréz pro vysoké posuvy [5].

Životnost nástroje je prodloužena, protože na břitové destičky je nanesen chromniklový povlak. Nástroje pro HFM pokrývají celou řadu aplikací, díky tomu lze tvrdit, že nástroje jsou flexibilní [3].

Čelní frézování s velkým posuvem na zub je možné použít pouze v případě použití frézy s malým úhlem nastavení ostří nebo frézy s kruhovými destičkami k efektu ztenčení třísky.

Na obrázku 1.5 je znázorněna změna průřezu třísky a silového zatížení nástroje v závislosti na úhlu hlavního nastavení ostří.



$$A_{D1} = A_{D2} = A_{D3} = A_{D4}$$

Obr. 1.5 Schéma geometrie fréz pro vysoké posuvy [5].

Malý úhel nastavení ostří je všeobecně nutnou podmínkou k použití frézování s vysokými posuvy, jelikož snižuje maximální tloušťku třísky [5].

Při příznivých podmínkách obrábění lze u některých fréz použít posuv na zub  $f_z$  až 4 mm, při kterém lze dosáhnout vysoké rychlosti úběru materiálu  $Q$  až  $1400 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  [5].

Výhodou frézování s vysokými posuvy je zkrácení časů a tím i nákladů [3]:

- zkrácení obráběcího času na výrobu jednoho kusu,
- snížení času na údržbu stroje – vlivem radiálních sil, které jsou nízké, dochází ke snížení opotřebení vřetena. Axiální síly tudíž absorbuje nástroj,
- vzhledem k nízké hloubce řezu a poměrně dobré kvalitě povrchu po obrobení odpadá předdokončovací operace.

## 1.4 Použití HFM

### Čelní frézování

Čelní frézování s HFM metodou je výborný způsob pro vytvoření dobrého základu pro další obráběcí operace nebo dokončování. Aplikace je použitelná pro měkké materiály jako jsou hliník nebo ocel. Metoda je zřídka používána i na tvrdé slitiny a těžkoobrobitelné materiály.

Metoda HFM je také vhodná pro kopírovací, spirálovité frézování a také na frézování drážek. Velmi efektivně lze metodu HFM využít při aplikacích, kde má nástroj velké vyložení, např. axiální frézování (viz výše), které je vhodné pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů jako je titan. Při tomto způsobu lze při snížení posuvu zvýšit hloubku řezu [3].

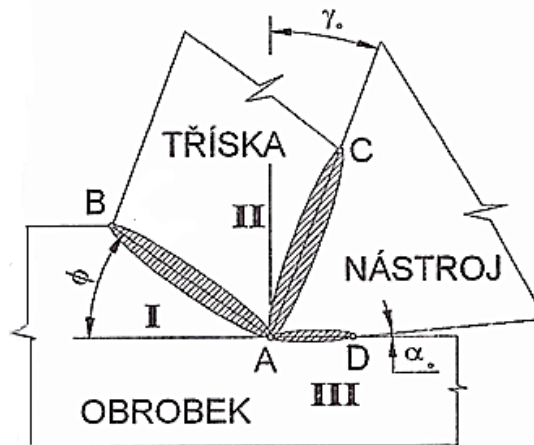
## 1.5 Mechanismus tvorby třísky

Obrábění zahrnuje především proces intenzivní plastické deformace podél roviny maximálních smykových napětí. Vzhledem k vysoké rychlosti deformace při tvorbě třísky prochází obráběný materiál velice rychle třemi mezními stavy. Jsou to stavy [6, 7]:

- plastické napjatosti,
- elastické napjatosti,
- stavem při němž dochází k oddělení částic materiálu formou lomového porušení – lomem.

Lze tvrdit, že oddělení třísky dochází v jediném časovém okamžiku [6].

Oblast materiálu, kde vlivem řezného nástroje dochází k přetvoření na třísku je nazývána kořen třísky. Z kořenu třísky (obr. 1.6) se lze dostat k experimentálnímu studiu ortogonálního volného řezání, který ukazuje místa plastických deformací a úhel střižné roviny [6].



Obr. 1.6 Oblasti plastických deformací [6].

I – primární plastická deformace – v rovině maximálních smykových napětí  $\overline{AB}$

II – sekundární plastická deformace – zahrnuje tření třísky po čele nástroje  $\overline{AC}$

III – terciální plastická deformace – zahrnuje tření mezi nástrojem a povrchem obrobku  $\overline{AD}$

V oblasti plastických deformací je také možné rozeznat základní úhly:

$\alpha_0$  – úhel hřbetu

$\gamma_0$  – úhel čela

$\Phi$  – úhel střižné roviny

Platí, že čím vyšší je úhel střižné roviny  $\Phi$ , tím je štihlejší tříška. Proces je pak energeticky výhodnější a dochází k nižšímu zatížení a menšímu ovlivnění podpovrchových a povrchových vrstev obrobku [6].

## 1.6 Tvary třísek

Materiál je při obrábění odebírán ve formě třísek, které mohou být různého tvaru. Při nevhodném tvaru třísky může dojít ke snížení obrobitelnosti. Proto je důležité ovlivňovat utváření třísky a její odvod z obráběcího procesu. Správné utváření třísek je tedy důležité pro zajištění vysoké obrobitelnosti a efektivity výroby.

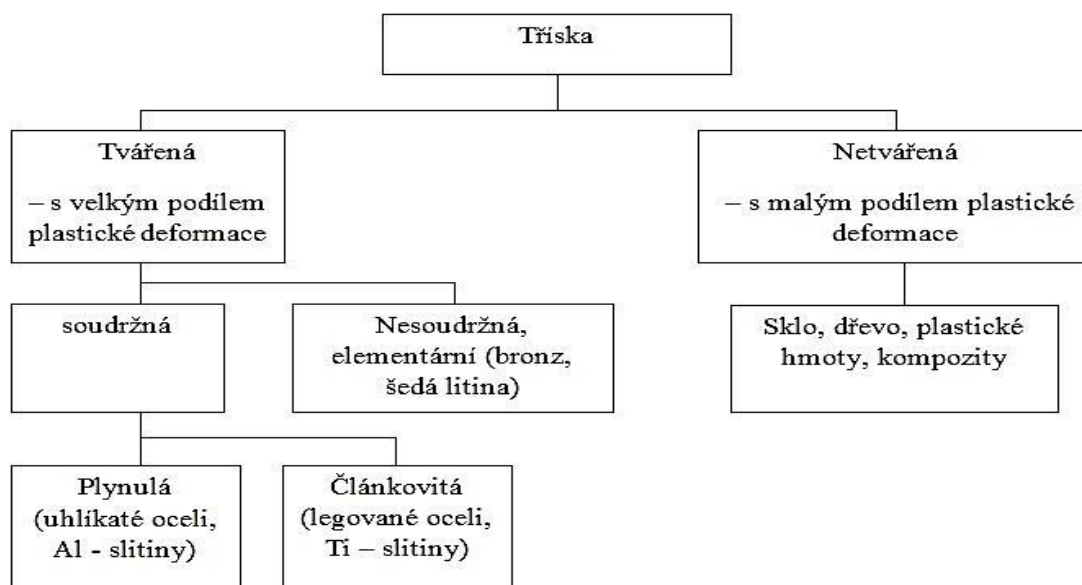
Faktory ovlivňující tvar třísky [8, 25]:

- nástroj – úhel čela, úhel řezné hrany, rádius špičky, geometrie nástroje,
- řezné podmínky – posuv, řezná rychlost, hloubka řezu, tloušťka řezu,
- materiál – tvrdost, houževnatost, pevnost v tahu, materiálové složení
- způsob chlazení – obrábění za sucha, chlazení emulzí.

Tvar třísky je důležitý ukazatel obrábění, protože přímo nebo nepřímo ukazuje [9, 10]:

- vlastnosti a chování materiálu při práci s určitými podmínkami obrábění,
- množství spotřebované energie k odstranění jednotkového objemu materiálu,
- povaha a míra interakce sestavy tříška – nástroj.

Terminologie označování druhů třísek není jednotná. Rozdělení je uvedeno na obr. 1.7.



Obr. 1.7 Základní rozdělení druhů třísek [6].

V závislosti na řezném procesu a jeho průběhu mohou mít třísky různý tvar, například: stužková – smotaná, dlouhá; vinutá – dlouhá, krátká; spirálové ploché; obloukovité spojené; elementární ...

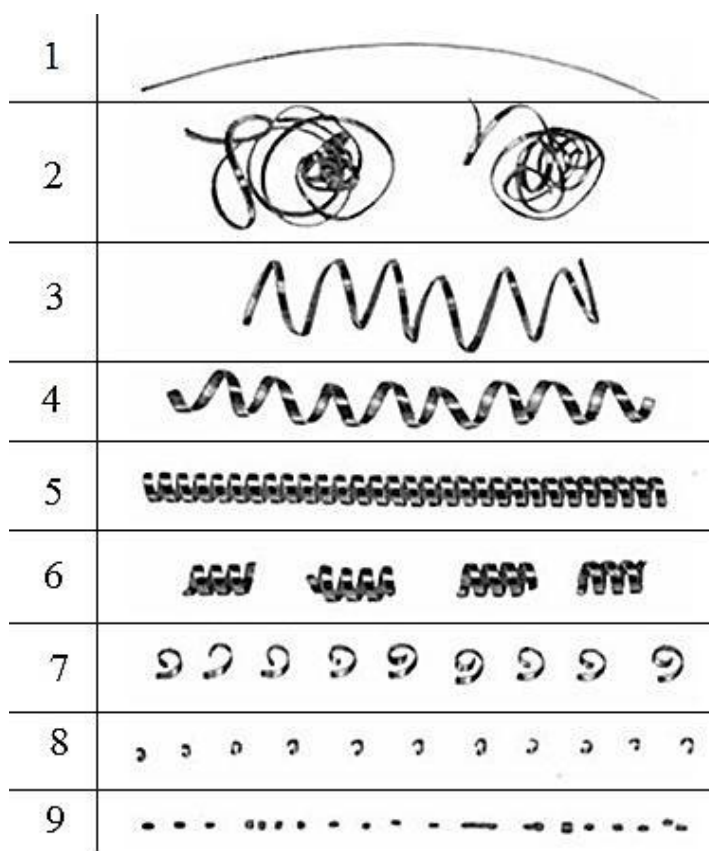


Existuje velká variabilita tvarů třísek a některé z nich jsou uvedeny na obr. 1.8, kde pod čísla 1 – 5 jsou tvary třísek nevyhovující, 6 – 9 jsou tvary vyhovující, 9 – třísky přetvářené.

Úhel nastavení hlavního ostří ovlivňuje utváření třísky tím, že se tloušťka třísky se zmenšováním úhlu snižuje a šířka třísky narůstá. Utváření třísky je snazší a hladší, když je uhel nastavení hlavního ostří menší. Tvar a směr odchodu třísek se mění rovněž se změnou poloměru špičky [11].

Existují různé druhy lomu třísek [11]:

- samočinný lom – využití strukturních fází zaručující drobnou třísku,
- lom třísky na nástroji – lámání o hřbetní plochu pomocí utvařeče třísek,
- lom třísky při nárazu na obrobek – používá se jen pro hrubování,
- přerušováním posuvu nástroje – vznikne časová prodleva pro zlomení třísky.



Obr. 1.8 Dělení třísek dle firmy SECO [6, 12].

### 1.7 Ovlivnění kvality opracování při frézování

Každý druh řezného nástroje zanechává na obráběném povrchu více nebo méně výrazné stopy. Vzhled obrobené plochy je určován použitým procesem obrábění a směrem, ve kterém nástroj řezal. V dnešní době lze frézováním vytvářet povrchy dokonalé jakosti, čehož bylo v dřívějších dobách možné dosáhnout pouze broušením [12, 13].

Teoreticky dosažitelnou jakost obrobeného povrchu lze pro procesy frézování vypočítat. Výsledek výpočtu je výchozím bodem pro určení, jaké jakosti povrchu může být za ideálních podmínek dosaženo. Skutečný výsledek je ovlivňován velkým počtem faktorů, které se v procesu obrábění vyskytují. Mimoto působí na jakost obrobeného povrchu statická a dynamická tuhost celého systému [12, 13].

Ovlivňující faktory vztahující se k řeznému nástroji [12]:

- stabilita,
- vyložení,
- geometrie břitu,
- materiál obrobku,
- opotřebení břitu nástroje,
- řezné podmínky,
- utváření třísky,
- teplota břitu při obrábění.

V praxi existuje celá škála parametrů určující drsnost povrchu. Nejpoužívanější parametry jsou  $R_a$  a  $R_z$  [6, 7].

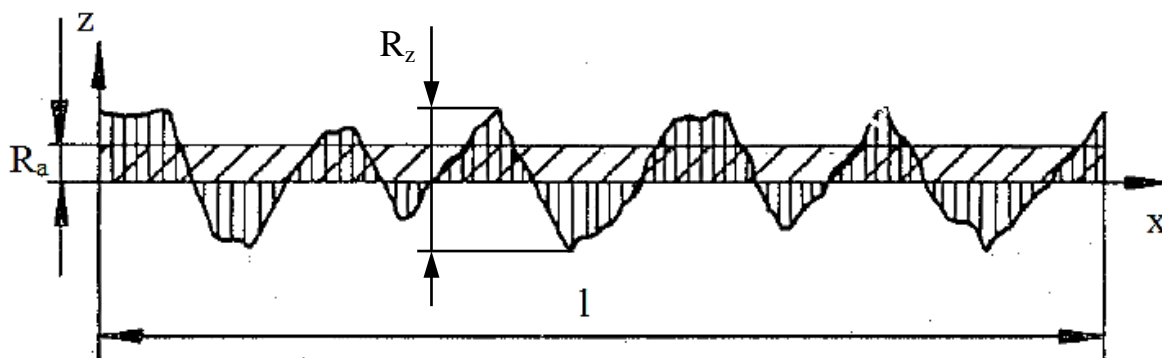
$R_a$  – střední aritmetická úchylka povrchu – aritmetický průměr absolutních hodnot  $x$  v rozsahu délky  $l$

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |x| \cdot dx [\mu m] \quad (1. 1)$$

$R_z$  – největší výška profilu – součet největší výšky profilu  $x_p$  a největší hloubky profilu  $x_v$  v rozsahu základní délky  $l$

$$R_z = x_{pmax} + x_{vmax} [\mu m] \quad (1. 2)$$

Na obr. 1. 9 jsou k vidění základní parametry drsnosti.



Obr. 1. 9 Parametry drsnosti povrchu [27].

### Geometrické vztahy drsnosti k povrchu obrábění

Vztah pro výpočet teoretické hodnoty největší výšky profilu  $R_{zt}$  odvodil Martellotti (1941) a je tedy definován [7]:

$$R_{zt} = \frac{f_z^2}{\left(8 \pm \frac{f_z \cdot n_z}{\pi}\right)} \quad (1. 3)$$

- kde:  $R_{zt}$  - největší teoretická výška profilu,  
 $f_z$  - posuv na zub frézy,  
 $n_z$  - počet zubů v záběru.

Teoretická hodnota střední úchyly rozměru je pro frézování definována[14]:

$$R_{at} = \frac{r_\varepsilon - \sqrt{r_\varepsilon^2 - \left(\frac{f_z}{2}\right)^2}}{2} \quad (1. 4)$$

- kde:  $R_{at}$  - teoretická hodnota střední aritmetické úchyly,  
 $f_z$  - posuv na zub frézy,

$r_\varepsilon$  - poloměr zaoblení špičky nástroje.

Závislost mezi  $R_{zt}$  a  $R_{at}$  lze vyjádřit vztahem [6]:

$$R_{at} = \frac{R_{zt}}{3 - 5} \quad (1. 5)$$

kde:  $3 \div 5$  - interval zohledňující technologickou metodu.

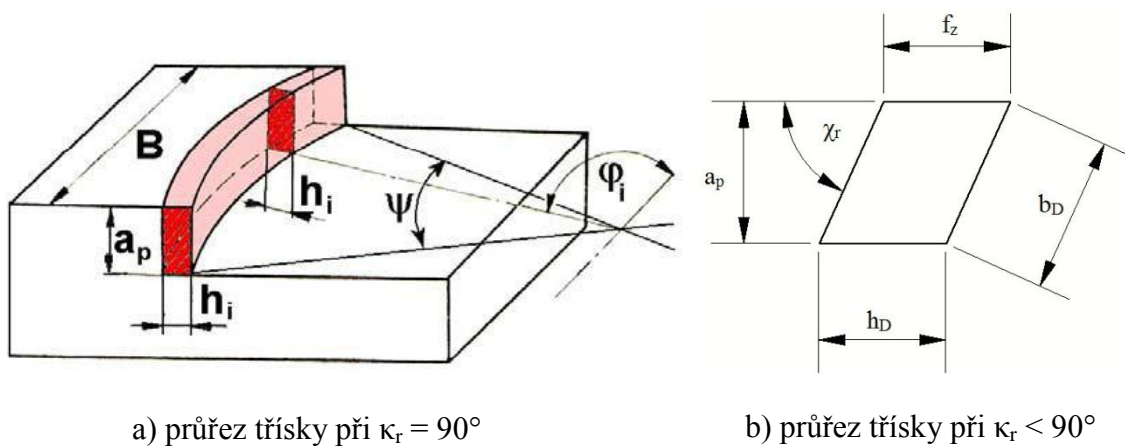
### 1.7.1 Měření drsnosti povrchu

Dotykové metody, které jsou pro hodnocení povrchu nerozšířenější. Její výhodou je možnost převádět analogový záznam do digitální formy, a také proto, že naměřené hodnoty slouží jako vztažné a srovnávací hodnoty pro jiné metody měření. Výhodou této metody je její reprodukovatelnost a schopnost zobrazit měřený geometrický profil. Určitá nejistota spočívá v účinku tlaku hrotu snímače na měřené místo, což může vést k deformaci ve snímané vrstvě [6].

Optické metody, které představují bezdotyková měření s vyloučením možnosti poškození měřeného povrchu. Dotykový hrot je nahrazen světelným paprskem, který se odráží nebo rozptyluje na měřeném povrchu. Interakce mezi světelným paprskem a povrchem závisí na vlnové délce světla, drsnosti povrchu a vlastnostech měřeného tělesa. Hloubka vnikání světelného paprsku závisí na součiniteli absorpce materiálu a ovlivňuje výsledek měření [6].

### 1.8 Analýza průřezu třísky a silového zatížení

Při úvaze o průřezu třísky je třeba vzít na vědomí, že není konstantní průřez třísky a silové zatížení, protože tloušťka třísky se mění. Další okolnosti, které musí být brány v úvahu se týkají záběru břitů nástroje. V záběru se může najednou vyskytovat i několik břitů nástroje. Tříška bude dělená, protože dochází k periodickému přerušování záběru břitů [6].

a) průřez třísky při  $\kappa_r = 90^\circ$ b) průřez třísky při  $\kappa_r < 90^\circ$ 

Obr. 1.10 Průřez tloušťky třísky při záběru břitu [4].

Tloušťka třísky je funkcí okamžitého pootočení frézy  $\varphi$  [6]:

$$h_D = f_z \cdot \sin \chi_r \cdot \sin \varphi \quad (1.6)$$

Jmenovitá šířka třísky  $b_{Di}$  pro úhel  $\chi_r$  [6]:

$$b_{Di} = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (1.7)$$

Jmenovitý průřez třísky pro  $i$ -tý zub [6]:

$$A_{Di} = h_{Di} \cdot b_{Di} = f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi_i \quad (1.8)$$

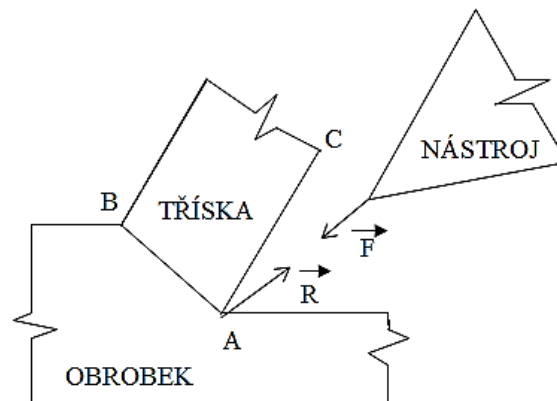
Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky je při  $\varphi = 90^\circ$ , takže [1]:

$$A_{Dmax} = f_z \cdot a_p \quad (1.9)$$

### 1.9 Silové vztahy procesu řezání

V teorii obrábění je dohodnuta konvence pro označování sil. Tyto síly jsou dvě, a to síla mezi čelem nástroje a třískou (síla pro obrábění  $F$ ) a síla mezi obrobkem a podél střižné roviny (síla s vnitřním řezným odporem materiálu  $R$ ), viz obr. 1.11. Síly působí opačně, avšak z důvodu rovnováhy sil musí být stejně velké, dle vztahu

$$F = -R \quad (1. 10)$$



Obr. 1.11 Působení sil [6].

Síly  $F$  a  $R$  se dále dělí do složek:

1. Horizontální (řeznou)  $F_c$  a vertikální (posuvovou)  $F_f$ ,
2. Tečnou  $F_{sh}$  a normálovou  $F_{shN}$ , působící ve střižné rovině,
3. Tečnou  $F_\gamma$  a normálovou  $F_{\gamma N}$ , působící na čele nástroje.

Jestliže se vynesou všechny složky v místě ostří nástroje, získá se diagram řezných sil, který jako první navrhl Merchant (1945). V grafu lze využít tečkovanou referenční kružnici (Thaletova kružnice) pro rozložení výslednice sil do různých směrů – obr. 1.12. K určení sil se používají složky  $F_c$  a  $F_f$ , které lze zjistit experimentálně z měření dynamometry [6,7].



### 1.10 Měrný řezný odpor (měrná řezná síla)

Stejně jako mechanika těles a nauka materiálu definuje pevnost materiálu v tahu nebo tlaku, tak obdobně i teorie obrábění definuje velikost měrné síly, potřebné k překonání soudržnosti materiálu účinkem řezného procesu. V základním tvaru je tato veličina definována rovnicí [6, 8, 15]

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (1. 16)$$

a lze ji definovat jako sílu ve směru hlavního řezného pohybu vztaženou na průřez třísky  $1 \text{ mm}^2$  – tzn. jednotkou je MPa (označení měrný odpor a měrná řezná síla korelují s principem akce a reakce – viz výše uvedená kapitola). Na rozdíl od jiných technických disciplín velikost řezného odporu určují [6, 7]:

- fyzikální vlastnosti materiálu obrobku (zejména tvrdost nebo pevnost),
- velikost průřezu třísky – zejména tloušťka třísky,
- geometrie nástroje, případně další deformační podmínky,
- řezné prostředí, apod.

Velikost měrné řezné síly ovlivňuje dále i charakter technologického procesu. V podmínkách ztíženého odchodu třísky z místa řezu, např. při vrtání dochází ke zvětšování měrné řezné síly vlivem síly potřebné na odchod třísky. Měrná řezná síla se pak zvětšuje a může být větší i o 100, eventuálně i více % vůči síle, kde není odchod třísky ztížen [23].

Hodnota exponentu  $m_c$  závisí na fyzikálních vlastnostech materiálu obrobku a řezných podmínkách, zejména na tloušťce třísky  $h_D$  (dále zjednodušeně  $h = h_D$ ) – podle vztahu [6]:

$$h = f_z \cdot \sin \kappa_r \quad (1. 17)$$

to znamená [6]:

$$k_c = \frac{k_{c1}}{h^{m_c}} = \frac{k_{c1}}{(f \cdot \sin \kappa_r)^{m_c}} \quad (1. 18)$$



Zmenšuje-li se tloušťka třísky, zvětšuje se poměrná hodnota deformační práce, protože se zvětšuje stupeň zpevnění materiálu i podíl pasivních prací na tvorbu třísky. Poměrně velmi malý vliv na měrnou řeznou sílu má šířka třísky  $b_D$ . U frézování při použití fréz s okrouhlými břity je nutno zvážit pro výpočet tloušťky třísky i úhel pootočení frézy a celé řešení je zpravidla numerické [6, 15].

Řezná rychlost ovlivňuje velikost měrné řezné síly tím, že [6, 15]:

- ovlivňuje velikost oblasti a intenzity primární deformace,
- má značný vliv na teplotu deformovaného materiálu,
- určuje rychlost zatěžování materiálu obrobku,
- ovlivňuje velikost součinitele tření na čele i na hřbetě a vznik a velikost nárůstku.

Hodnoty měrné řezné síly pro jednotlivé způsoby obrábění a určité řezné podmínky se určují experimentálně. Při stejných řezných podmínkách je vzájemný poměr měrné řezné síly u dvou druhů ocelí, popř. slitin lehkých kovů, dán přibližně vztahem [6]:

$$\frac{k_{c1}}{k_{c2}} = \left(\frac{R_{m1}}{R_{m2}}\right)^n \quad (1. 19)$$

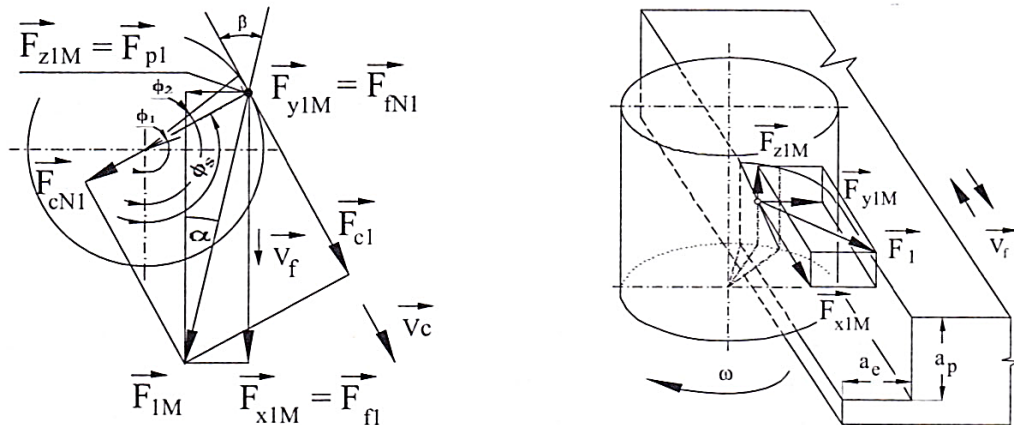
u litiny a křehkých materiálů [6]:

$$\frac{k_{c1}}{k_{c2}} = \left(\frac{HB_1}{HB_2}\right)^r \quad (1. 21)$$

Hodnota exponentu  $n$  bývá v rozmezí 0,4 až 0,7; hodnota exponentu  $r$  v mezích 0,3 až 0,7 [6].

### 1.11 Rozdělení sil při čelním frézování

Při specifikaci řezných sil při frézování se vyjde ze silových poměrů na jednom břitu, který se nachází v určité poloze, která je určena úhlem  $\varphi_i$  [1].



Obr. 1. 13 Silový rozklad při čelním frézování [16].

Síla, která působí na  $i$ -tý zub frézy [6]

$$F_{ci} = A_{Di} \cdot k_{ci} \quad (1. 20)$$

celková řezná síla je pak daná vztahem [6]

$$F_{ci} = \sum_{i=1}^{z_z} A_{Di} \cdot k_{ci} \quad (1. 21)$$

Po dosazení do rovnice vztahy (1. 21) a (1. 30) je tedy řezná síla dána [1]

$$F_{ci} = k_{c1.1} \cdot f_z^{1-mc} \cdot \sin\varphi^{1-mc} \cdot \sin\kappa_r^{-mc} \cdot a_p \quad (1. 22)$$

Z obr. 1. 12 je zřejmé, že výslednice silového zatížení lze definovat vztahem [6]

$$F_{1i} = \sqrt{F_{x_{1Mi}}^2 + F_{y_{1Mi}}^2 + F_{z_{1Mi}}^2} = \sqrt{F_{c_{1i}}^2 + F_{f_{1i}}^2 + F_{p_{1i}}^2} \quad (1. 23)$$

Při běžném obrábění dosahuje síla posuvová (působící ve směru posuvu) 40 – 50 % velikosti řezné síly. Pasivní síla (působící kolmo na obráběnou plochu) pak asi 25 %. Empiricky pak lze určit i normálová složka řezné síly  $F_{cN}$ , která obvykle dosahuje hodnot  $(0,6-0,8) \cdot F_c$ .

Z této silové analýzy vyplývá cyklické zatěžování frézovacích hlav, které může mít negativní důsledky na průběh opotřebení břitu a vznik chvění. V praxi se tento jev potlačuje [6]:

- volbou vhodné geometrie frézovací hlavy, kdy podle frézovací operace mohou být bříty frézy s geometrií čela v rovině boční a zadní  $\gamma_p:\gamma_f$  na tzv. pozitivně – pozitivní, pozitivně – negativní a negativně – negativní [6],
- volbou vhodné rozteče frézovacích hlav – frézy se dělí podle rozteče zubů na frézy s velkou, malou, zvláště malou roztečí a frézy se zuby s nepravidelnou roztečí [6].

Správná volba geometrie frézovací hlavy je velmi důležitá, neboť se jedná o poměrně drahé, ale výkonné nástroje, které jsou schopny dosáhnout velkých úběrů materiálu i uspokojivé kvality povrchů [6].

### 1.12 Měření silového zatížení při frézování

Měření silového zatížení probíhá vždy experimentální formou a to pomocí zařízení pro měření sil, které pracují na základě různých principů:

- mechanické,
- pneumatické,
- hydraulické,
- elektrické.

Nejpoužívanější dynamometry jsou elektrické, a ty lze dále dělit na:

- indukční,
- kapacitní,
- odporové,
- piezoelektrické.

Nejpoužívanější a nejlepší pro měření silového zatížení z uvedených dynamometrů je piezoelektrický, jehož princip je popsán níže.

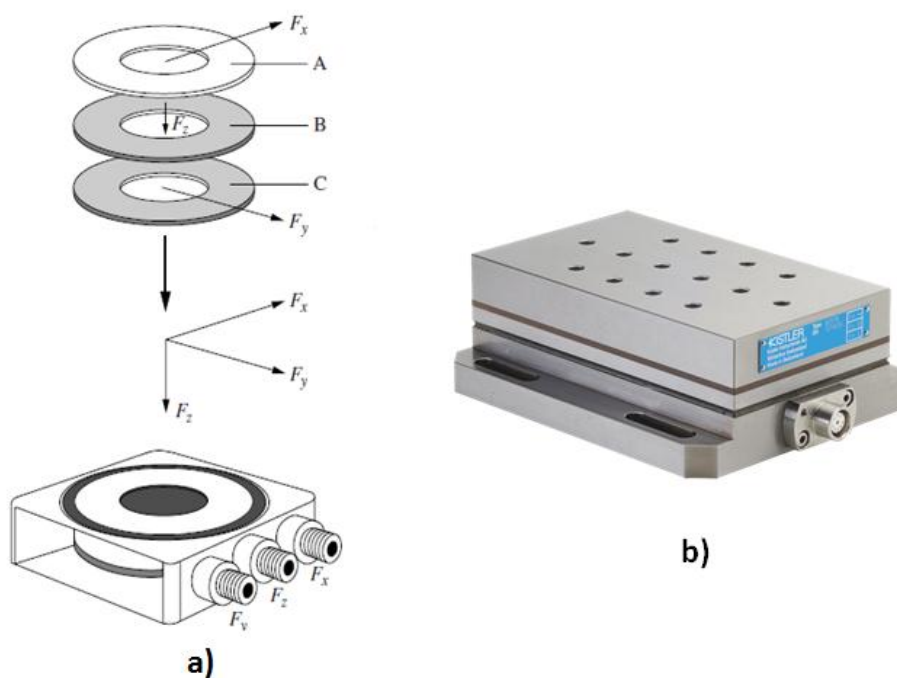
### 1.12.1 Piezoelektrické snímače sil

Tyto snímače patří v obrábění k nejpoužívanějším, zejména kvůli velkému měřicímu rozsahu.

Dynamometry využívají principu piezoelektrického jevu. Piezoelektrický jev znamená schopnost krystalu generovat elektrické napětí při deformování. Tuto schopnost mají jen některé materiály. V praxi se nejčastěji používá  $\text{SiO}_2$ .

Základem je pro tyto snímače vyříznutá destička vyříznutá z vhodného krystalu. Při zatěžování je velikost náboje přímo úměrná velikosti působící síly a s poklesem zatížení se lineárně snižuje, až zcela vymizí při zatížení nulovém. V současnosti jsou k dispozici piezoelektrické dynamometry KISTLER (obr. 1.14b), speciálně konstruované pro potřeby obrábění [4].

Každý snímač se skládá ze tří elementů, které měří síly v jednotlivých směrech. Uspořádání elementů je zobrazen na obr. 1.14a.



Obr. 1.14 a) Uspořádání krystalů [7], b) Piezoelektrický snímač pro frézování KISTLER 9257 B

[17].

## 2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍCH ZKOUŠEK

Cílem této diplomové práce je předpovědět jakým způsobem se budou měnit síly a drsnost povrchu při frézování s vysokými posuvy u vybraných materiálů.

Tato kapitola bude věnována návrhu experimentálních zkoušek, volbě materiálů a experimentálního příslušenství. Dále pak teoretickému výpočtu hodnot sil a drsnosti, ke kterým by se měl experiment přiblížit.

### 2.1 Zkušební materiály

K experimentálním zkouškám obrábění s vysokými posuvy byly vybrány tři druhy materiálu. Při výběru byla brána v úvahu různá obrobitelnost vzorků. Použité vzorky:

- hliníková slitina značená dle normy DIN AlSi9Cu3, dále pak jen AlSi9Cu3,
- ocel značená dle normy DIN C45, odpovídající zastaralému značení dle ČSN 12 050, dále pak jen C45,
- titanová slitina značená dle normy DIN Ti6Al4V, dále pak jen Ti6Al4V.

Chemické složení materiálů je uvedeno v tabulce 2.1 – 2.3.

#### 2.1.1 Hliníková slitina AlSi9Cu3

Tab. 2.1 Chemické složení AlSi9Cu3 [19].

| Chemické složení AlSi9Cu3 [hm. %] |             |      |      |      |     |      |      |      |               |        |
|-----------------------------------|-------------|------|------|------|-----|------|------|------|---------------|--------|
| Zn                                | Fe          | Si   | Mn   | Ni   | Cu  | Cr   | Pb   | Ti   | Mg            | Al     |
| 1,20                              | 0,6-<br>1,1 | 8-11 | 0,55 | 0,55 | 2-4 | 0,15 | 0,35 | 0,20 | 0,15-<br>0,55 | zbytek |

Tato slévárenská slitina hliníku se používá převážně v automobilovém průmyslu na výrobu bloků motorů.

### 2.1.2 Ocel C45

Tab. 2.2 Chemické složení C45 [20].

| Chemické složení oceli 12050 [hm. %] |               |               |          |          |          |              |              |
|--------------------------------------|---------------|---------------|----------|----------|----------|--------------|--------------|
| C                                    | Mn            | Si            | Cr       | Ni       | Cu       | P            | S            |
| 0,42-<br>0,50                        | 0,50-<br>0,80 | 0,17-<br>0,37 | max 0,25 | max 0,30 | max 0,30 | max<br>0,040 | max<br>0,040 |

Jedná se o konstrukční uklidněnou ocel. Použití oceli je vhodné pro ozubená kola, šneky, rotory šroubových kompresorů, hřídele těžkých strojů, pístnice, šrouby, čepy, vrtací tyče a frézovací trny [20].

### 2.1.3 Titanová slitina Ti6Al4V

Tab. 2.3 Chemické složení Ti6Al4V [21].

| Chemické složení titanu |     |      |     |     |        |     |        |
|-------------------------|-----|------|-----|-----|--------|-----|--------|
| Al                      | V   | C    | N   | O   | H      | Fe  | Zbytek |
| 6,75                    | 4,5 | 0,08 | 0,5 | 0,2 | 0,0125 | 0,3 | 0,1    |

Titanová slitina je specifická v tom, že má nízkou hmotnost a vysokou korozní odolnost. Jedná se o dvoufázovou slitinu  $\alpha+\beta$ , která je jednou z nejpoužívanějších zejména v leteckém a kosmickém průmyslu. Další uplatnění je také v automobilovém průmyslu, na výrobu tlakových nádob, námořním průmyslu a medicíně [21].

## 2.2 Obráběcí stroj

Pro měření sil při frézování materiálů s vysokými posuvy byla vybrána konvenční frézka FD32V od firmy TOS, kterou lze vidět na obr. 2.1. Základní parametry stroje jsou uvedeny v tab. 2.4.



Obr. 2.1 Vertikální konzolová frézka FD32V.

Tab. 2.4 Technické parametry frézky FD32V.

|                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Maximální zatížení stolu       | 800 kg                         |
| Rozměry stolu                  | 450 x 1450 mm                  |
| Maximální podélný zdvih (X)    | 1000 mm                        |
| Maximální příčný zdvih (Y)     | 320 mm                         |
| Maximální vertikální zdvih (Z) | 450 mm                         |
| Rozsah posuvů                  | 10 – 2000 mm.min <sup>-1</sup> |
| Rychloposuv                    | 800 mm.min <sup>-1</sup>       |
| Rozsah otáček vřetena          | 45 – 1400 min <sup>-1</sup>    |
| Příkon                         | 14 kW                          |

### 2.3 Řezný nástroj

Pro frézování byla použita speciální fréza pro frézovací operace s vysokými posuvy (viz obr. 2.2) s označením FF EW D25 – M12 – 06 – C s vyměnitelnou břitovou destičkou FF WOCT 060212T – M. Břitová destička je ze slinutého karbidu s vrstvou povlaku na bázi TiAlN, která byla nanesena metodou povlakování PVD [24]. Destička má úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r = 10^\circ$  a poloměr špičky nástroje  $r_\epsilon = 2$  mm.



Obr. 2.2 Fréza pro vysoké posuvy a použitá destička [18].

### 2.4 Řezné podmínky

Protože stroj, na kterém se experimenty provádí má omezené parametry, je nutné řezné podmínky upravit, tak aby nepřekračovaly maximální hodnoty parametrů. Jedná se zejména o posuvovou rychlost a otáčky na vřetení.

Výpočet řezné rychlosti z dostupných otáček stroje:

$$v_c = \frac{\pi \cdot n \cdot D}{1000} \quad (2. 1)$$

kde:  $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] - řezná rychlost,

$D$  [mm] - průměr nástroje,

$n$  [min<sup>-1</sup>] - otáčky obrobku.

Výpočet posuvu na zub, který lze odvodit ze vztahu pro rychlost posuvu:

$$v_f = f_z \cdot n \cdot z \Rightarrow f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} \quad (2. 2)$$



kde:  $v_f$  [mm.min<sup>-1</sup>] - rychlost posuvu,  
 $f_z$  [mm] - posuv na zub frézy,  
 $n$  [min<sup>-1</sup>] - otáčky obrobku,  
 $z$  [-] - počet břitů frézy.

Experimenty byly prováděny vždy za konstantních otáček při změnách hodnoty posuvu. Hodnoty posuvu na zub byly určeny z nejvyšších možných rychlostí posuvů na stroji. Řezné podmínky použité v experimentu jsou uvedeny v tab. 2.5.

Tab. 2.5 Použité řezné podmínky.

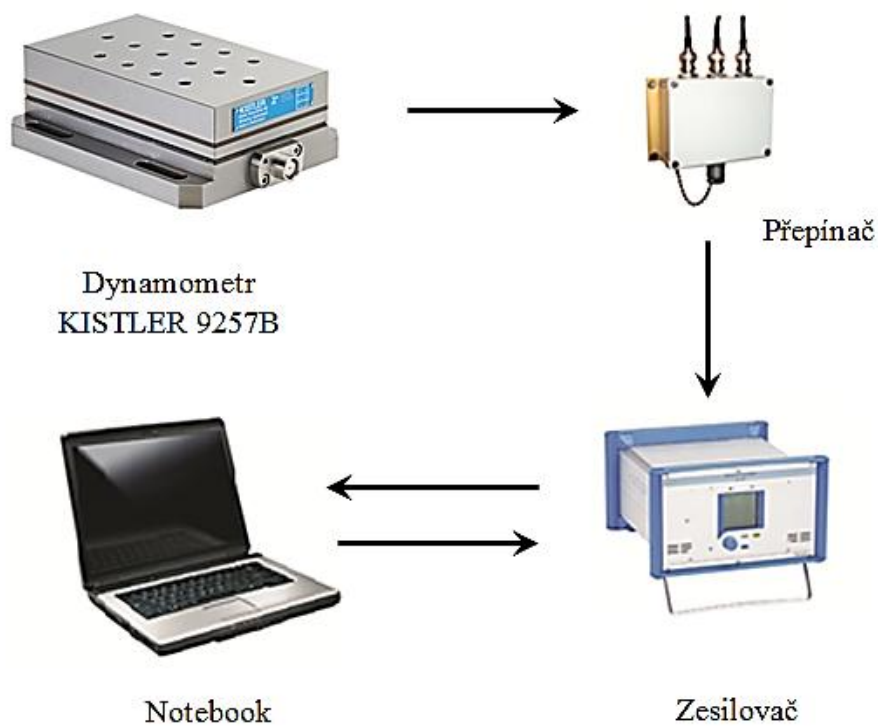
| Materiál        | Označení | Jednotka                | Řezné podmínky |      |      |      |
|-----------------|----------|-------------------------|----------------|------|------|------|
| AlSi9Cu3<br>C45 | $v_c$    | [m.min <sup>-1</sup> ]  | 110            |      |      |      |
|                 | $n$      | [min <sup>-1</sup> ]    | 1400           |      |      |      |
|                 | $v_f$    | [mm.min <sup>-1</sup> ] | 1000           | 1250 | 1600 | 2000 |
|                 | $f_z$    | [mm]                    | 0,71           | 0,9  | 1,14 | 1,43 |
|                 | $a_p$    | [mm]                    | 1              |      |      |      |
|                 | $a_e$    | [mm]                    | 25             |      |      |      |
| Ti6Al4V         | $v_c$    | [m.min <sup>-1</sup> ]  | 71             |      |      |      |
|                 | $n$      | [min <sup>-1</sup> ]    | 900            |      |      |      |
|                 | $v_f$    | [mm.min <sup>-1</sup> ] | 200            | 500  | 800  | 1000 |
|                 | $f_z$    | [mm]                    | 0,22           | 0,55 | 0,88 | 1,11 |
|                 | $a_p$    | [mm]                    | 1              |      |      |      |
|                 | $a_e$    | [mm]                    | 25             |      |      |      |

kde  $a_p$  je šířka záběru ostří a  $a_e$  je radiální šířka záběru třísky.

## 2.5 Aparatura pro měření sil

Pro měření silového zatížení v osách X, Y, Z byl použit dynamometr KISTLER 9257B. Dynamometr je připojen přes rozdělovací box s BNC konektory na osmi-kanálový zesilovač a dále pak na osobní počítač, který obsahuje systém DYNOWARE, který vyhodnocuje signál vycházející z dynamometru a zapisuje jej do textového souboru.

Nastavená frekvence při měření byla 6000 Hz. Celé schéma měřícího procesu je vidět na obr. 2.3.

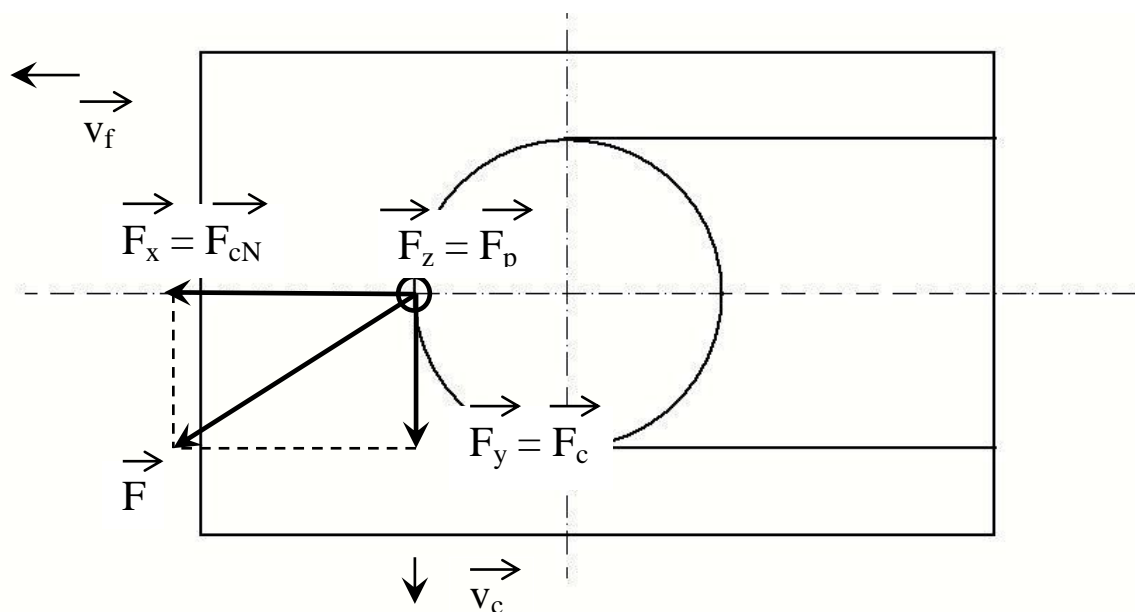


Obr. 2.3 Schématické znázornění měřící aparatury Kistler [26].

Z filtrovaných složek lze spočítat výslednici síly  $F$ , která má tvar

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2. 3)$$

Na obr. 2.4 je znázorněno schéma čelního frézování souměrného, jež přímo odpovídá rozdělní sil při experimentálních zkouškách



Obr. 2.4 Schéma silového zatížení při souměrném čelním frézován.

## 2.6 Zařízení pro měření kvality povrchu

Měření kvality povrchu po obrábění bylo měřeno příručním drsnoměrem TR100 surface roughness tester (obr. 2.5) od výrobce TIME. Výhodou tohoto přístroje je to, že je možné jej použít přímo po obrobení vrstvy materiálu.



Obr. 2.5 Příruční drsnoměr TR 100 [22].

## 2.7 Teoretický výpočet sil

K vypočtení teoretické hodnoty  $F_c$  je použit vztah (1. 24), který byl odvozen výše

$$F_c = k_{c1.1} \cdot f_z^{1-mc} \cdot \sin\varphi^{1-mc} \cdot \sin\kappa_r^{-mc} \cdot a_p \quad (2. 4)$$

K výpočtu měrné řezné síly byl použit vztah

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (2. 5)$$

Teoreticky zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.6. Hodnoty měrných řezných sil  $k_{c1}$  a exponent  $mc$  byly získány od firmy Sandvik Coromant.

Tab. 2.6 Spočtené řezné síly.

| Materiál | mc [-] | $k_{c1}$ [MPa] | $f_z$ [mm] | $F_c$ [N] | $k_c$ [MPa] |
|----------|--------|----------------|------------|-----------|-------------|
| AlSi9Cu3 | 0,25   | 400            | 0,71       | 479       | 676         |
|          |        |                | 0,9        | 573       | 638         |
|          |        |                | 1,14       | 684       | 602         |
|          |        |                | 1,43       | 810       | 571         |
| C45      | 0,25   | 1600           | 0,71       | 1917      | 2704        |
|          |        |                | 0,9        | 2290      | 2550        |
|          |        |                | 1,14       | 2735      | 2409        |
|          |        |                | 1,43       | 3241      | 2283        |
| Ti6Al4V  | 0,23   | 1530           | 0,22       | 713       | 3242        |
|          |        |                | 0,55       | 1444      | 2322        |
|          |        |                | 0,88       | 2074      | 2344        |
|          |        |                | 1,11       | 2480      | 2242        |

## 2.8 Teoreticky vypočtená drsnost povrchu

Výpočet střední aritmetické úchyly je dán vztahem

$$R_{at} = \frac{r_{\varepsilon} - \sqrt{r_{\varepsilon}^2 - \left(\frac{f_z}{2}\right)^2}}{2} \quad (2. 6)$$

Teoreticky spočtené hodnoty drsnosti jsou uvedeny v tab. 2.7.

Tab. 2.7 Spočtené teoretické hodnoty střední aritmetické úchyly.

|                  |                  |      |      |      |       |
|------------------|------------------|------|------|------|-------|
| AlSi9Cu3,<br>C45 | $f_z$<br>[mm]    | 0,71 | 0,9  | 1,14 | 1,43  |
|                  | $R_{at}$<br>[mm] | 2,52 | 4,05 | 6,50 | 10,23 |
| Ti6Al4V          | $f_z$<br>[mm]    | 0,22 | 0,9  | 0,88 | 1,43  |
|                  | $R_{at}$<br>[mm] | 0,24 | 1,51 | 3,87 | 6,16  |

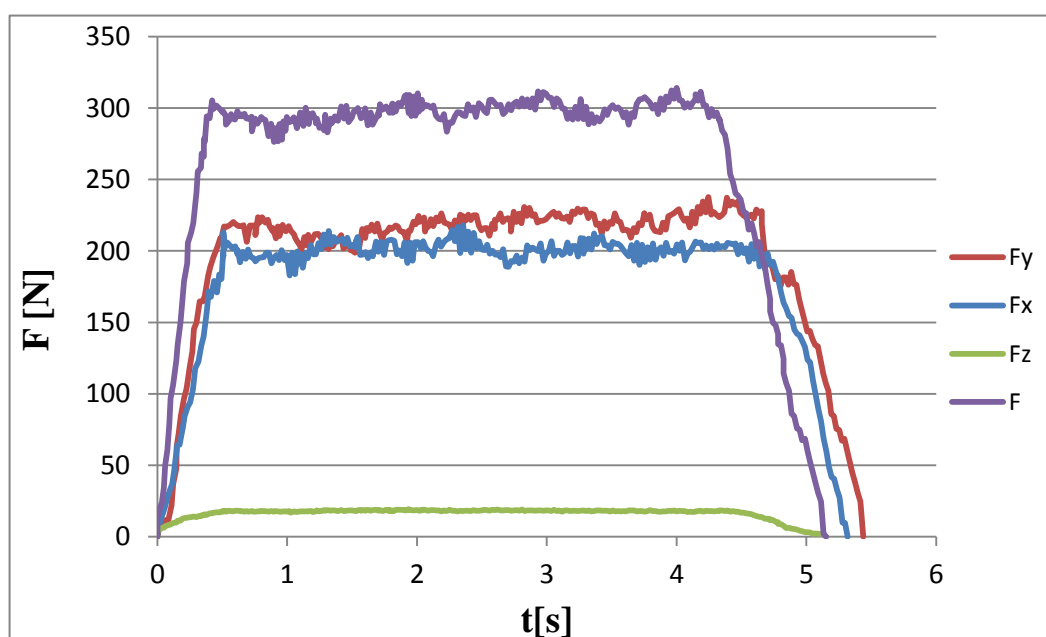
### 3 REALIZACE EXPERIMENTŮ, JEJICH STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

Realizace experimentu spočívala ve frézování vybraných vzorků materiálů za konstantních otáček různými posuvy. Volba pořadí frézování materiálů byla logicky řazena dle obrobitelnosti materiálu. První měření sil a drsnosti probíhalo u slitiny hliníku na nejnižším posuvu na zub  $f_z = 0,71$ . Při tomto posuvu byl průjezd materiálem proveden dvakrát. Po každém průjezdu byla měřena drsnost povrchu příručním měřidlem. Po naměření a zapsání hodnot experiment probíhal dále zvýšením posuvu na zub a celý postup se opakoval až do projetí poslední dráhy a měření na slitině hliníku, poté byl vyměněn materiál za ocel C45 a následně za titanovou slitinu. Každý materiál byl frézován jinou stranou břitové destičky.

#### 3.1 Hodnocení časových průběhů silového zatížení

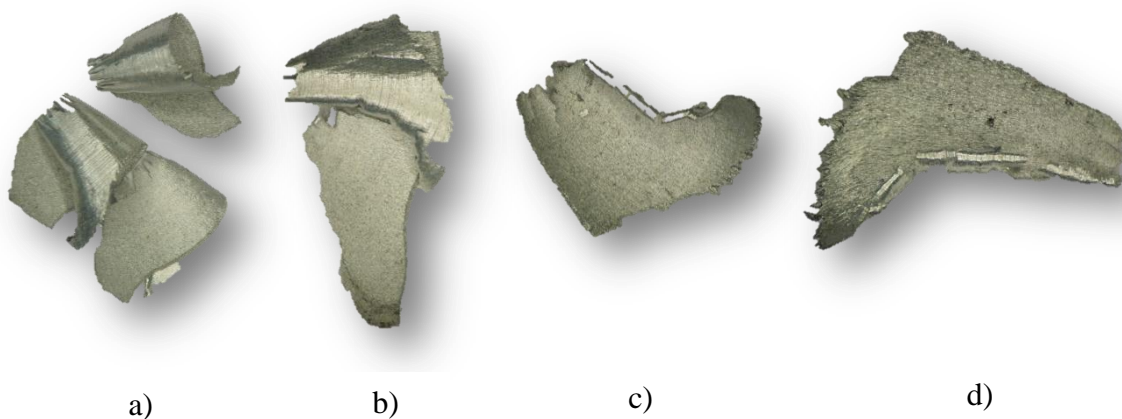
Protože hodnoty získané měřením z dynamometru obsahují některé nepodstatné a nevyhovující data, byly získané data nejprve vhodně upraveny v softwarech Matlab a Microsoft Excel, kde došlo ke vhodné filtraci dat. Byla také použita eliminace dat, které zachycovali časový údaj, kdy nástroj nebyl v zatíženém stavu. Jedná se tedy o náběh a výběh nástroje ze vzorku.

Dosažené výsledky silového působení jsou graficky znázorněny níže (obr. 3.1 – 3.5).



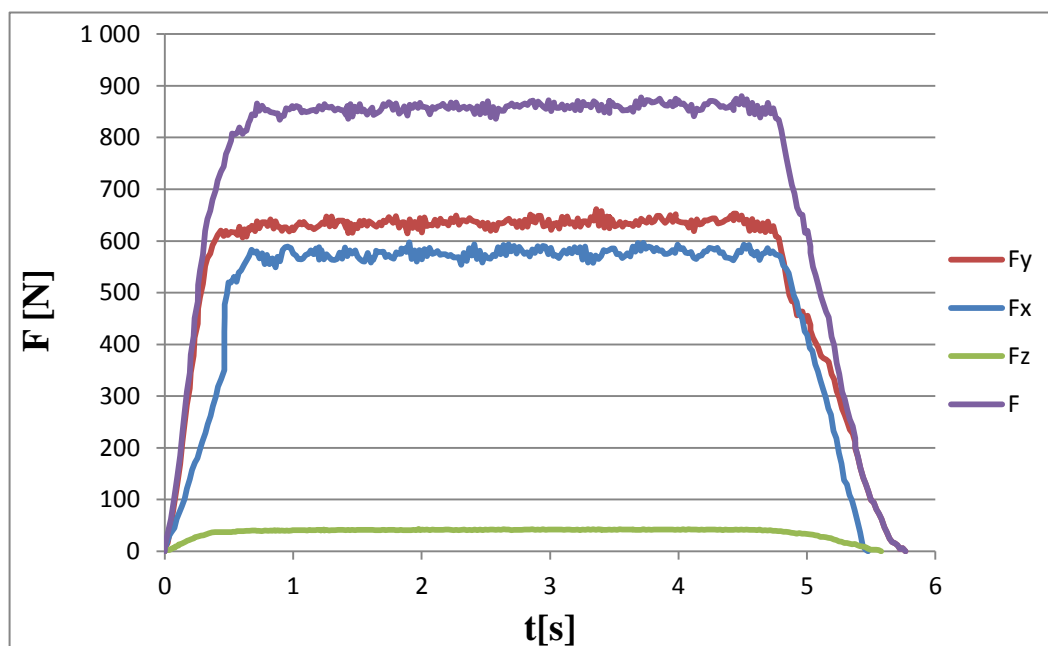
Obr. 3. 1 Průběh slitiny hliníku AlSi9Cu3 pro posuv  $f_z = 0,9$ .

Dále lze poznat, že teorie se shoduje s praktickou zkouškou, to znamená působení minimálního radiálního zatížení nástroje (v tomto případě  $F_z$ ) a vysokých sil axiálních ( $F_x$ ,  $F_y$ ). Tvar třísek po každém posuvu je uveden na obr. 3.2.

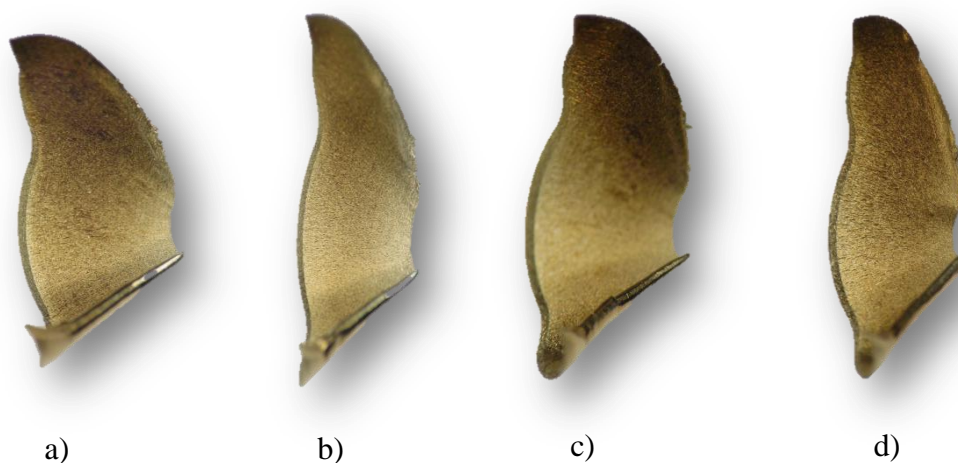


Obr. 3.2 Třísky vytvořené při frézování AlSi9Cu3: a)  $f_z = 0,71$ , b)  $f_z = 0,9$ ,  
c)  $f_z = 1,14$ , d)  $f_z = 1,43$ .

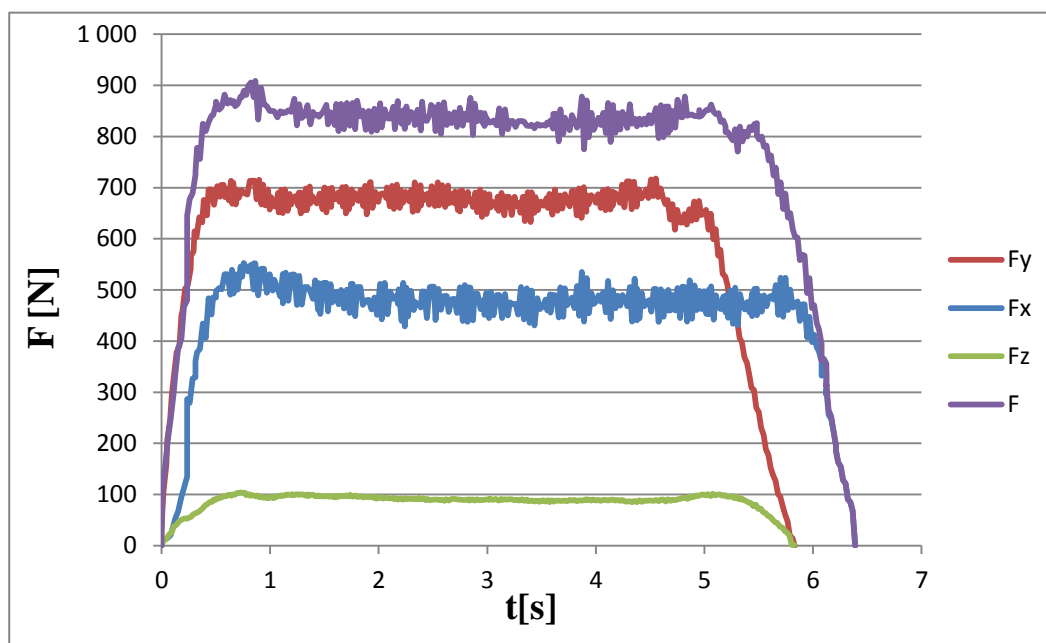
Z následujícího grafu pro ocel C45 je patrné téměř dvojnásobné navýšení sil při frézování oceli oproti slitině hliníku AlSi9Cu3, při stejných řezných podmínkách.



Obr. 3.3 Průběhy silového zatížení při frézování oceli C45 pro posuv  $f_z = 0,9$ .



Obr. 3.4 Třísky vytvořené při frézování C45: a)  $f_z = 0,71$ , b)  $f_z = 0,9$ ,  
c)  $f_z = 1,14$ , d)  $f_z = 1,43$ .

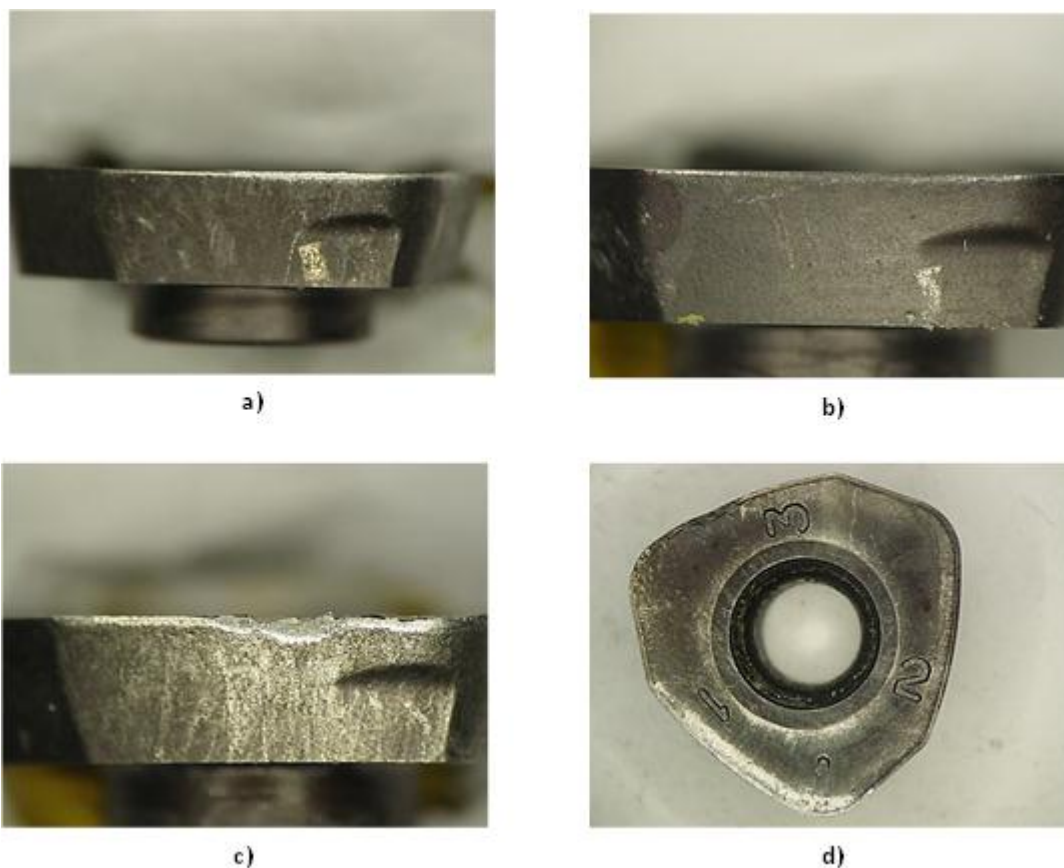


Obr. 3.5 Průběhy silového zatížení při frézování slitiny titanu Ti6Al4V pro posuv  $f_z = 0,22$ .

Titan jako těžkoobrobitelný materiál potvrdil vysoký nárůst silového zatížení (obr. 3.5), a to při použití menších posuvů na zub a snížených otáčkách oproti předchozím zkoušeným materiálům. Taky na břitové destičce již byli patrné větší náznaky opotřebení. Proto lze



očekávat skutečnost, že při dalším zvýšení řezných podmínek dojde k úplnému zničení břitové destičky. Opatření lze vidět na obr. 3.6.

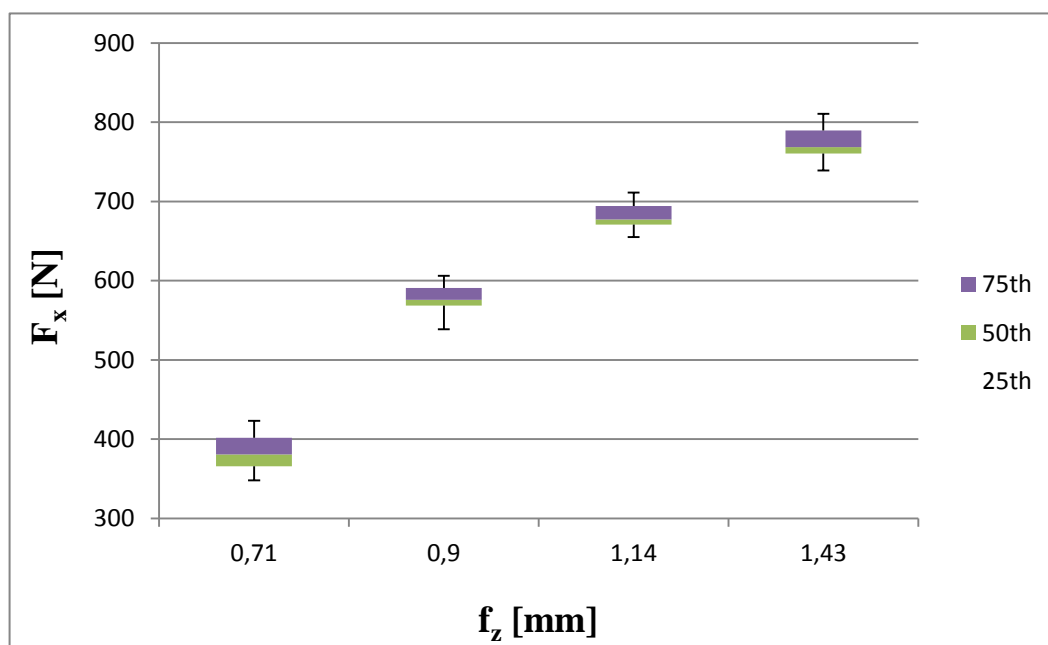
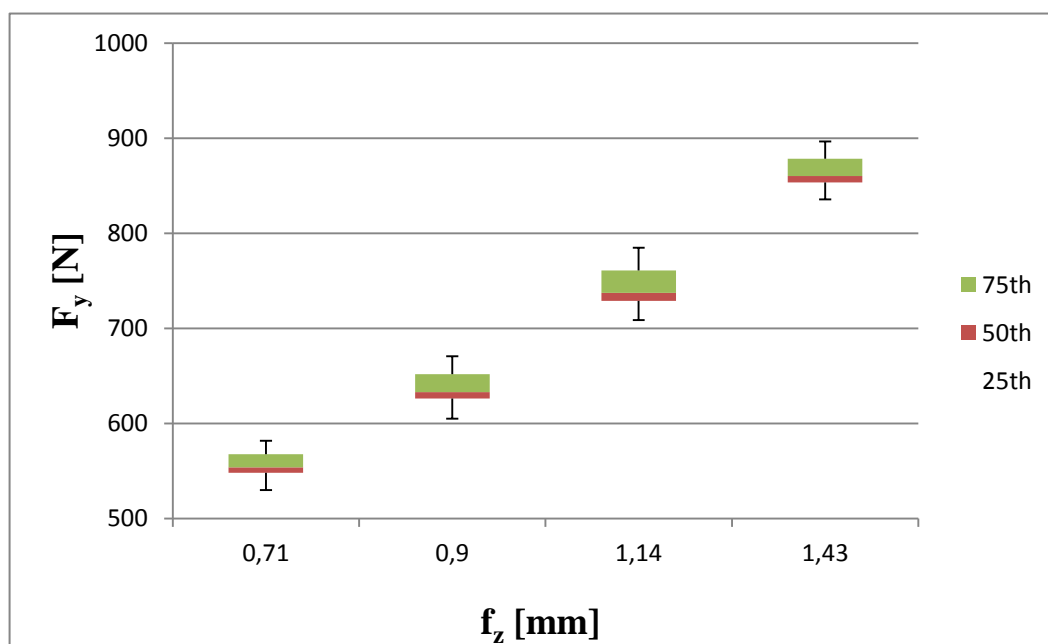


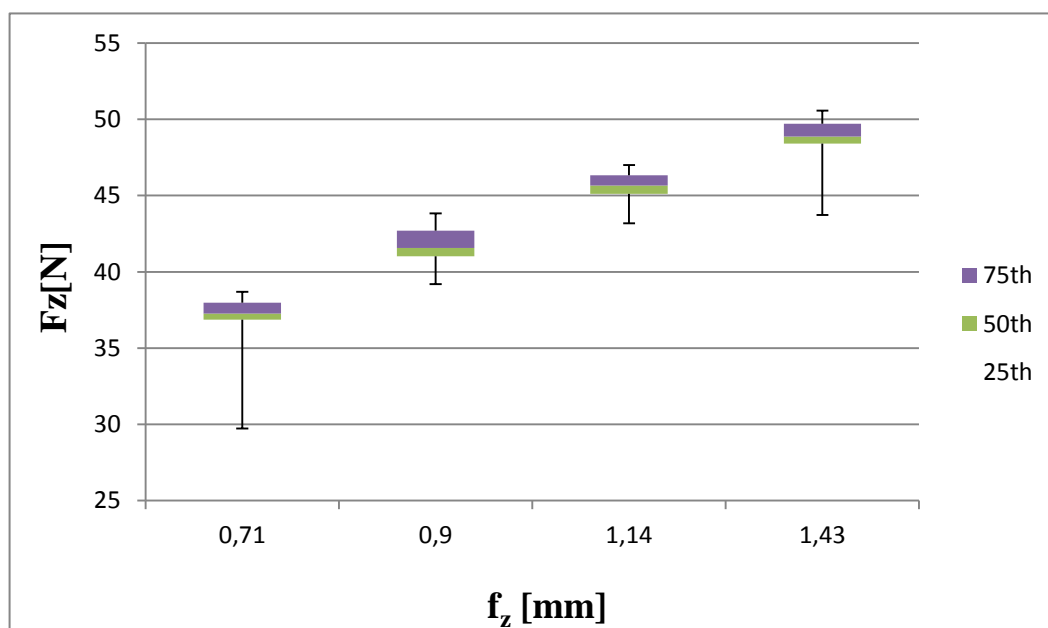
Obr. 3.6 Opatření břitu po obrábění: a) hliníku, b) oceli, c) titanu, d) celkový pohled na opotřebovanou destičku (1. AlSi9Cu3, 2. C45, 3. Ti6Al4V).

Jednotlivé dílčí grafy všech měření jsou uvedeny v přílohách 1-3.

### 3.1.1 Statistické hodnocení složek řezných sil

V následujících grafech (obr. 3.7 – 3.9) je uvedeno statistické vyhodnocení měření jednotlivých složek sil, kde je střední hodnota měrné řezné síly vypočtena z časových průběhů složky řezné síly. Jsou uvedeny také minimální a maximální hodnoty řezné síly pro daný posuv. Uvedené závislosti jsou pro ocel C45. Zbylé závislosti jsou uvedeny v přílohách 4 a 5.

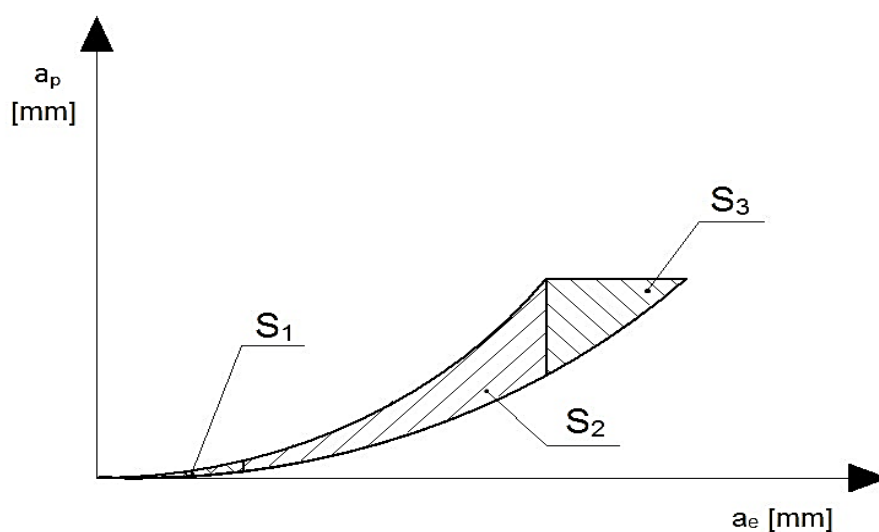
Obr. 3.7 Trend změny síly  $F_x$  v závislosti na posuvu  $f_z$  u oceli C45.Obr. 3.8 Trend změny síly  $F_y$  v závislosti na posuvu  $f_z$  u oceli C45.



Obr. 3.9 Trend změny síly  $F_z$  v závislosti na posuvu  $f_z$  u oceli C45.

### 3.2 Výpočet maximálního průřezu třísky

Základní schéma průřezu třísky je uvedeno v kapitole 1 na obr. 1.5. Jelikož se průřez třísky při frézování mění, musí se k němu přistupovat jako k výpočtu plochu šroubového konoidu, tedy pomocí integrálního počtu a sečtením dílčích ploch. Schéma rozložení dílčích ploch v třísece je zobrazeno na obr. 3.10.



Obr. 3.10 Schéma jednotlivých ploch pro výpočet maximální plochy.

Pro výpočet jednotlivých integrálů byl použit software Maple 11 a kontrola byla provedena v programu Autodesk Inventor.

Pro usnadnění výpočtu byl průřez třísky vždy posunut do počátku souřadného systému.

Vzorový výpočet pro stanovení jednotlivých ploch při frézování s posuvem  $f_z = 0,71$

$$S_1 = \int_0^{0,71} \left( \int_{-12,5}^{\sqrt{156,25-x^2}} dy \right) dx = 0,004 \quad (3. 1)$$

$$S_2 = \int_{0,71}^{4,899} \left( \int_{\sqrt{156,25-x^2}}^{\sqrt{156,25-(x-0,71)^2}} dy \right) dx = 0,604 \quad (3. 2)$$

$$S_3 = \int_{4,899}^{5,609} \left( \int_{\sqrt{156,25-(x-0,71)^2}}^{\sqrt{156,25-x^2}} dy \right) dx = 0,101 \quad (3. 3)$$

Celková maximální plocha třísky je potom

$$A_D = S_1 + S_2 + S_3 = 0,709 \quad (3. 4)$$

Všechny jednotlivé dílčí i maximální plochy průřezu třísky jsou uvedeny v tab. 3.1 a 3.2.

Tab. 3.1 Výsledné hodnoty průřezu.

| <b>AlSi9Cu3, ocel 12050</b>           |              |              |              |             |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| <b>fz</b>                             | <b>0,71</b>  | <b>0,9</b>   | <b>1,14</b>  | <b>1,43</b> |
| <b>S1 [mm<sup>2</sup>]</b>            | 0,004        | 0,007        | 0,015        | 0,029       |
| <b>S2 [mm<sup>2</sup>]</b>            | 0,604        | 0,73         | 0,868        | 1,004       |
| <b>S3 [mm<sup>2</sup>]</b>            | 0,101        | 0,16         | 0,252        | 0,387       |
| <b>A<sub>D</sub> [mm<sup>2</sup>]</b> | <b>0,709</b> | <b>0,898</b> | <b>1,135</b> | <b>1,42</b> |

Tab. 3.2 Výsledné plochy pro titan.

| <b>Ti6Al4V</b>                        |             |             |              |              |
|---------------------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| <b>fz</b>                             | <b>0,22</b> | <b>0,55</b> | <b>0,88</b>  | <b>1,11</b>  |
| <b>S1 [mm<sup>2</sup>]</b>            | 0           | 0,008       | 0,007        | 0,014        |
| <b>S2 [mm<sup>2</sup>]</b>            | 0,21        | 0,48        | 0,724        | 0,852        |
| <b>S3 [mm<sup>2</sup>]</b>            | 0,01        | 0,062       | 0,154        | 0,024        |
| <b>A<sub>D</sub> [mm<sup>2</sup>]</b> | <b>0,22</b> | <b>0,55</b> | <b>0,878</b> | <b>1,105</b> |

### 3.3 Určení měrné řezné síly (odporu)

Měrná řezná síla je stanovena pro střední hodnotu  $F_c$  každé rychlosti posuvu a každého záběru. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.3.

Jak už bylo popsáno výše, je měrná řezná síla stanovena dle

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (3. 5)$$

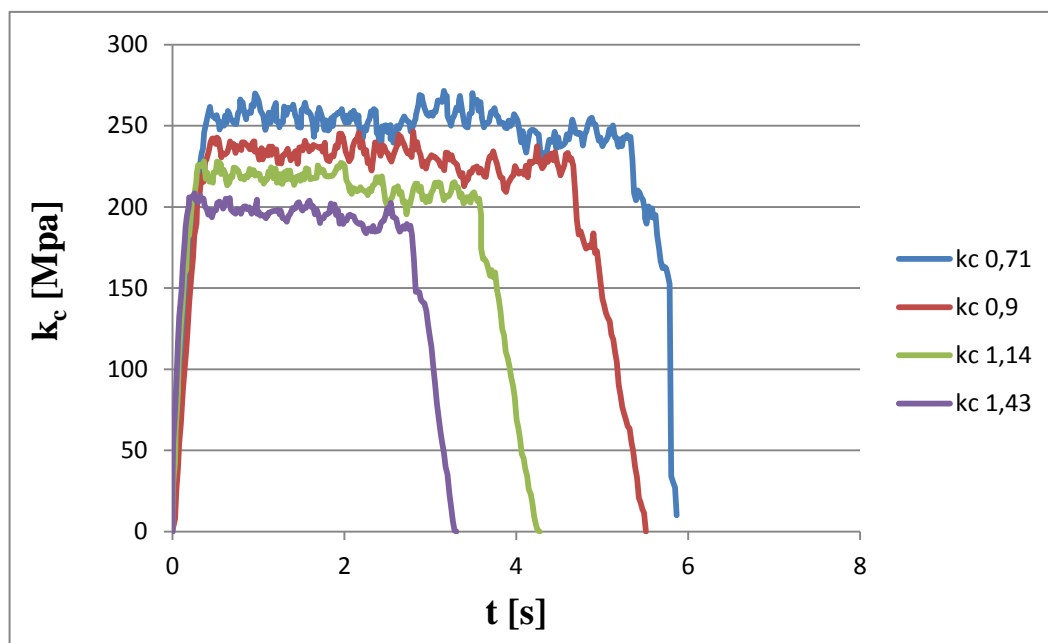
Měrná síla pro ocel při  $f=0,71$  bude tedy:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{580,1774}{0,709} = 818,3038 \quad (3. 6)$$

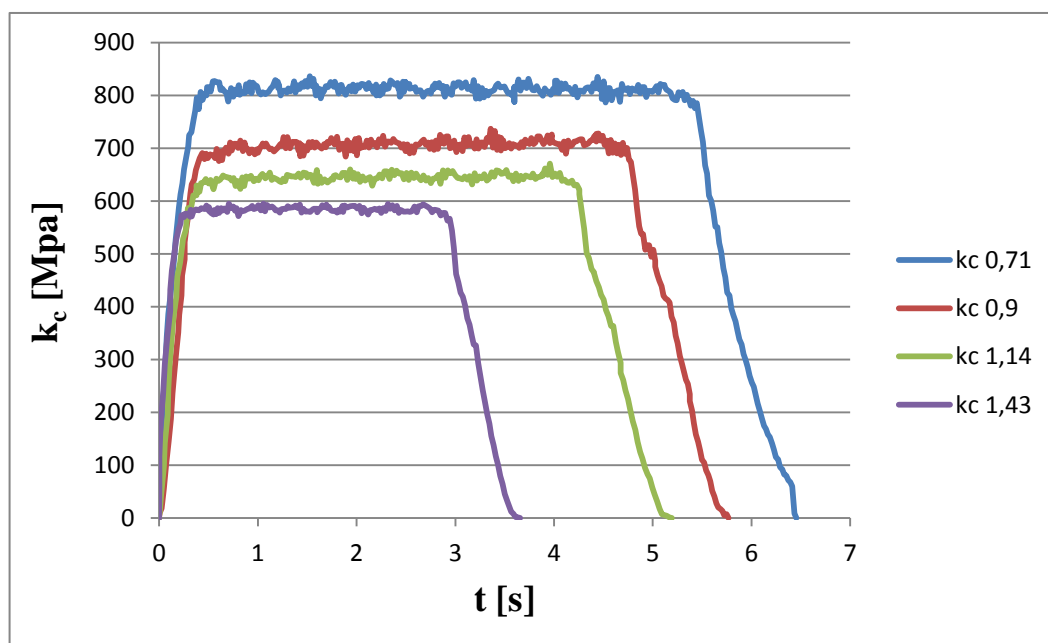
Tab. 3.3 Hodnoty středních měřrých řezných sil.

| Hliník  | $f_z$ | <b>0,71</b> | <b>0,9</b>  | <b>1,14</b> | <b>1,43</b> |
|---------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Záběr 1 | $F_c$ | 218,68      | 228,35      | 268,97      | 332,27      |
|         | $k_c$ | 308,43      | 243,61      | 233,19      | 227,79      |
| Záběr 2 | $F_c$ | 181,08      | 207,85      | 244,99      | 278,52      |
|         | $k_c$ | 255,40      | 231,46      | 215,85      | 196,14      |
| Ocel    | $f_z$ | <b>0,71</b> | <b>0,9</b>  | <b>1,14</b> | <b>1,43</b> |
| Záběr 1 | $F_c$ | 573,88      | 575,33      | 731,15      | 828,96      |
|         | $k_c$ | 809,43      | 640,68      | 614,19      | 583,77      |
| Záběr 2 | $F_c$ | 554,45      | 632,30      | 737,31      | 859,51      |
|         | $k_c$ | 782,01      | 704,12      | 649,61      | 605,29      |
| Titan   | $f_z$ | <b>0,22</b> | <b>0,55</b> | <b>0,88</b> | <b>1,11</b> |
| Záběr 1 | $F_c$ | 636,06      | 748,10      | 825,29      | 875,74      |
|         | $k_c$ | 2891,16     | 1360,19     | 932,53      | 791,81      |
| Záběr 2 | $F_c$ | 679,73      | 706,48      | 730,25      | 537,77      |
|         | $k_c$ | 3089,71     | 1284,51     | 825,146     | 486,23      |

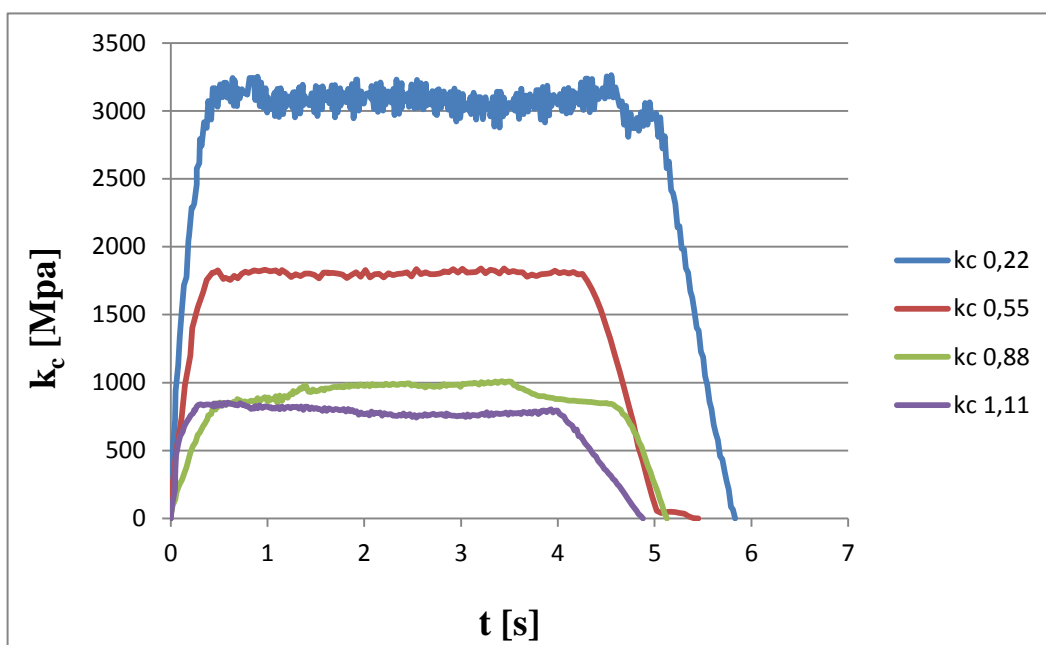
Dále byly vytvořeny časové průběhy pro měrné řezné síly, které jsou uvedeny na obr. 3.11-3.13.



Obr. 3.11 Časový průběh měrné řezné síly pro materiál AISi9Cu3.



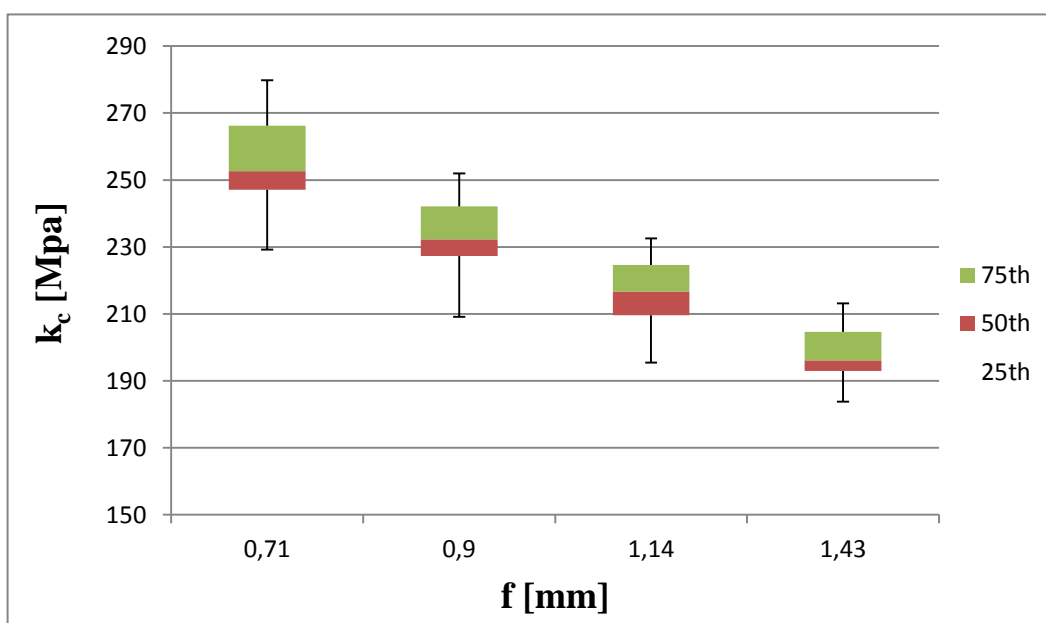
Obr. 3.12 Časový průběh měrné řezné síly pro materiál C45.



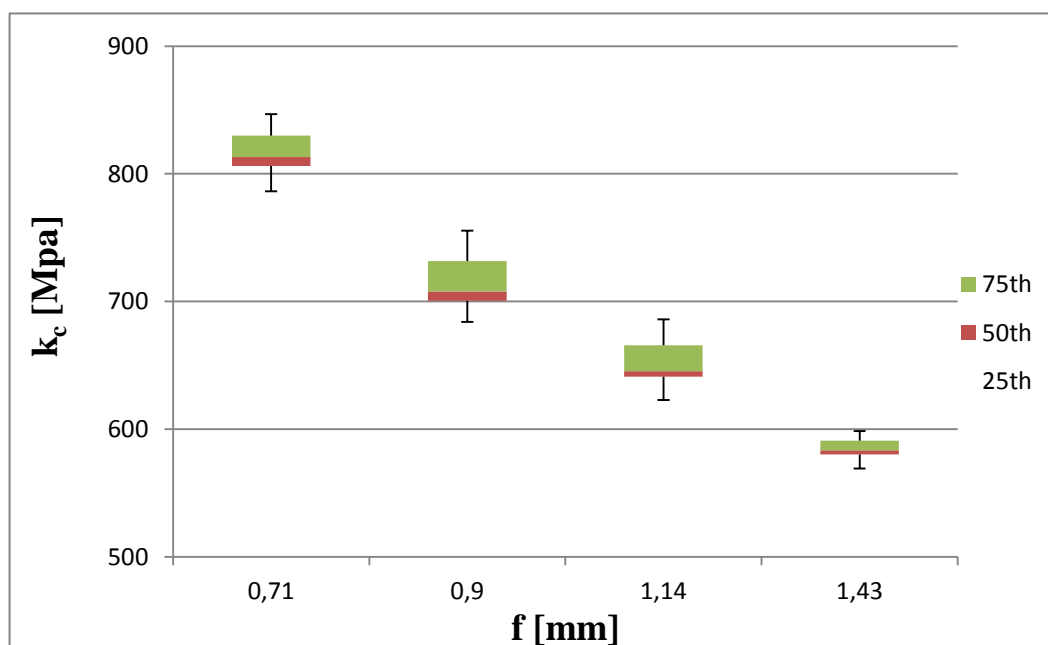
Obr. 3.13 Časový průběh měrné řezné síly pro materiál Ti6Al4V.

### 3.3.1 Statistické hodnocení měrné řezné síly

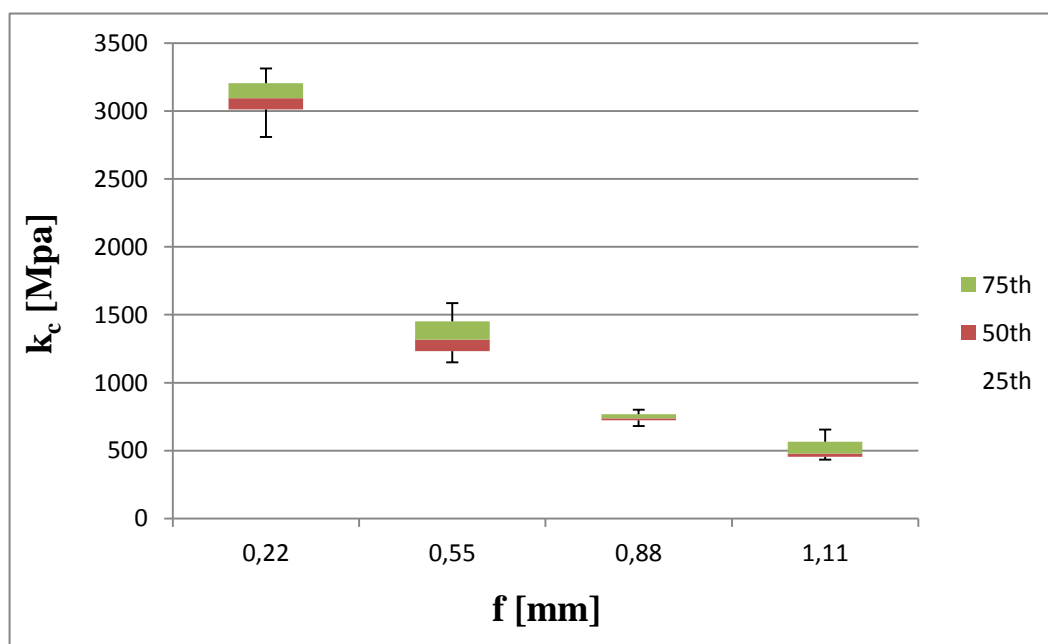
V následujících grafech (obr. 3.14 – 3.16) je uvedeno statistické vyhodnocení měření  $k_c$ , kde je střední hodnota měrné řezné síly vypočtena z časových průběhů měrných řezných sil. Jsou uvedeny také minimální a maximální hodnoty měrné řezné síly pro daný posuv.



Obr. 3.14 Závislost měrné řezné síly  $k_c$  na velikosti posuvu  $f_z$  pro materiál AlSi9Cu3.



Obr. 3.15 Závislost měrné řezné síly  $k_c$  na velikosti posuvu  $f_z$  pro materiál ocel.



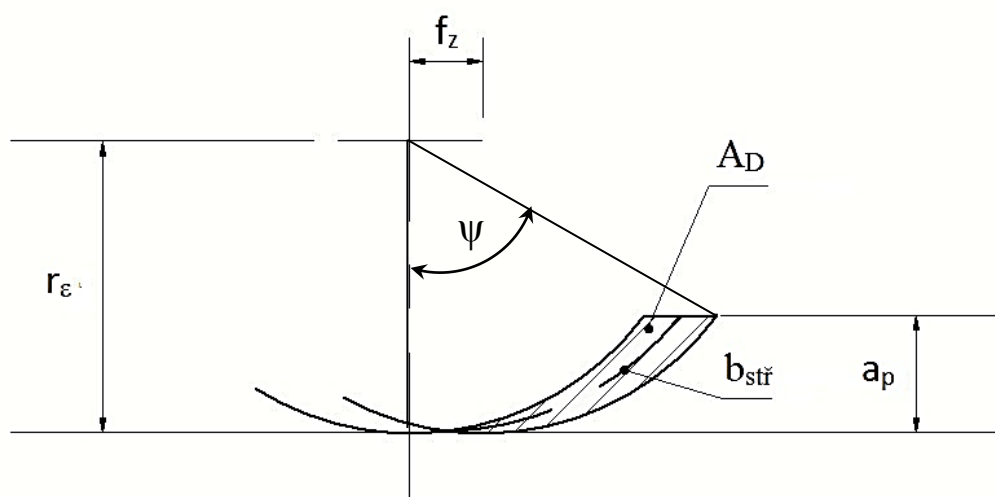
Obr. 3.16 Závislost měrné řezné síly  $k_c$  na velikosti posuvu  $f_z$  pro materiál Ti6Al4V.



### 3.4 Výpočet střední tloušťky třísky

Tloušťka třísky je při frézování velmi proměnlivou veličinou. Tím je její určení poměrně obtížné, proto je výhodnější stanovení střední tloušťky třísky  $h_m$ .

Celý výpočet střední tloušťky třísky začíná z výpočtu délky střední šířky třísky  $l_s$ . Schéma modelu je na obr. 3.17.



Obr. 3.17 Schéma modelu pro výpočet délky střední šířky třísky  $b_{stř}$  [23].

Vztah pro výpočet délky střední šířky je následující

$$b_{stř} = \frac{a_p - r_\epsilon \cdot (1 - \cos\chi_r)}{\sin\chi_r} + \frac{2\pi \cdot r_\epsilon \cdot \chi_r}{360} \quad (3.7)$$

kde  $\chi_r$  je úhel nastavení hlavního ostří na nástroji

Při úhlu nastavení hlavního ostří  $\chi_r = 10^\circ$  a poloměru špičky nástroje  $r_\epsilon = 2$ , bude výsledná délka střední šířky síly tedy

$$b_{stř} = \frac{1 - 2 \cdot (1 - \cos 10)}{\sin 10} + \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 10}{360} = 5,932 \quad (3.8)$$

Vztah pro výpočet střední tloušťky  $h_m$  třísky je definován

$$h_m = \frac{A_D}{b_{stř}} = \frac{a_p \cdot f_z - S_1'}{b_{stř}} \quad (3.9)$$

kde

$$S_1' = f_z \cdot r_\varepsilon - \frac{f_z}{2} \cdot \left[ r_\varepsilon^2 - \left( \frac{f_z}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{\pi \cdot r_\varepsilon^2}{180} \cdot \arcsin \frac{f_z}{2 \cdot r_\varepsilon} \quad (3. 10)$$

Vzorový výpočet pro ocel, posuv  $f_z = 0,71$  bude tedy dle dosazení do vzorce 3. 13

$$h_m = \frac{0,709}{5,932} = 0,1195 \quad (3. 11)$$

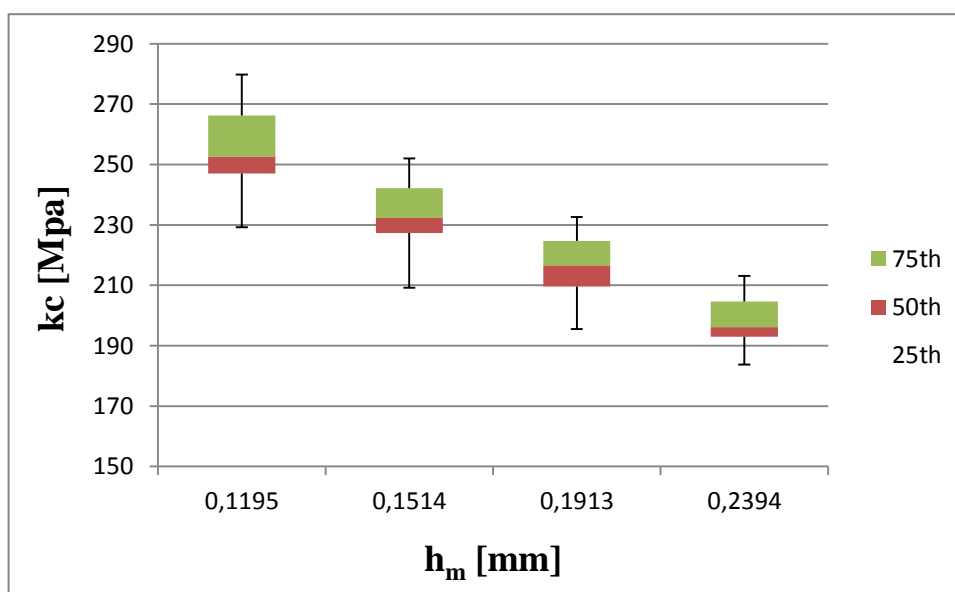
Všechny výsledné hodnoty střední tloušťky třísky  $h_m$ , jsou uvedeny v tab. 3.4

Tab. 3.4 Výsledné hodnoty  $h_m$ .

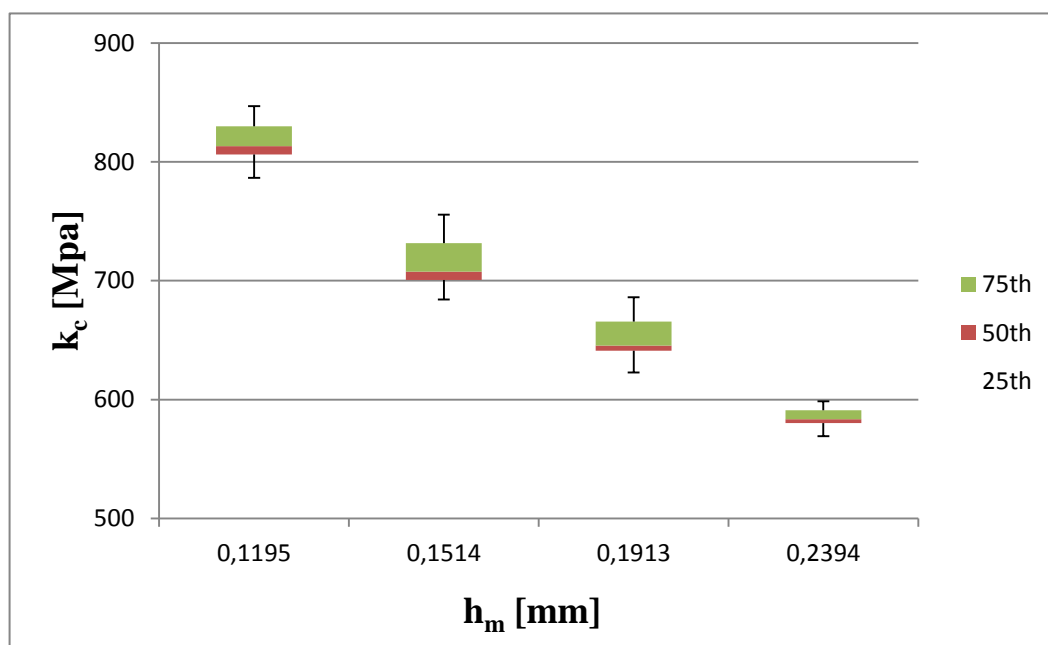
| Slitina hliníku, ocel 12050 |          |          |          |          |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| $f_z$                       | 0,71     | 0,9      | 1,14     | 1,43     |
| $h_m$                       | 0,119507 | 0,151365 | 0,191313 | 0,239352 |
| Titan                       |          |          |          |          |
| $f_z$                       | 0,22     | 0,55     | 0,88     | 1,11     |
| $h_m$                       | 0,037083 | 0,104843 | 0,149174 | 0,186425 |

### 3.4.1 Statistické zhodnocení

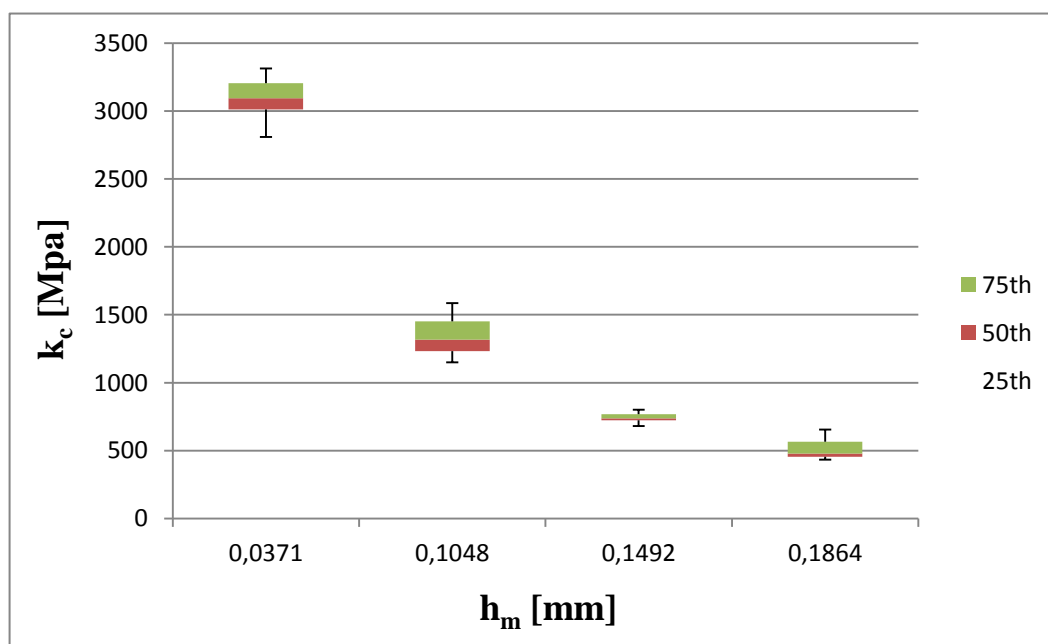
V grafech (obr. 3.18 – 3.20) jsou uvedeny závislosti měrné řezné síly  $k_c$  na hodnotě střední tloušťky třísky  $h_m$ .



Obr. 3.18 Závislost měrné řezné síly  $k_c$  na velikosti posuvu  $h_m$  pro materiál hliník.



Obr. 3.19 Závislost měrné řezné síly  $k_c$  na velikosti posuvu  $h_m$  pro materiál ocel.



Obr. 3.20 Závislost měrné řezné síly  $k_c$  na velikosti posuvu  $h_m$  pro materiál Ti6Al4V.

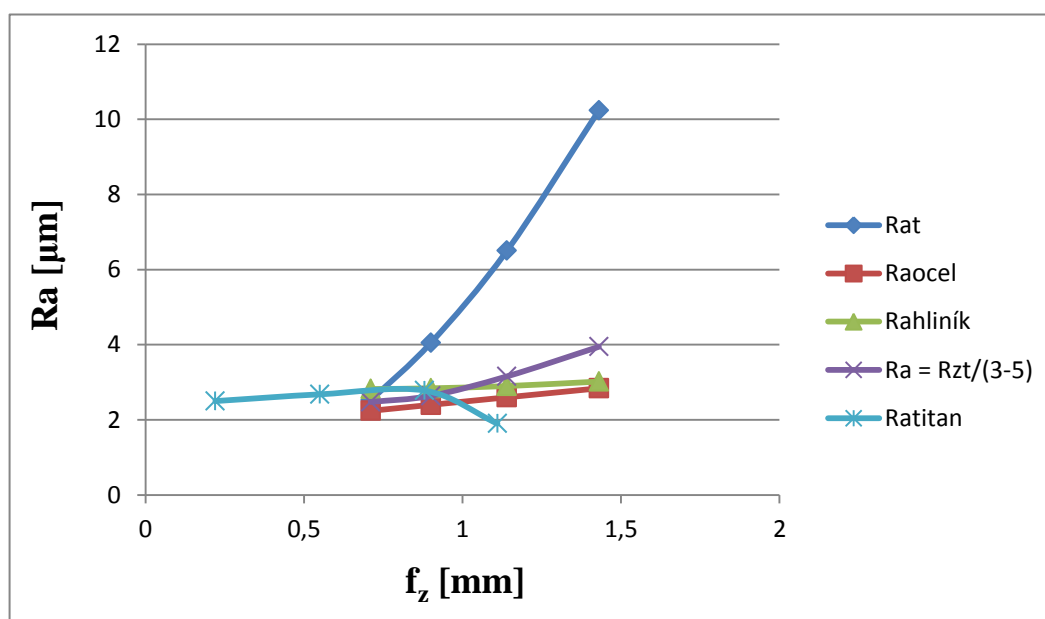
### 3.5 Kvalita opracování

Měření drsnosti probíhalo po každém průjezdu nástroje materiálem. Naměřené hodnoty drsnosti jsou uvedeny v tab. 3.5.

Tab. 3.5 Hodnoty drsnosti plochy.

| Hliníková slitina |             |             |             |             |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $f_z$             | <b>0,71</b> | <b>0,9</b>  | <b>1,14</b> | <b>1,43</b> |
| <b>1</b>          | 2,88        | 2,32        | 3,12        | 2,76        |
| <b>2</b>          | 2,86        | 2,84        | 2,48        | 2,89        |
| Ocel 12050        |             |             |             |             |
| $f_z$             | <b>0,71</b> | <b>0,9</b>  | <b>1,14</b> | <b>1,43</b> |
| <b>1</b>          | 2,35        | 2,31        | 2,79        | 2,60        |
| <b>2</b>          | 2,33        | 2,48        | 2,68        | 2,60        |
| Titan             |             |             |             |             |
| $f_z$             | <b>0,22</b> | <b>0,55</b> | <b>0,88</b> | <b>1,11</b> |
| <b>1</b>          | 2,50        | 2,81        | 2,44        | 1,90        |
| <b>2</b>          | 2,45        | 2,58        | 2,72        | 1,81        |

Na obr. 3.16 je zobrazena závislost průměrné aritmetické úchytky na posuvu.



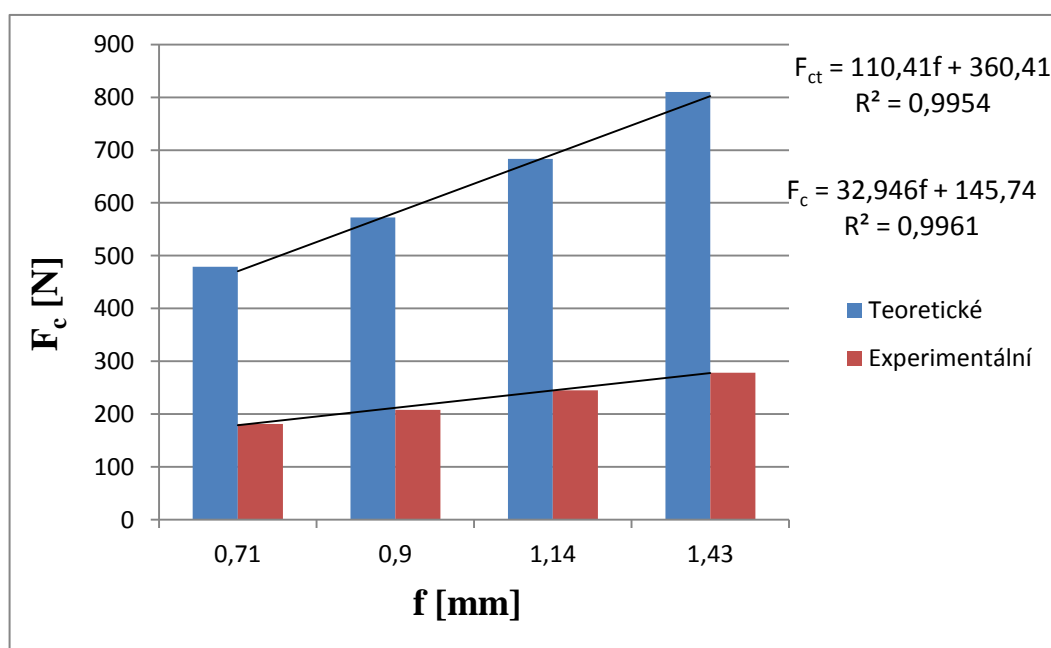
Obr. 3.21 Závislost drsnosti povrchu na posuvu.

Z uvedené závislosti lze vidět, že  $R_{at}$  se příliš odlišuje od reálných hodnot, proto je lepší určit přímou závislost mezi teoretickou nejvyšší hodnotou profilu  $R_{zt}$  (vzorec 1. 3) a naměřenou  $R_a$ . V tomto případě bude vztahová konstanta v rozpětí 2 – 5, tedy

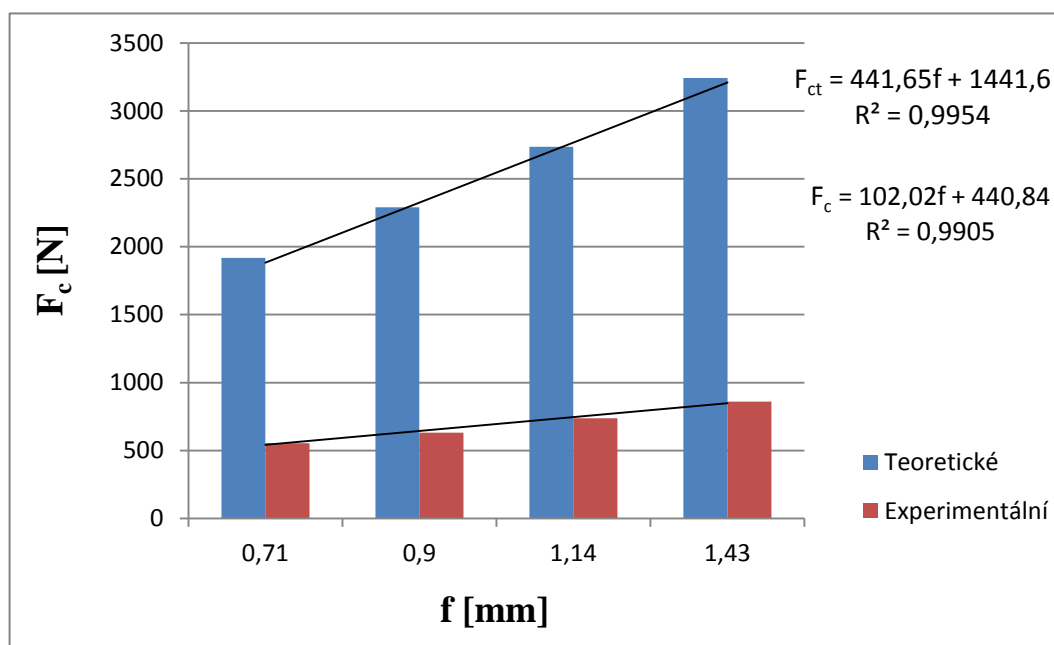
$$R_a = \frac{R_{zt}}{(2 - 5)} \quad (3. 12)$$

### 3.6 Srovnání hodnot

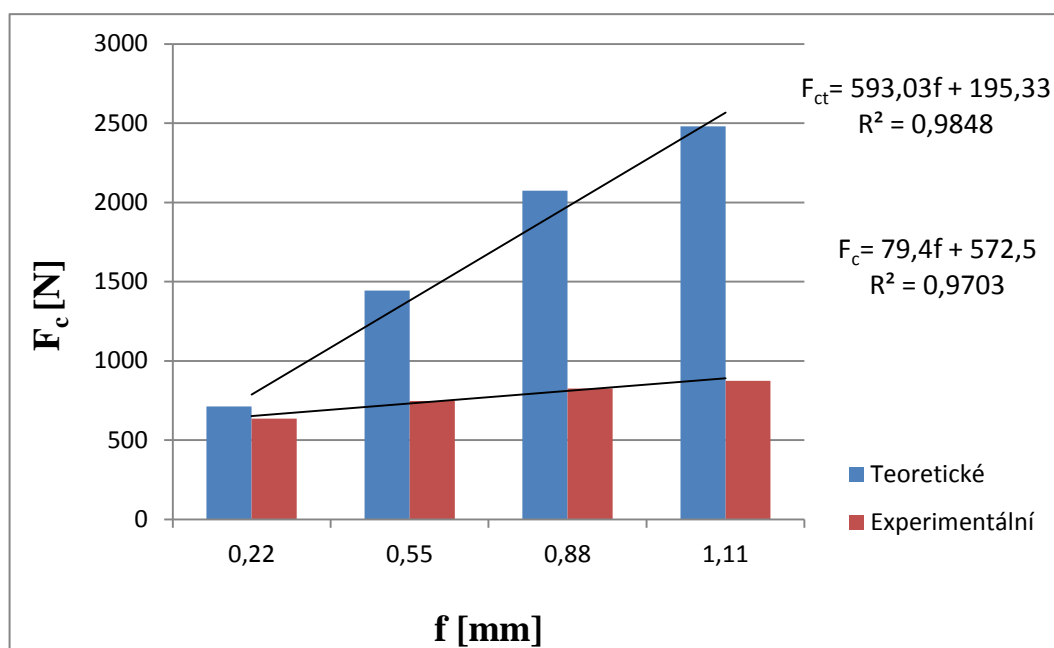
V následujících grafech (obr. 3.21–3.23) je vidět srovnání experimentálních naměřených hodnot řezných sil s teoreticky vypočtenými řeznými silami pro jednotlivé posuvy. Za experimentální hodnoty byly do sloupcového grafu dosazeny střední hodnoty řezné síly.



Obr. 3.21 Rozdíl mezi experimentálně zjištěnými a predikovanými hodnotami u materiálu AlSi9Cu3.



Obr. 3.22 Rozdíl mezi experimentálně zjištěnými a predikovanými hodnotami u materiálu ocel C45.



Obr. 3.23 Rozdíl mezi experimentálně zjištěnými a predikovanými hodnotami u materiálu Ti6Al4V.

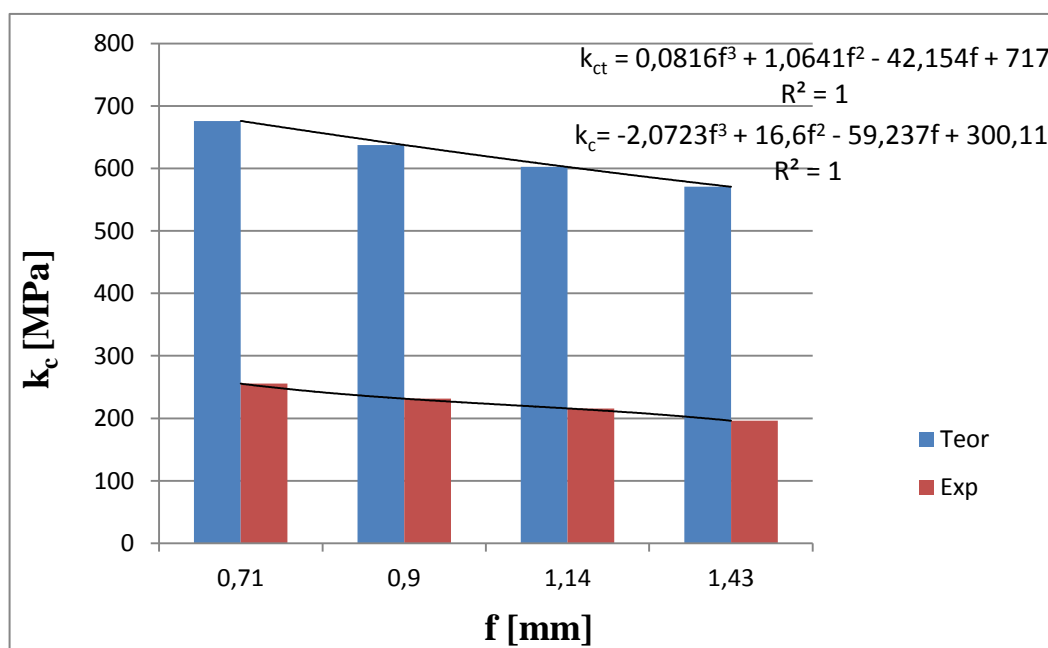
Z grafů lze vidět, že mezi experimentálními a teoretickými hodnotami řezných sil je určitá odlišnost. Pro tuto odlišnost lze zavést zohledňující koeficient, který se určí jako poměr

mezi teoretickými hodnotami proti experimentálním. Hodnoty poměrových konstant jsou uvedeny v tab. 3.7. Z porovnání vyplývá také směr růstu v závislosti na posuvové rychlosti, který je lineární, jehož rovnice jsou uvedeny v grafech.

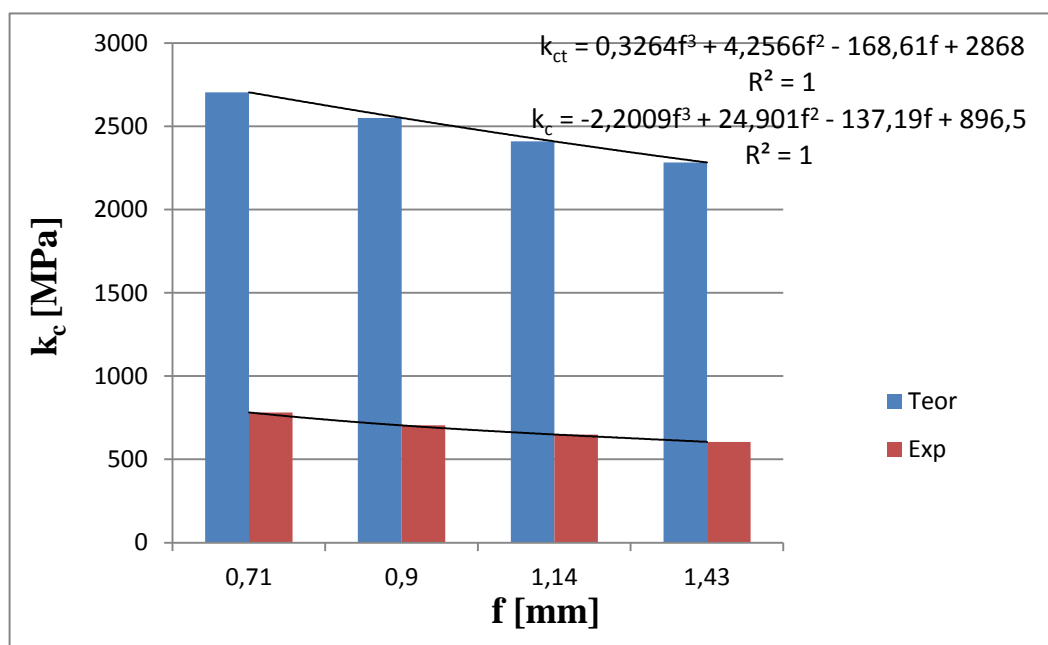
Tab. 3.7 Hodnoty rozdílových konstant.

| Materiál  | Hliník | Ocel | Titan |
|-----------|--------|------|-------|
| Konstanta | 2,8    | 3,6  | 2     |

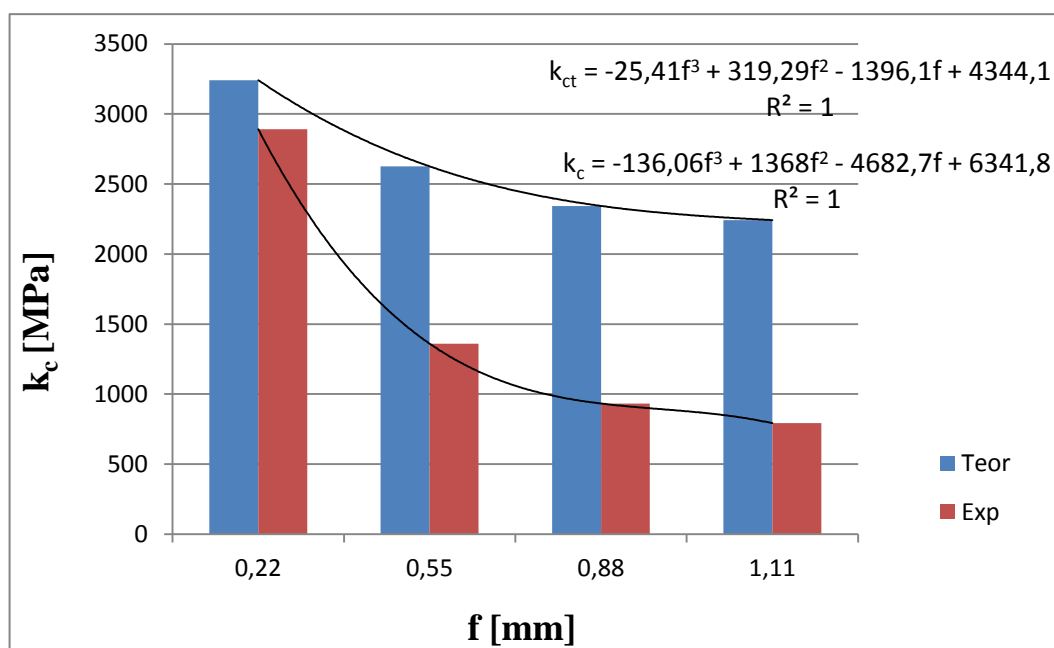
V následujících grafech (obr. 3.24–3.26) je vidět srovnání experimentálních naměřených hodnot měrných řezných sil s teoreticky vypočtenými řeznými silami pro jednotlivé posuvy. Za experimentální hodnoty byly do sloupcového grafu dosazeny střední hodnoty měrné řezné síly.



Obr. 3.24 Rozdíl mezi experimentálně zjištěnými a predikovanými hodnotami u materiálu AlSi9Cu3.



Obr. 3.25 Rozdíl mezi experimentálně zjištěnými a predikovanými hodnotami u materiálu ocel C45.



Obr. 3.26 Rozdíl mezi experimentálně zjištěnými a predikovanými hodnotami u materiálu Ti6Al4V.

Situace u srovnání měrných řezných sil je obdobná, avšak jedná se zde o pokles v závislosti na posuvu. Hodnoty poměrných konstant jsou uvedeny v tab. 3.7.



## DISKUZE

Experimentální práce zahrnovala analytický výpočet sil a teoretické drsnosti povrchu pro čelní frézování s vysokými posuvy. Tato získaná data byla ověřena experimentálně pro vybrané druhy materiálů v závislosti na posuvové rychlosti. Z následného porovnání teoretických hodnot s reálnými hodnotami z obráběcího procesu byla zjištěna skutečnost několikanásobně vyšších teoreticky vypočtených hodnot oproti naměřeným hodnotám – u slitiny hliníku AlSi9Cu3 je tento rozdíl téměř 280 %, u oceli C45 pak 360 % a u slitiny titanu Ti6Al4V se pohybuje kolem 194 %. Velikost řezných sil ovlivňuje mnoho faktorů týkající se řezných podmínek nebo materiálových charakteristik. Tento jev může být způsoben ve skutečnosti menším měrným řezným odporem  $k_{c1}$  pro příslušné řezné podmínky, než jaký je uveden v tabulkách. Také je nutné počítat s tím, že HFM je nová progresivní metoda, která se chová jinak než běžná čelní fréza; svou roli mohly sehrát i kvalitní břitové destičky. Tento rozdíl mezi silami vypočtenými a naměřenými byl zohledněn koeficientem specifickým pro vybrané materiály.

Z experimentálních výsledků řezných sil lze poznat lineární trend růstu řezných sil v závislosti na zvyšujícím se posuvu na zub. U měrné řezné síly je situace opačná – pokles v závislosti na posuvu na zub nástroje znázorňuje polynomická křivka třetího stupně. Je možné tedy předpovědět další změnu sil z uvedených rovnic (kap. 3.6) pro další změny posuvu při specifických řezných podmínkách nastavených u testování. Stejně trendy platí i pro měnící se střední tloušťku třísky – při lineárním růstu řezných sil a polynomickém poklesu měrných řezných sil v závislosti na střední tloušťce třísky  $h_m$ .

Z výsledných časových průběhů silového zatížení při frézování se potvrdila teorie uvedená v kapitole 1, která zmiňuje působení minimálních radiálních sil působících do vřetena a velkých axiálních sil.

Dále byla v práci zkoumána kvalita opracování povrchu při jednotlivých vyšších posuvech na zub a porovnána s teoretickou hodnotou drsnosti povrch  $R_{at}$ . Z porovnání teoretické a naměřené hodnoty byla zjištěna velká rozdílnost při vyšších posuvech, která dosahovala až 300 %. Tato odchylka by mohla být způsobena volbou vztahu (1. 6) pro teoretickou aritmetickou úchylku, který byl odvozen dávno před objevením technologie HFM a kvalitních povlakovaných destiček. Z tohoto důvodu byl použit vztah pro teoretickou

hodnotu největší výšky profilu a hledala se konstanta, která by zohledňovala závislost mezi  $R_{z1}$  a  $R_a$ . Tato poměrná konstanta se pohybuje v rozmezí 3 – 5.

Obráběcí proces frézování s vysokými posuvy (HFM) dosahoval poměrně nízkého silového zatížení a zároveň kvalitního povrchu, proto se jen potvrzuje, že se jedná o opravdu progresivní metodu s velkou budoucností.

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo u vybrané materiálů předpovědět silové zatížení a kvalitu obráběného povrchu pro frézování s vysokými posuvy. Práce byla zaměřena především na určení řezné síly  $k_c$ , měrné řezné síly  $F_c$  a drsnosti povrchu u materiálů z hliníkové slitiny AlSi9Cu3, titanové slitiny Ti6Al4V a oceli C45, za použití frézy pro vysoké posuvy.

Výstupy práce jsou shrnuty v následujících bodech:

- vypočtené hodnoty řezné síly u AlSi9Cu3 jsou o 280% větší než naměřené, u oceli C45 asi o 360 % a u Ti6Al4V o 194 %,
- se zvyšujícím se posuvem  $f$  lineárně roste i řezná síla  $F_c$

$$F_c = 32,946f + 145,74 \text{ pro slitinu hliníku,}$$

$$F_c = 102,02f + 440,84 \text{ pro ocel,}$$

$$F_c = 42,22f + 759,26 \text{ pro titan,}$$

- se zvyšujícím se posuvem  $f$  klesá měrná řezná síla  $k_c$ , křivky definující pokles:

$$k_c = -2,0723f^3 + 16,6f^2 - 59,237f + 300,11 \text{ pro slitinu hliníku,}$$

$$k_c = -2,2009f^3 + 24,901f^2 - 137,19f + 896,5 \text{ pro ocel,}$$

$$k_c = -136,06f^3 + 1368f^2 - 4682,7f + 6341,8 \text{ pro titan.}$$

- s rostoucí tloušťkou  $h_m$  třísky klesá měrná řezná síla  $k_c$ , rovnice stejné viz výše,
- se zvyšujícím se posuvem roste drsnost povrchu  $R_a$  u všech zkoušených materiálů,
- závislost mezi teoretickou nejvyšší výškou profilu  $R_{zt}$  a střední aritmetickou úchylkou  $R_a$ :  $R_{zt} = (2-5) \cdot R_a$ .

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001. 178 s. ISBN 80-214-1996-2.
2. PÍŠKA, M, a kol. *Speciální technologie obrábění*. Učební text pro FSI. Brno: CERM, 2009, s. 248. ISBN 978-80-214-4025-8.
3. *High Feed Milling*. Dostupné na: [http://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Milling/Highfeedmilling/gb\\_hfm\\_brochure\\_lr.pdf](http://www.secotools.com/CorpWeb/Products/Milling/Highfeedmilling/gb_hfm_brochure_lr.pdf) [vid. 11.11.2012].
4. 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>.
5. *Sandvik Coromant* [online]. 2013 [vid. 2013-05-21]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application\\_overview/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/pages/default.aspx).
6. FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.
7. SHAW, M.C. *Metal Cutting Principles*. Oxford University Press, 2nd ed., 2005, pp. 651. ISBN 0-19-514206-3.
8. DeGarmo, P.E., Black, J.T., Kohser, R.A. *Materials and Processes in Manufacturing*. John Wiley and Sons. 2012. 11th edition. 1184 s. ISBN-13 978-0-470-92467-9.
9. TLUSTÝ, J. *Manufacturing Process and Equipment*. 1st edition. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.
10. *Mechanics of Machining* [online]. 2006 [vid. 2013-03-12]. Dostupné z: <http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Manuf%20Proc%20II/pdf/LM-05.pdf>.
11. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cutting – A Practical Handbook*. ISBN 91-972299-4-6..
12. *Příručka pro technology - Jak rozpoznat správné utváření třísek?* [online]. 2012 [vid. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-rozpoznat-spravne-utvareni-trisek.html>
13. *Ovlivnění kvality a jakosti obrobené plochy při frézování* [online]. 2004 [vid. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/ovlivneni-kvality-a-jakosti-obrobene-plochy-pri-frezovani.html>.
14. DAWIM, P. *Surface Integrity in Machining*. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-84882-873-5.

15. PŘIKRYL, Z a R MUSÍLKOVÁ. *Teorie obrábění*. 3. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1982. 240 s.
16. PÍŠKA, M. *Machining today: from theory to applications*. 2008. ISBN 978-80-214-3777-7.
17. *Kistler - Product Detail* [online]. [vid. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.kistler.com/cz/en/product/force/9257B>
18. *ISCAR Cutting Tools - Metal Working Tools - Iscar Catalog* [online]. [vid. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/Ecat/familyHDR.asp?fnum=1800&mapp=ML&GFSTYP=M&lang=EN&tool=T&type=1&search=Y>
19. *Slitina hliníku, EN 1676, zn. EN AB- $AlSi_9Cu_3(Fe)$  (EN AB-46000)* [online]. [vid. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/detail.php?id=32577>
20. *ČSN 12050* [online]. 2011. vyd. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-12050.pdf>
21. *Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy* [online]. 2013. vyd. [vid. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium-Alloy.pdf>
22. *Surface Roughness Tester* [online]. 2010. vyd. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.timeinstrument.com/PDF/Surface%20Roughness%20Tester.pdf>
23. MÁDL, J. *Teorie obrábění*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1989. 156 s.
24. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
25. Kramar, D., Kopac, J. High Performance Manufacturing Aspect of Hard-to Machine Materials. *Advances in Production Engineering & Management*. s. 1-14. 2009. SSN 1854-6250.
26. *APLIKACE MODERNÍCH PVD POVLAKŮ PRO FRÉZOVÁNÍ KALENÝCH OCELÍ* [online]. 2012. vyd. [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: [http://cp.forever.cz/sites/default/files/8s\\_Dvoracek.pdf](http://cp.forever.cz/sites/default/files/8s_Dvoracek.pdf)
27. ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 22 s

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Symbol         | Jednotka                              | Popis                                                         |
|----------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| $A_D$          | [mm <sup>2</sup> ]                    | průřez třísky                                                 |
| $D$            | [mm]                                  | průměr nástroje                                               |
| $F$            | [N]                                   | silová výslednice                                             |
| $F_c$          | [N]                                   | řezná síla                                                    |
| $F_f$          | [N]                                   | posuvová síla                                                 |
| $F_p$          | [N]                                   | pasivní síla                                                  |
| $F_{sh}$       | [N]                                   | tečná síla působící v rovině maximálních smykových napětí     |
| $F_{shN}$      | [N]                                   | normálová síla působící v rovině maximálních smykových napětí |
| $F_x$          | [N]                                   | síla působící ve směru osy X                                  |
| $F_y$          | [N]                                   | síla působící ve směru osy Y                                  |
| $F_z$          | [N]                                   | síla působící ve směru osy Z                                  |
| $F_\gamma$     | [N]                                   | tečná síla působící na čele nástroje                          |
| $F_{\gamma N}$ | [N]                                   | normálová síla působící na čele nástroje                      |
| $Q$            | [cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> ] | rychlost úběru materiálu                                      |
| $R$            | [N]                                   | řezný odpor materiálu                                         |
| $R_a$          | [μm]                                  | střední aritmetická hodnota drsnosti                          |
| $R_{at}$       | [μm]                                  | teoretická střední aritmetická hodnota drsnosti               |
| $R_m$          | [MPa]                                 | pevnost v tahu                                                |
| $R_z$          | [μm]                                  | nejvyšší výška profilu drsnosti                               |
| $R_{zt}$       | [μm]                                  | teoretická nejvyšší výška profilu drsnosti                    |
| $S_i$          | [mm <sup>2</sup> ]                    | dílčí plocha třísky                                           |
| $a_e$          | [mm]                                  | radiální šířka záběru ostří                                   |
| $a_p$          | [mm]                                  | hloubka záběru                                                |
| $b_D$          | [mm]                                  | jmenovitá šířka třísky                                        |
| $b_{stř}$      | [mm]                                  | střední šířka třísky                                          |
| $f_z$          | [mm]                                  | posuv na zub                                                  |
| $h_D$          | [mm]                                  | jmenovitá tloušťka třísky                                     |
| $h_m$          | [mm]                                  | střední tloušťka třísky                                       |
| $k_c$          | [N.mm <sup>-2</sup> ]                 | měrná řezná síla                                              |
| $k_{c1}$       | [N.mm <sup>-2</sup> ]                 | měrná řezná síla vztažená na 1 mm <sup>2</sup> průřezu třísky |
| $mc$           | [-]                                   | exponent                                                      |
| $n$            | [min <sup>-1</sup> ]                  | otáčky                                                        |

|              |                        |                                   |
|--------------|------------------------|-----------------------------------|
| $r_\epsilon$ | [mm]                   | poloměr špičky nástroje           |
| $t$          | [min]                  | čas řezného procesu               |
| $v_c$        | [m.min <sup>-1</sup> ] | Řezná rychlost                    |
| $v_f$        | [m.min <sup>-1</sup> ] | Posuvová rychlost                 |
| $z$          | [-]                    | počet břitů                       |
| $\Phi$       | [°]                    | úhel střižné roviny               |
| $\alpha_o$   | [°]                    | úhel hřbetu                       |
| $\gamma_o$   | [°]                    | úhel břitu                        |
| $\kappa_r$   | [°]                    | úhel nastavení ostří              |
| $\varphi$    | [°]                    | úhel pootočení frézy              |
| $\mu$        | [-]                    | součinitel tření na čele nástroje |

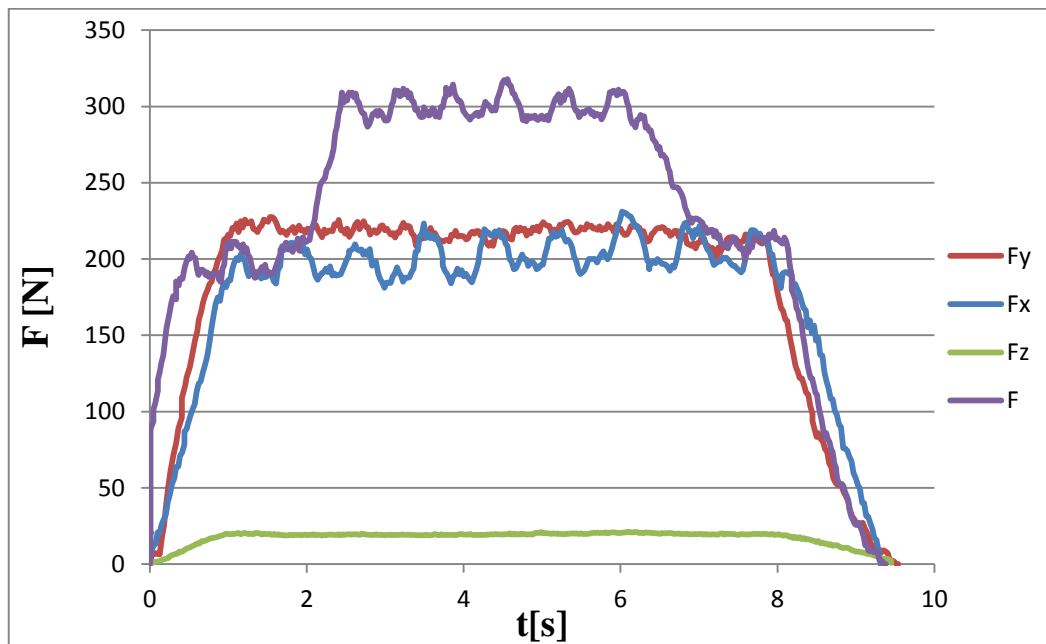
| Zkratka    | Jednotka | Popis               |
|------------|----------|---------------------|
| <b>HFM</b> | [-]      | high feed machining |

**SEZNAM PŘÍLOH**

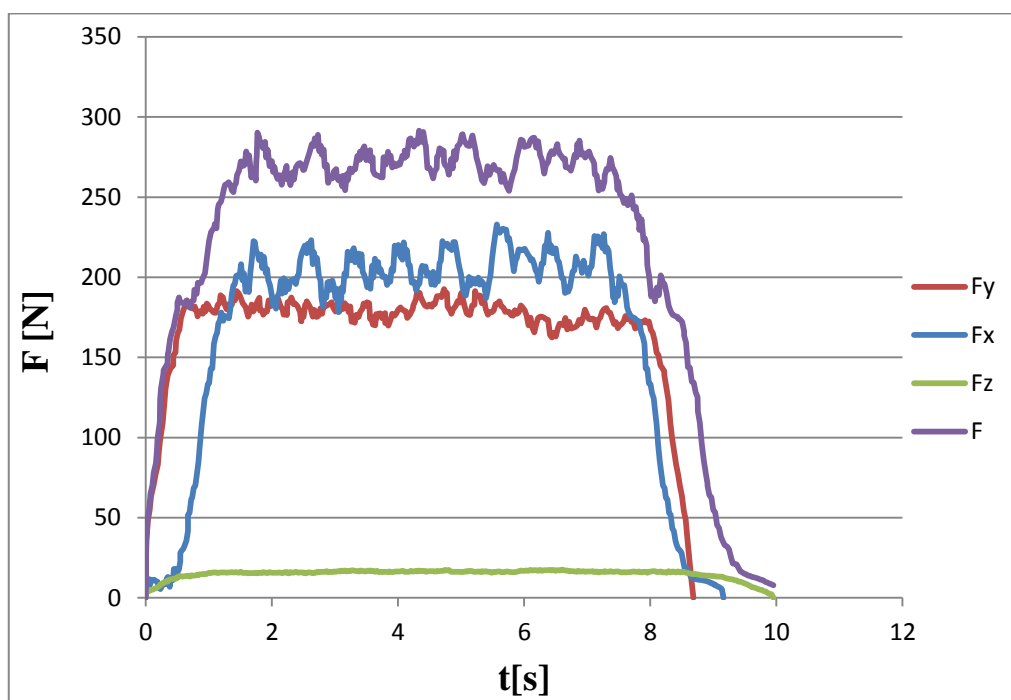
- Příloha 1 Časový průběh silového působení pro jednotlivý posuv u AlSi9Cu3
- Příloha 2 Časový průběh silového působení pro jednotlivý posuv u oceli C45
- Příloha 3 Časový průběh silového působení pro jednotlivý posuv u Ti6Al4V
- Příloha 4 Trend změny silového zatížení v závislosti na posuvu  $f_z$  u AlSi9Cu3
- Příloha 5 Trend změny silového zatížení v závislosti na posuvu  $f_z$  u Ti6Al4V



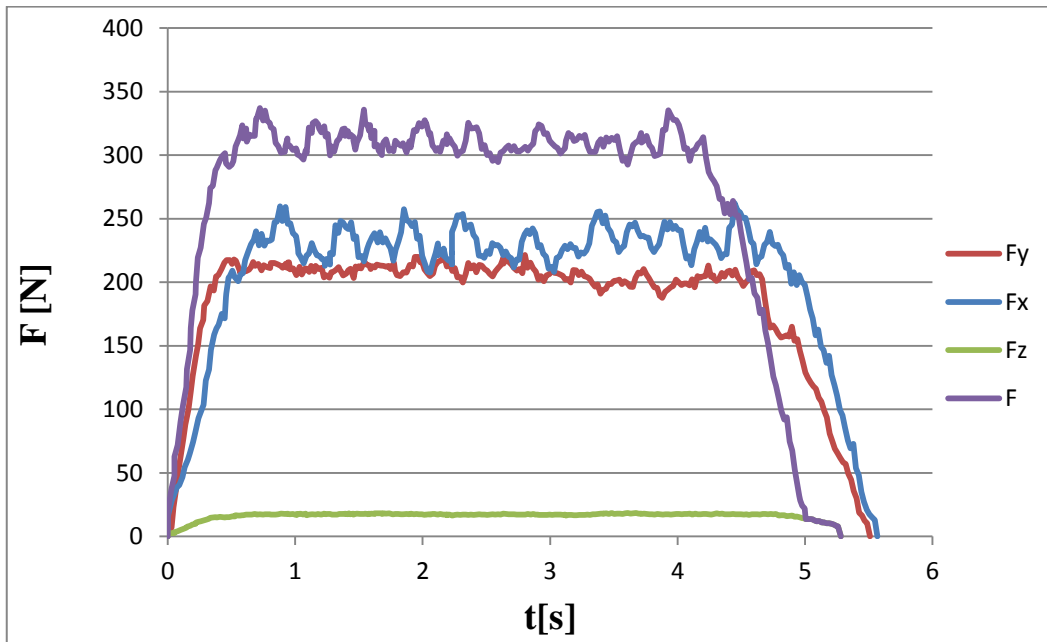
## PŘÍLOHA 1



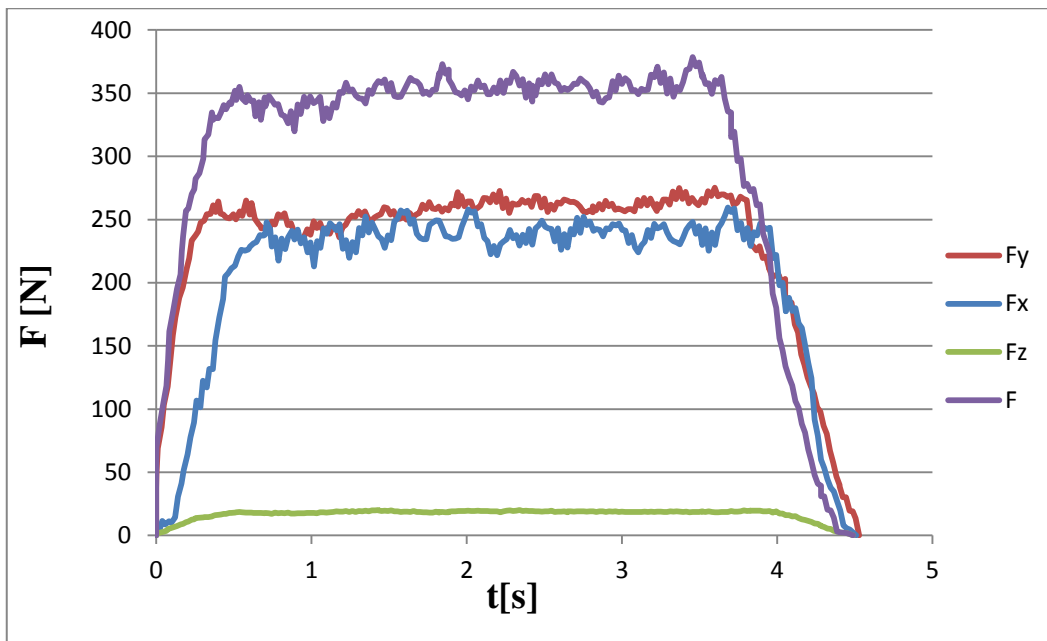
Časový průběh slitiny hliníku AlSi9Cu3 pro posuv  $f_z = 0,71$ ; 1. průjezd.



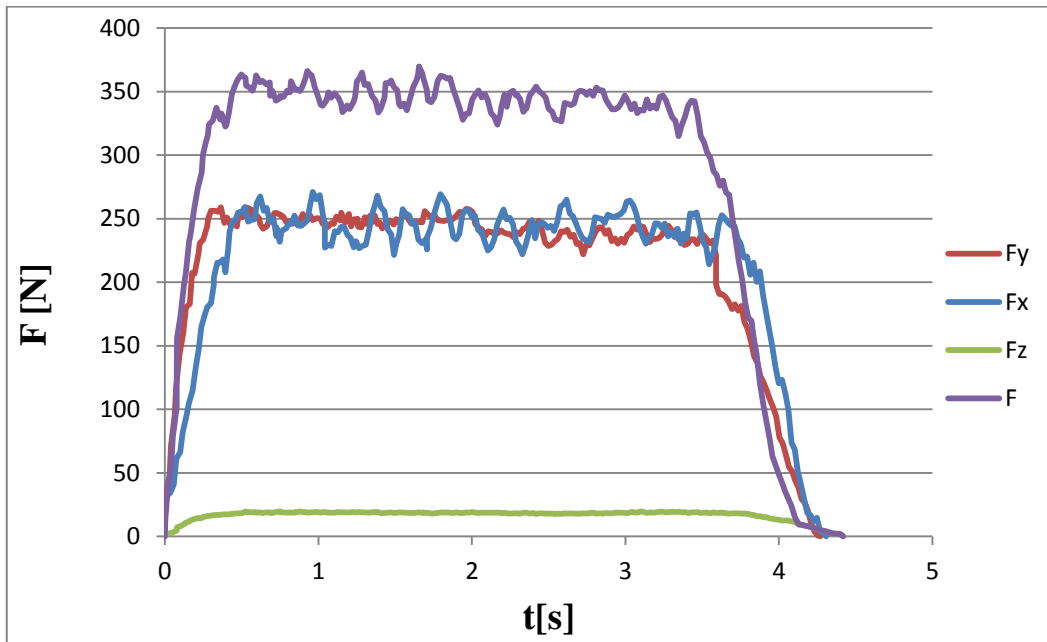
Časový průběh slitiny hliníku AlSi9Cu3 pro posuv  $f_z = 0,71$ ; 2. průjezd.



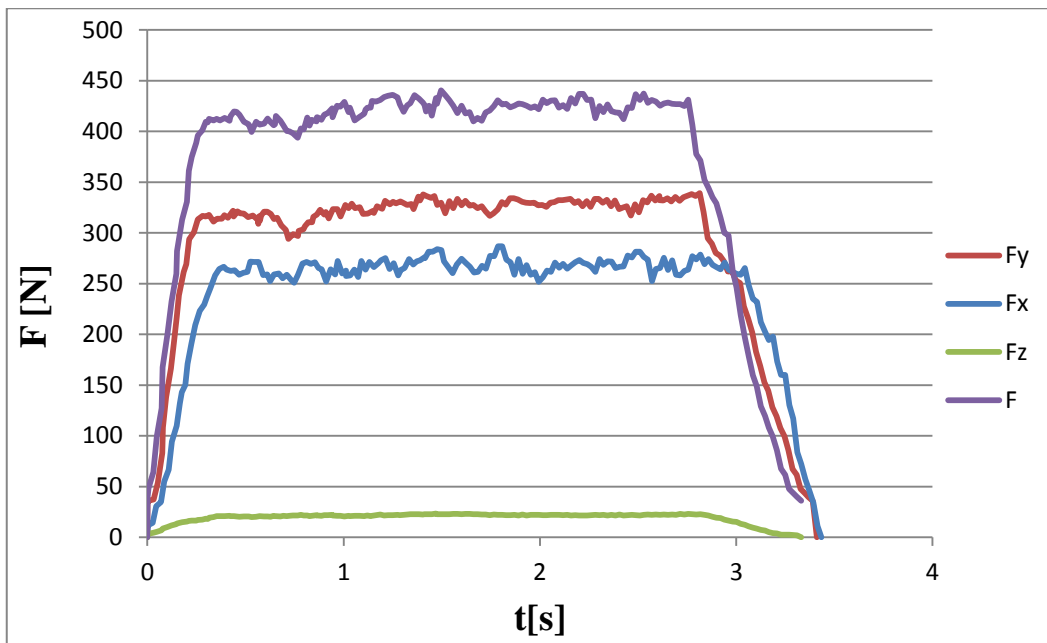
Časový průběh slitiny hliníku AlSi9Cu3 pro posuv  $f_z = 0,9$ ; 2. průjezd.



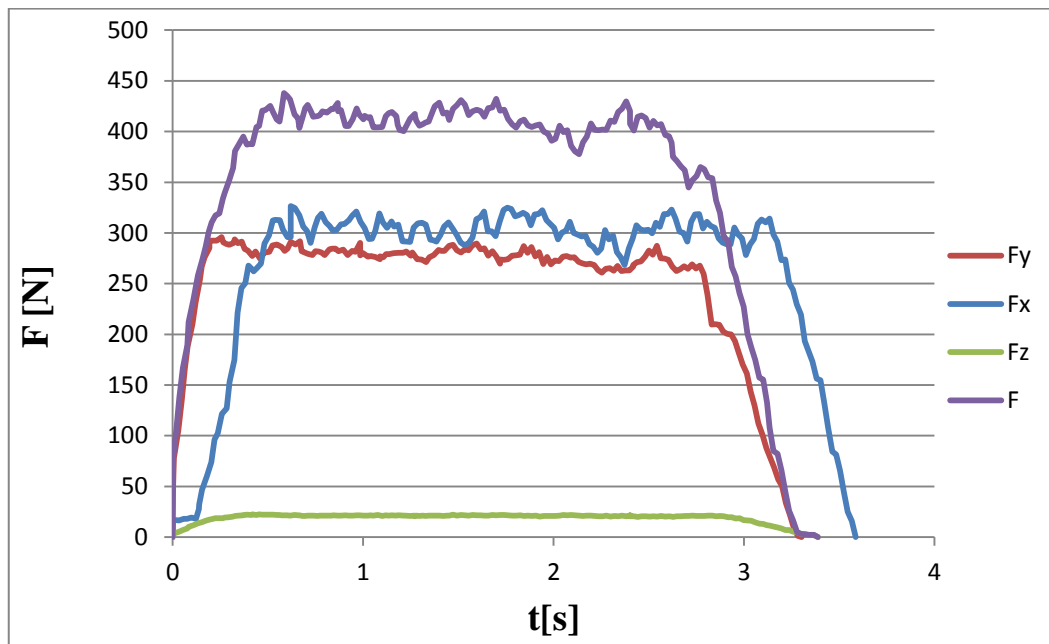
Časový průběh slitiny hliníku AlSi9Cu3 pro posuv  $f_z = 1,14$ ; 1. průjezd.



Časový průběh slitiny hliníku AlSi9Cu3 pro posuv  $f_z = 1,14$ ; 2. průjezd.

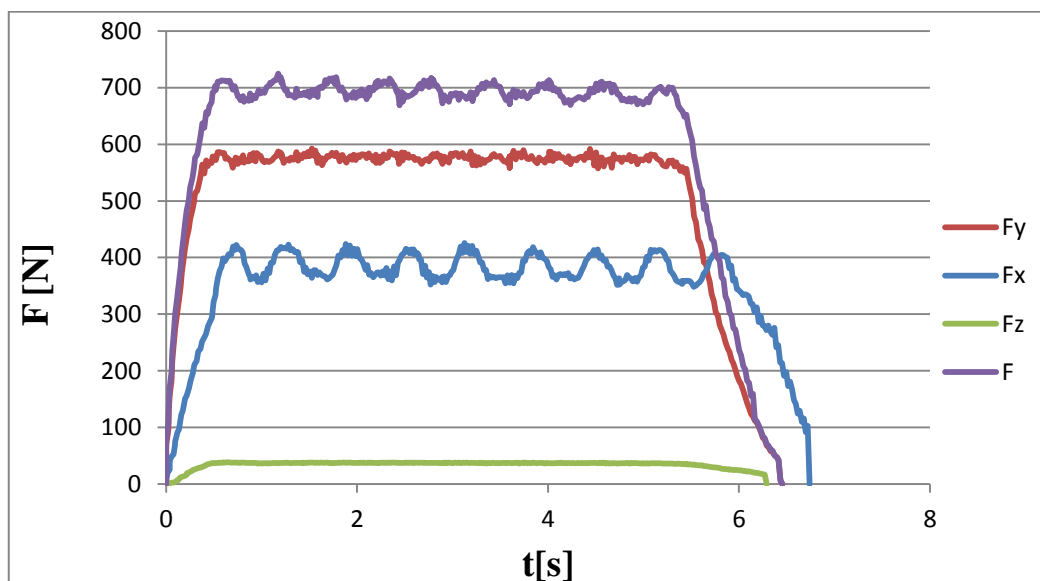


Časový průběh slitiny hliníku AlSi9Cu3 pro posuv  $f_z = 1,43$ ; 1. průjezd.

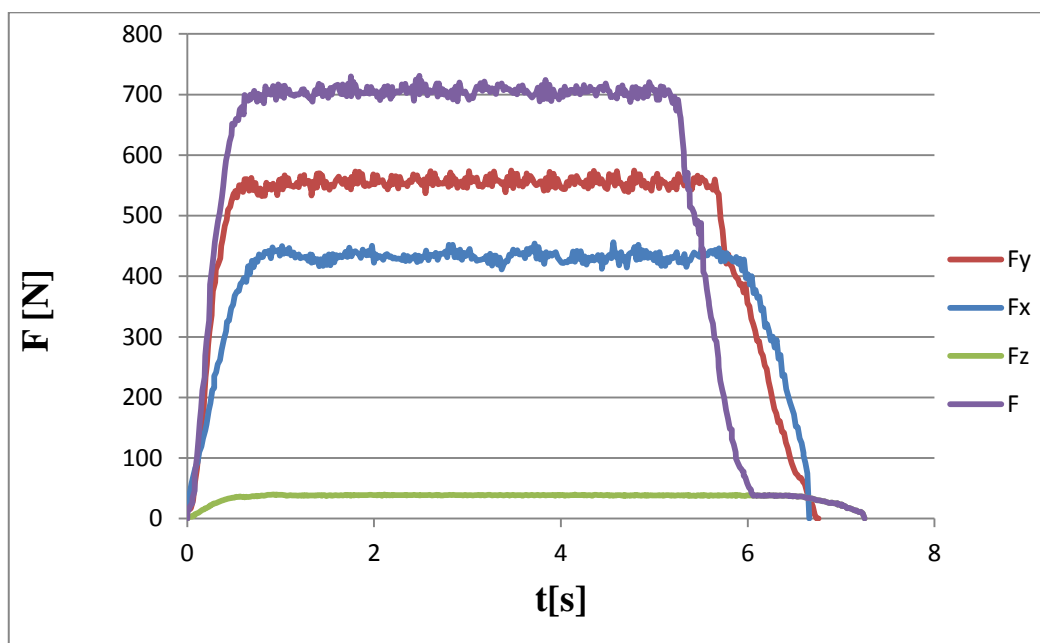


Časový průběh slitiny hliníku AlSi9Cu3 pro posuv  $f_z = 1,43$ ; 2. průjezd.

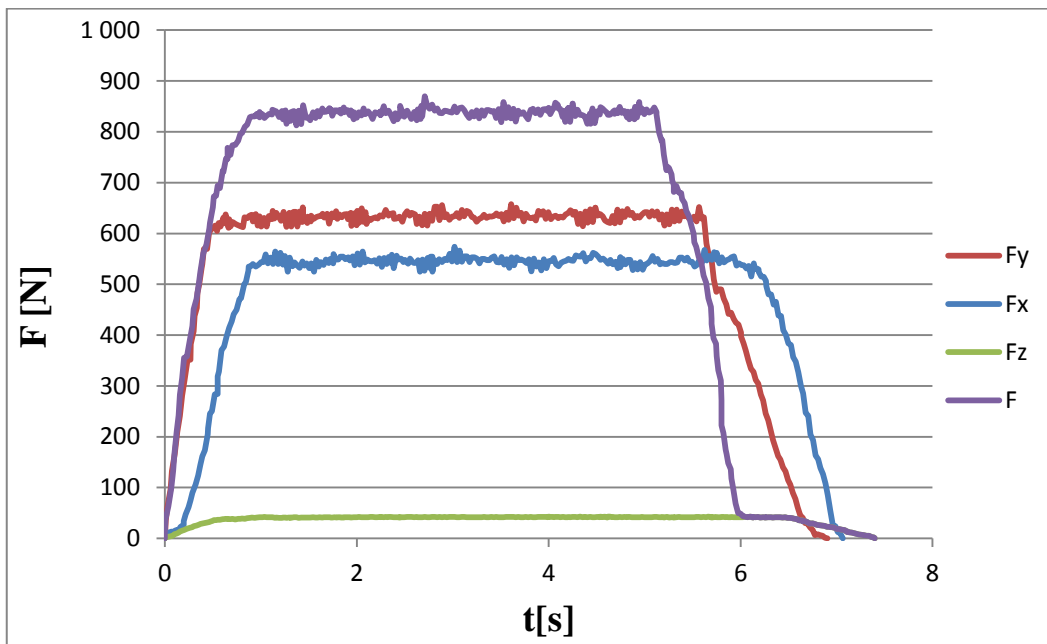
## PŘÍLOHA 2



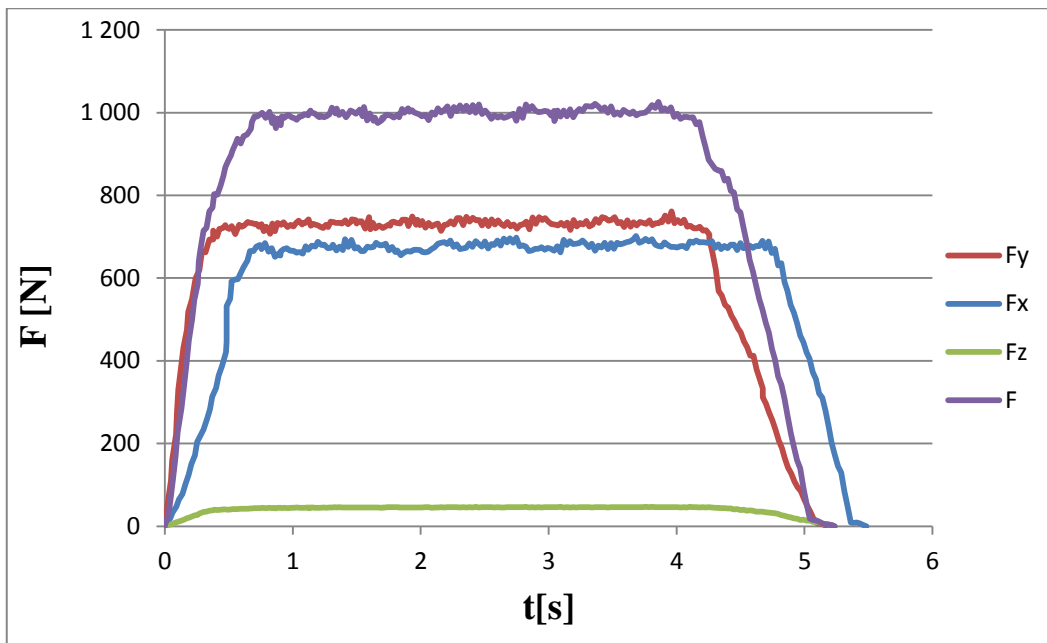
Časový průběh oceli C45 pro posuv  $f_z = 0,71$ ; 1. průjezd.



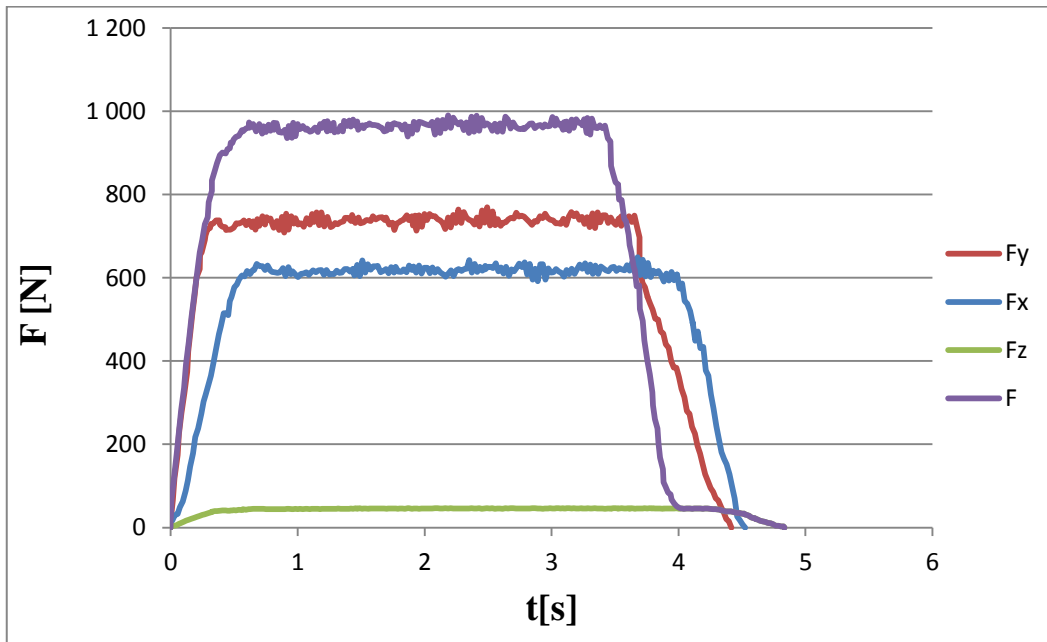
Časový průběh oceli C45 pro posuv  $f_z = 0,71$ ; 2. průjezd.



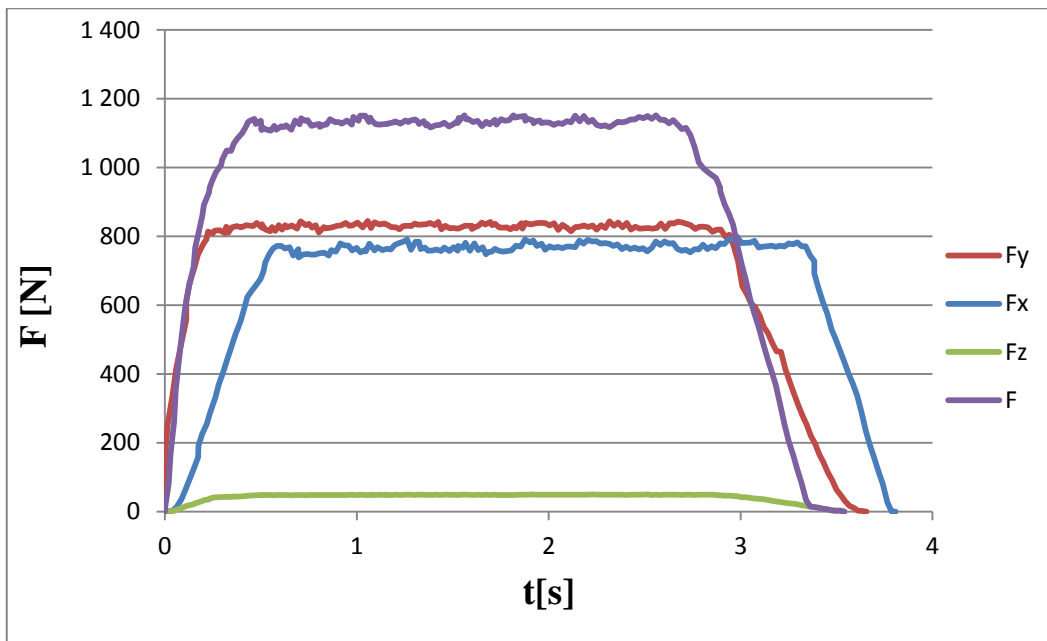
Časový průběh oceli C45 pro posuv  $f_z = 0,9$ ; 2. průjezd.



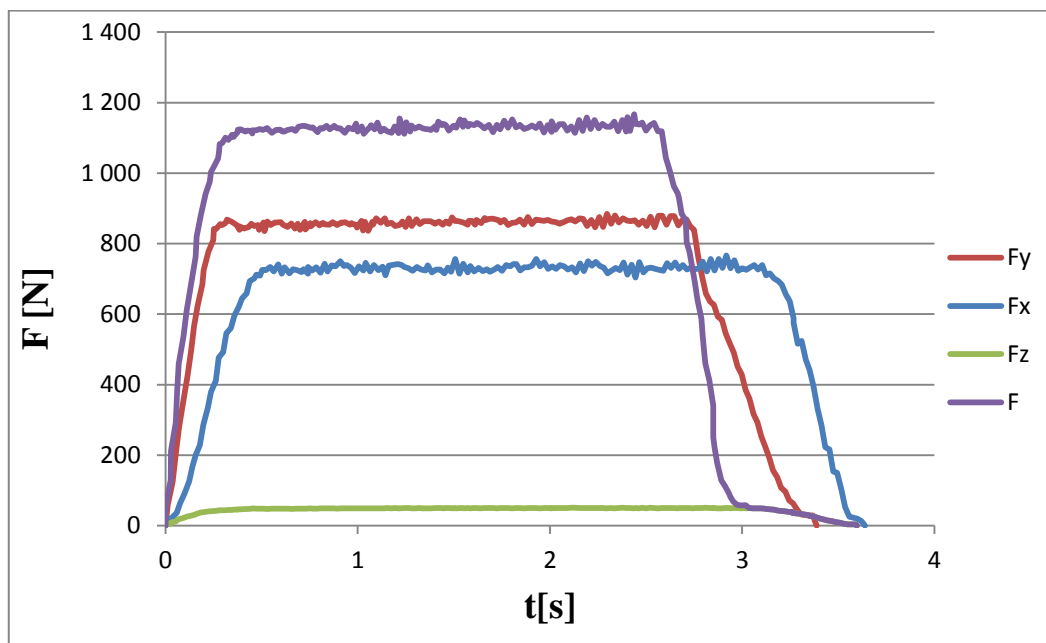
Časový průběh oceli C45 pro posuv  $f_z = 1,14$ ; 1. průjezd.



Časový průběh oceli C45 pro posuv  $f_z = 1,14$ ; 2. průjezd.



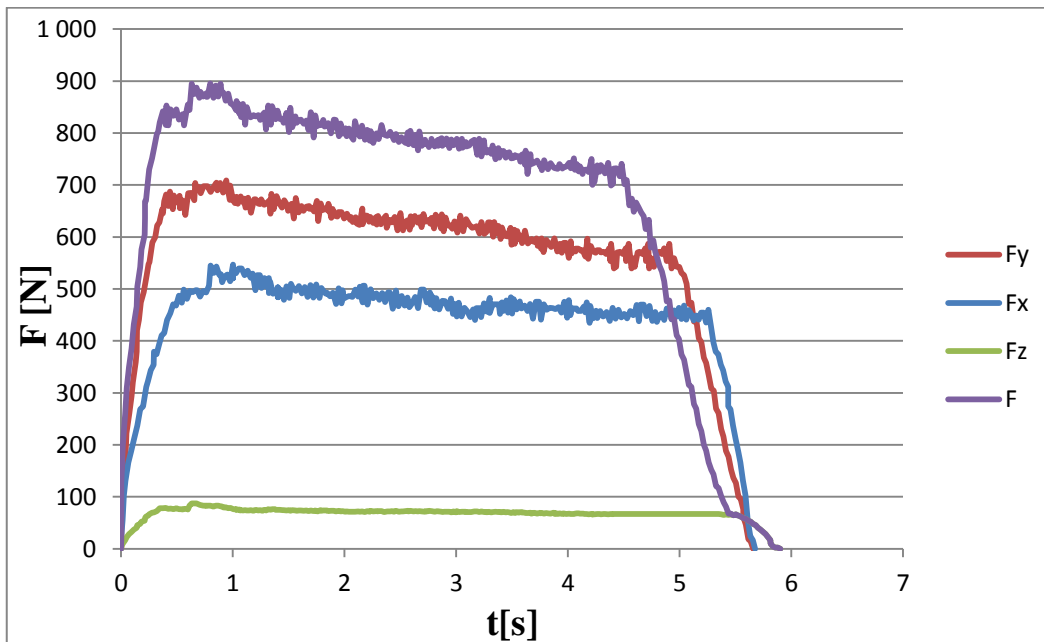
Časový průběh oceli C45 pro posuv  $f_z = 1,43$ ; 1. průjezd.



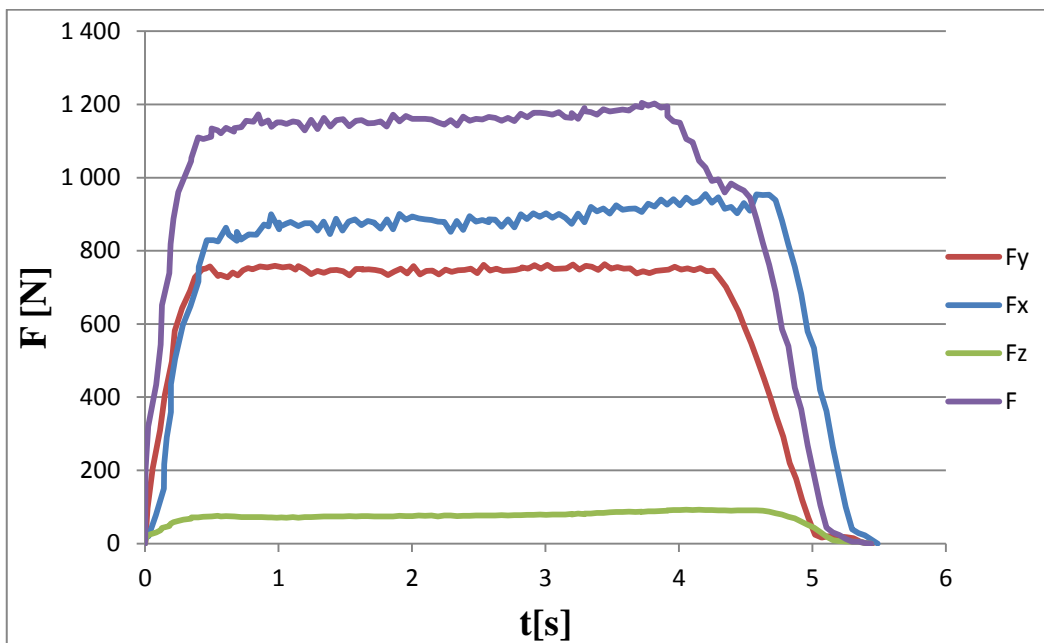
Časový průběh oceli C45 pro posuv  $f_z = 1,43$ ; 2. průjezd.



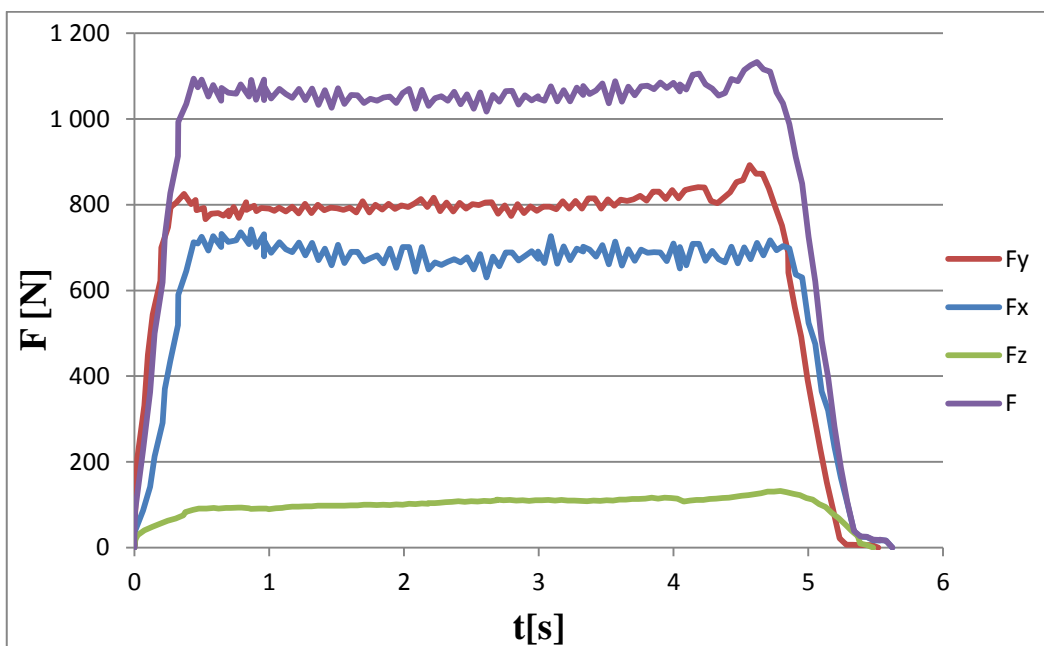
### PŘÍLOHA 3



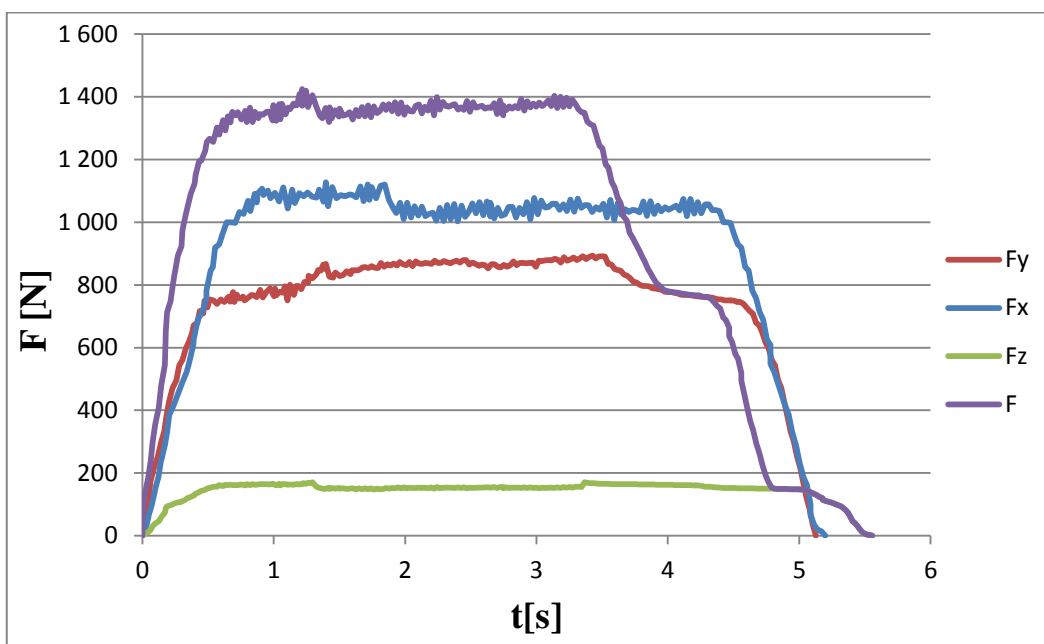
Časový průběh titanové slitiny Ti6Al4V pro posuv  $f_z = 0,22$ ; 1. průjezd.



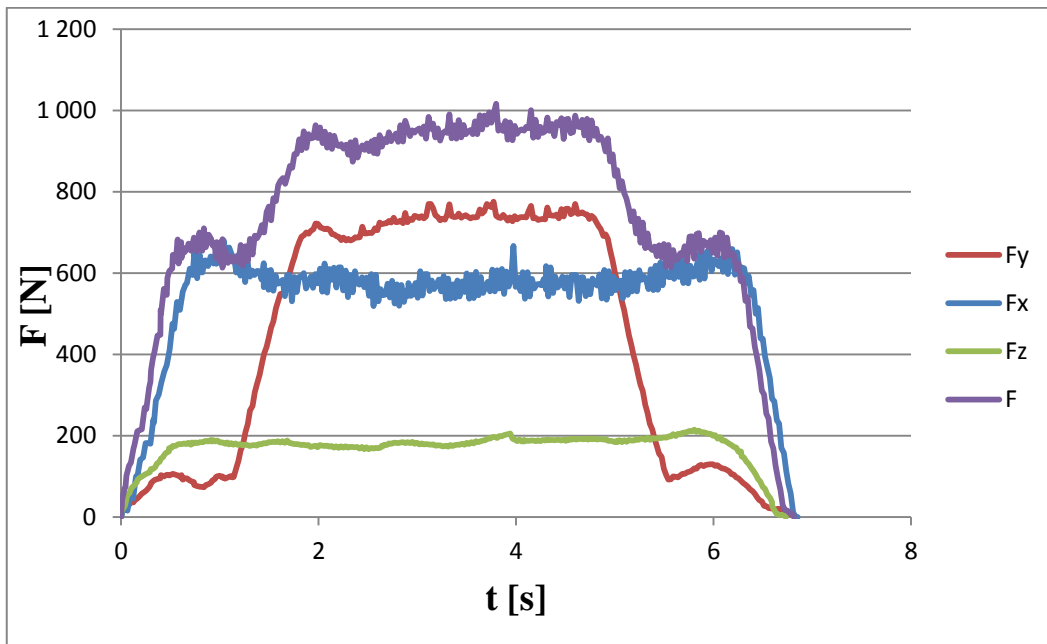
Časový průběh titanové slitiny Ti6Al4V pro posuv  $f_z = 0,55$ ; 1. průjezd.



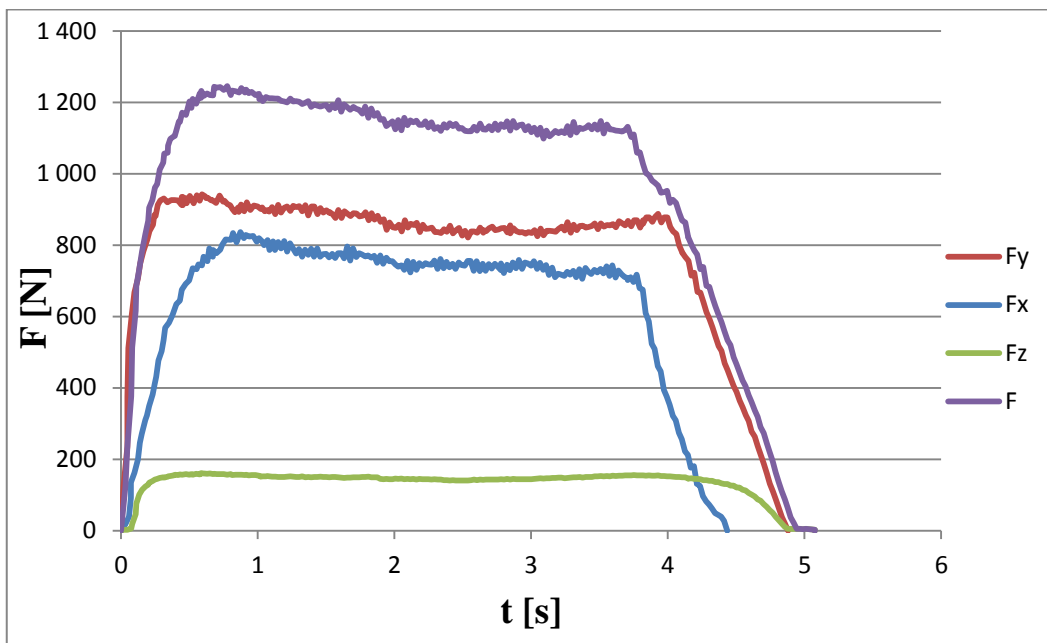
Časový průběh titanové slitiny Ti6Al4V pro posuv  $f_z = 0,55$ ; 2. průjezd.



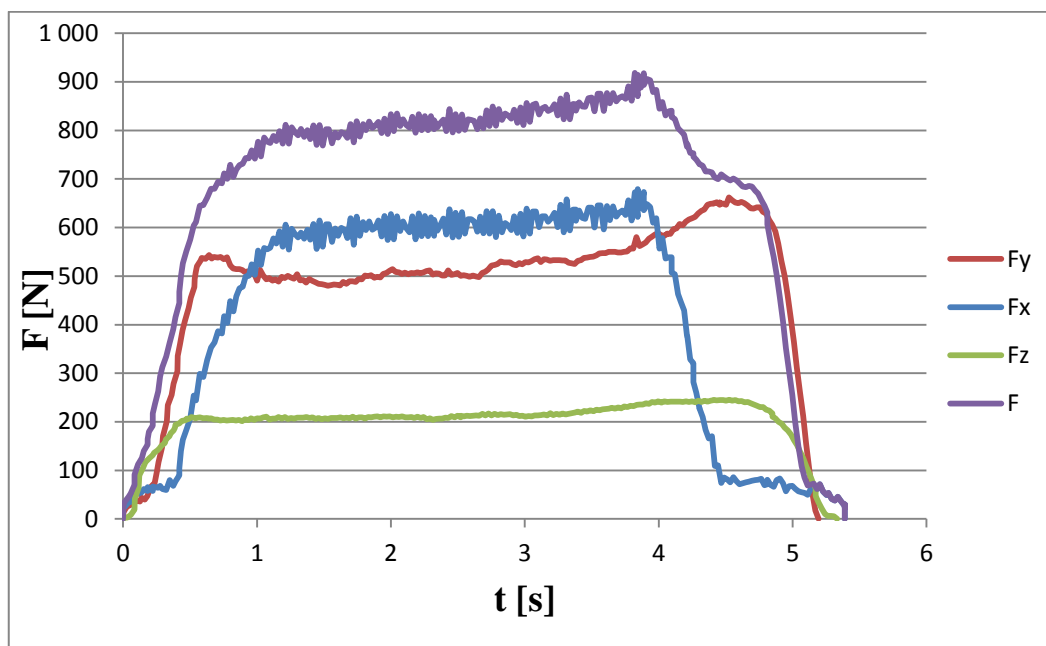
Časový průběh titanové slitiny Ti6Al4V pro posuv  $f_z = 0,88$ ; 1. průjezd.



Časový průběh titanové slitiny Ti6Al4V pro posuv  $f_z = 0,88$ ; 2. průjezd.

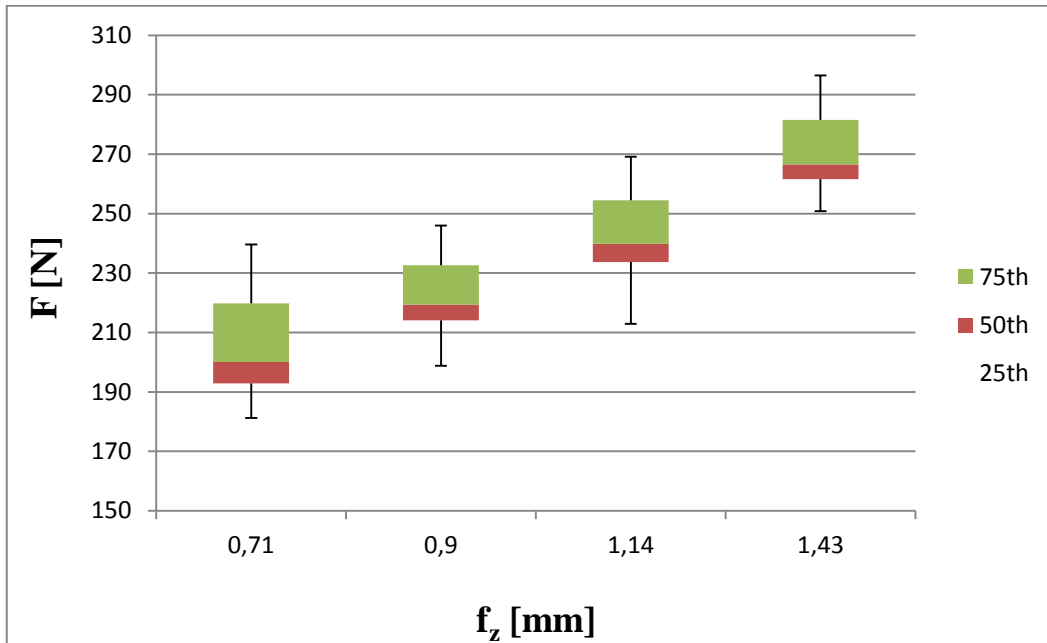


Časový průběh titanové slitiny Ti6Al4V pro posuv  $f_z = 1,11$ ; 1. průjezd.

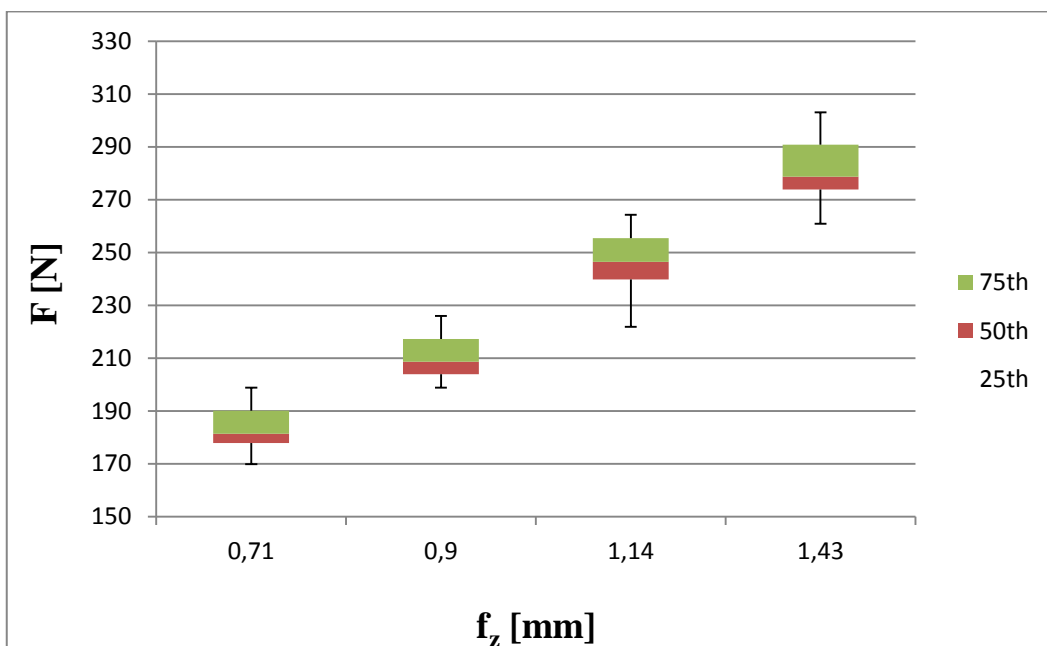


Časový průběh titanové slitiny Ti6Al4V pro posuv  $f_z = 1,11$ ; 2. průjezd.

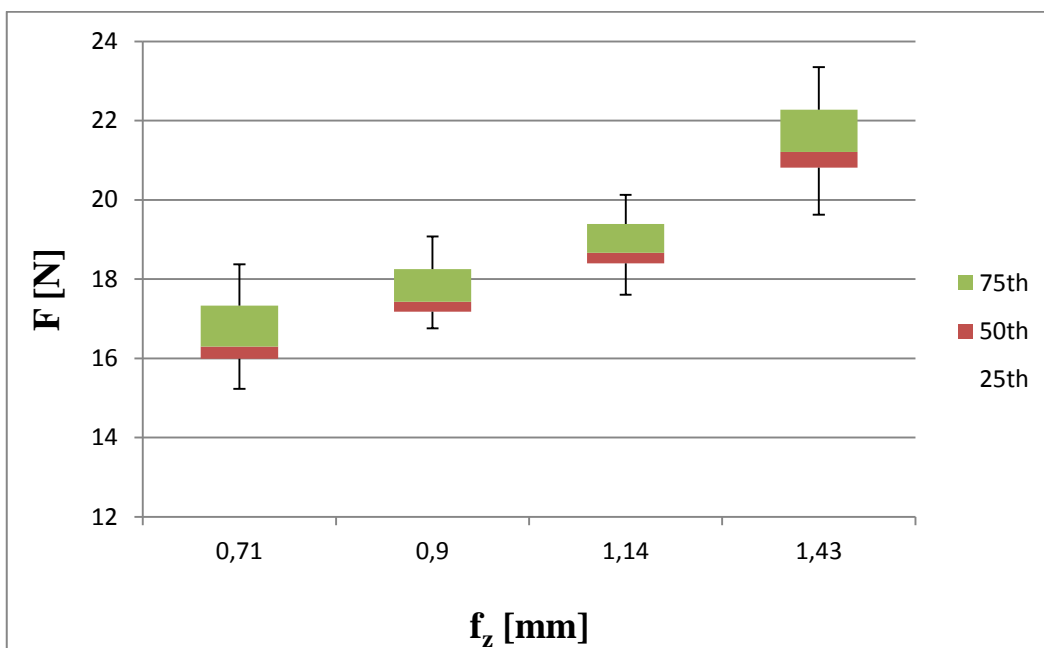
## PŘÍLOHA 4



Trend změny síly  $F_x$  v závislosti na posuvu  $f_z$  u oceli AlSi9Cu3.

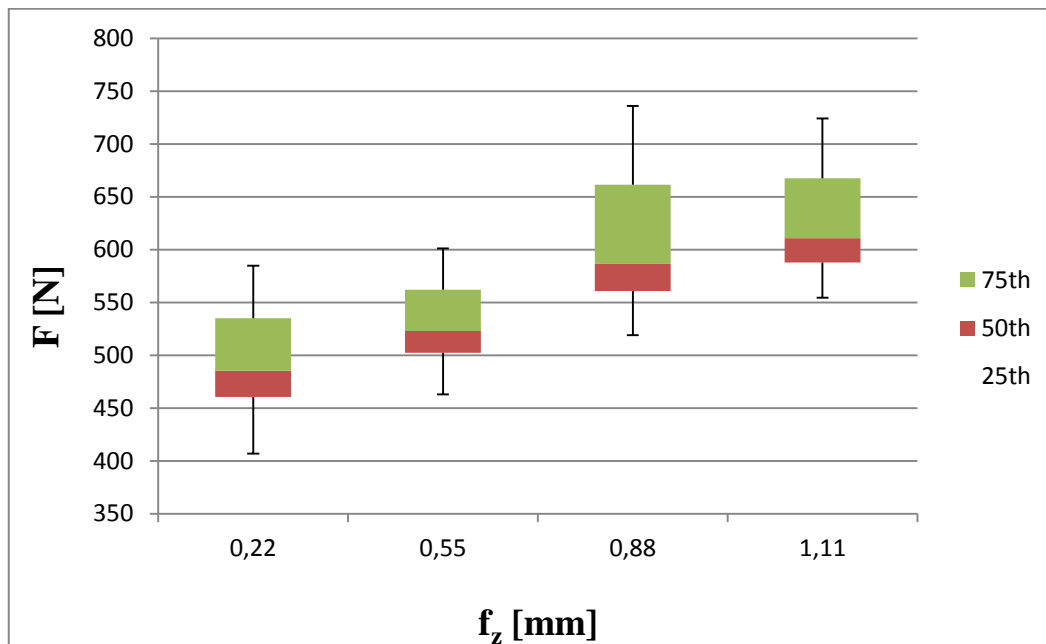


Trend změny síly  $F_y$  v závislosti na posuvu  $f_z$  u oceli AlSi9Cu3.

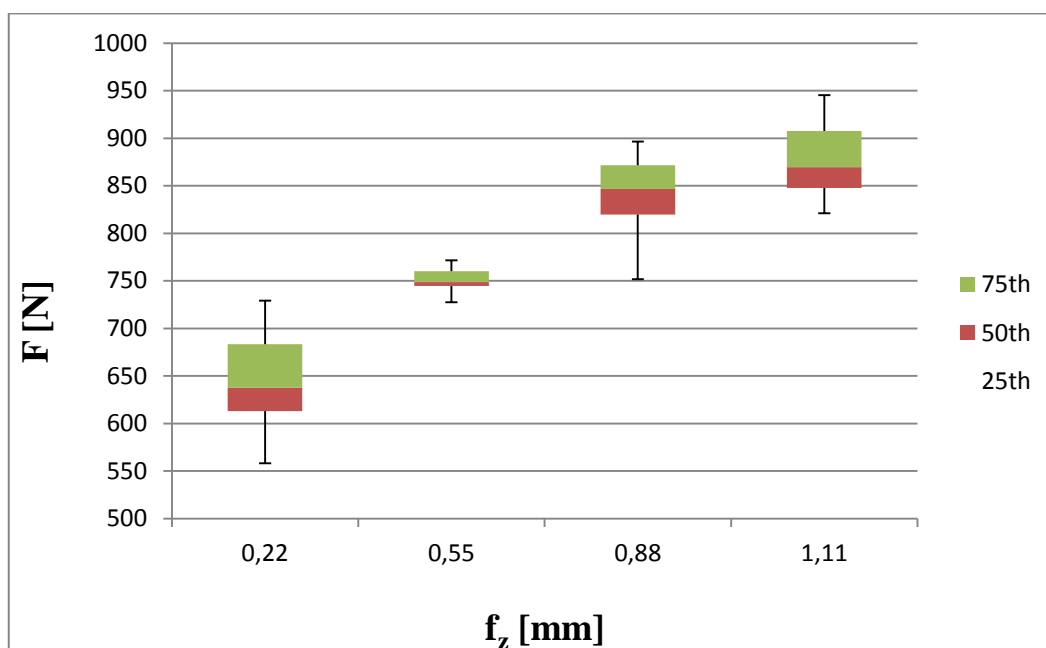


Trend změny síly  $F_z$  v závislosti na posuvu  $f_z$  u oceli AISi9Cu3.

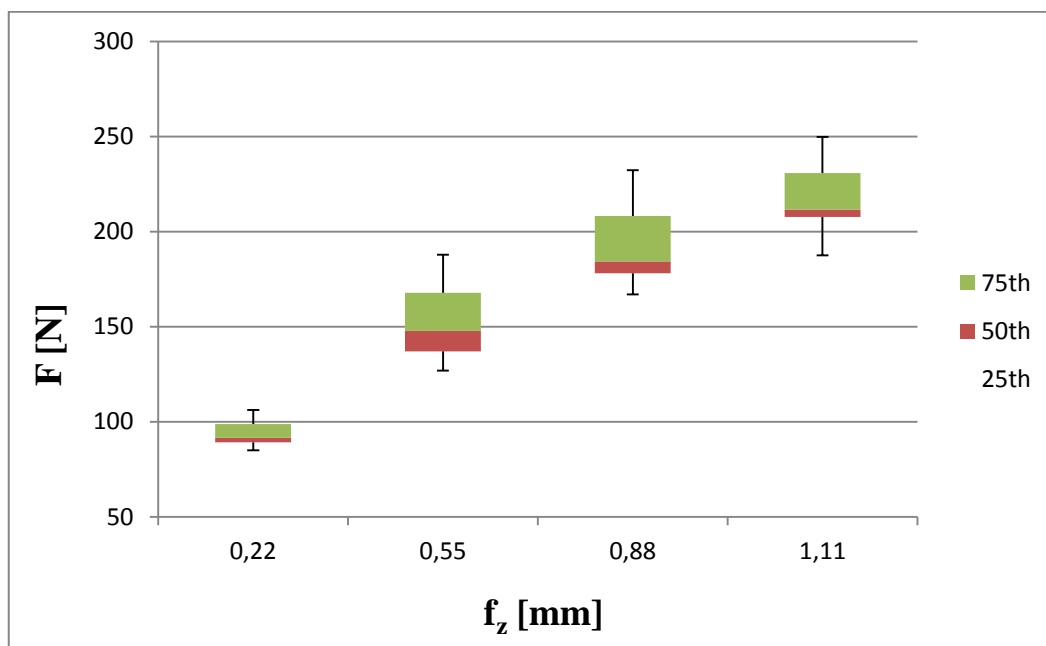
## PŘÍLOHA 5



Trend změny síly  $F_x$  v závislosti na posuvu  $f_z$  u oceli Ti6Al4V.



Trend změny síly  $F_y$  v závislosti na posuvu  $f_z$  u oceli Ti6Al4V.



Trend změny síly  $F_z$  v závislosti na posuvu  $f_z$  u oceli Ti6Al4V.