



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## OBRÁBĚNÍ TITANOVÝCH A TĚŽKO O B R O B I T E L N Ý C H SLITIN FRÉZOVÁNÍM

MACHINING OF TITANIUM ALLOYS AND DIFFICULT-TO-MACHINE ALLOYS WITH MILLING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Matail

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2021

# Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Petr Matail**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**  
Akademický rok: 2020/21

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 bakalářské práce:

## Obrábění titanových a těžkoobrobitelných slitin frézováním

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá obráběním titanových a těžkoobrobitelných slitin frézováním s moderními řeznými materiály. Sledovanými parametry budou síly při obrábění, opotřebení nástroje a kvalita obrobeného povrchu.

### Cíle bakalářské práce:

Rešerše.  
Teoretický rozbor problému.  
Návrh experimentálních zkoušek.  
Realizace experimentů, jejich statistické vyhodnocení.

### Seznam doporučené literatury:

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.  
KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. ISBN 80-214-3068-0.  
FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.  
Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Přel. M. Kudela. Praha. Scientia, s. r. o. 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook.

PÍŠKA, M., POLZER, A. Wear of coated solid carbide end mills when machining of hardened steels in dry conditions. In: Proceedings of the 3rd International Tools Conference, ITC 2003. UTB Zlín, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, 21.-22.5.2003. ISBN 80-7318-135-56.

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005. pp. 651. ISBN 0-1-514206-3.

BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 1.vyd., Slovensko, Trenčin, s. 112. ISBN 80-8075-013-0.

BARÁNEK, I., ŠANDORA, J. Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. TnUAD, Trenčín, 2004 s. 212. ISBN 80-8075-013-0.

MARINESCU, I. D. et al. Tribology of abrasive machining processes. 1st ed. William Andrew, Norwich, 2004, pp. 724, ISBN 0-8155-1490-5.

LEYENS, Ch., PETERS, M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. 2nd ed., Willet-VCH, Koln, 2005. p. 513. ISBN 3-527-30534-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou obrábění těžkoobrobitelných slitin frézováním. Teoretická část je věnována rozboru jednak použití, složení a vlastností těchto slitin a potížím a doporučením při obrábění. V praktické části bylo provedeno frézování slitiny Ti6Al4V–ELI tvarovou frézou a vyhodnocení sil při obrábění v závislosti na úhlu sklonu frézy.

### Klíčová slova

těžkoobrobitelné slitiny, titanové slitiny, Ti6Al4V–ELI, frézování, síly při obrábění

## ABSTRACT

This thesis deals with issue of machining difficult-to-machine alloys with milling. The theoretical part is devoted to the analysis of application, composition and mechanical properties of these alloys and difficulties and recommendations during machining. In the practical part the milling of Ti6Al4V–ELI alloy was realized by profile cutter. Machining forces were evaluated in relation with angle of cutter tilt.

### Key words

difficult-to-machine alloys, titanium alloys, Ti6Al4V–ELI, milling, machining forces

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MATAIL, Petr. *Obrábění titanových a těžkoobrobitelných slitin frézováním* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129595>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Obrábění titanových a těžkoobrobitelných slitin frézováním** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Petr Matail

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu prof. Ing. Miroslavu Piškovi, CSc za umožnění realizace experimentu, vstřícné jednání, cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

## OBSAH

Abstrakt .....	1
Prohlášení .....	5
Poděkování .....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 Superslitiny .....	10
1.1 Titan a jeho slitiny.....	10
1.2 Niklové superslitiny.....	11
1.3 Kobaltové superslitiny .....	12
1.4 Korozivzdorné oceli .....	13
2 Obrobitelnost.....	14
2.1 Titan a jeho slitiny.....	14
2.2 Niklové superslitiny.....	15
2.3 Kobaltové slitiny .....	15
2.4 Korozivzdorné oceli .....	15
3 Frézování.....	17
3.1 Válcové frézování.....	17
3.2 Čelní frézování .....	18
4 Praktická část.....	21
4.1 Obrobek .....	21
4.2 Nástroj.....	22
4.3 Obráběcí stroj.....	22
4.4 Obrábění .....	23
4.5 Průřez třísky .....	26
4.6 Měření .....	29
5 Grafy naměřených hodnot.....	31
6 Grafy přepočítaných hodnot.....	36
7 Vyhodnocení experimentu .....	41
7.1 Vyhodnocení sil.....	41
7.2 Vyhodnocení opotřebení nástroje .....	43
7.3 Vyhodnocení drsnosti obrobeného povrchu .....	45
8 Návrhy dalších experimentů.....	46
8.1 Změna frekvence měření .....	46
8.2 Měření krouticího momentu nástroje .....	46
8.3 Zjištění opotřebení nástroje .....	46
Závěr .....	47

---

Seznam použité literatury .....	48
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	49



---

## ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá obráběním těžkoobrobitelných materiálů zejména titanu a jeho slitin, obráběním ostatních těžkoobrobitelných materiálů se zabývá pouze teoreticky. Použití titanu jako konstrukčního materiálu je dnes velice rozšířené a je možné předpokládat, že jeho podíl v tomto směru ještě vzroste. K obrábění kovu mám bližší vztah, protože můj dědeček pracoval mnoho let na přesné vrtačce a můj otec je vyučený zámečnický obráběcí mistr a obrábění kovů je část jeho práce v zaměstnání. I když je snaha třískové obrábění nahradit jinými výrobními způsoby, jsou oblasti výroby, kde má třískové obrábění stále své místo. V třískovém obrábění probíhá vývoj strojů pro zvýšení výkonu a přesnosti, vývoj nástrojů pro zvýšení trvanlivosti a hledají se vhodné způsoby a postupy.

Vlastní náplní této práce je zpracování provedeného experimentálního měření a vyhodnocení naměřených sil. Obrábění bylo provedeno na sériové frézce FB32V, vybavené dynamometrem pro měření sil ve směrech posuvu stolu. Jako nástroj byla použita stopková radiusová fréza s průměrem 20 mm. Nástroj byl při obrábění nastaven na 4 různé úhly sklonu. Naměřené hodnoty byly vykresleny do grafů a vzájemně porovnány při různých sklonech nástroje. Součástí práce jsou i návrhy upravující podmínky měření pro dosažení dalších výsledků.

## 1 SUPERSLITINY

Superslitiny jsou vysoce žárupevné slitiny s komplexním složením. V posledních letech získávají stále více na významu. V 90. letech byl podíl superlegovaných materiálů o něco méně než 1 %, zatímco v dalším desetiletí mezi 2 a 3 %. Patří mezi ně niklové, kobaltové, titanové a železné slitiny. Tyto slitiny najdeme pod názvy hastelloy, inconel, incoloy, nimonic, waspaloy atd. Díky svým vlastnostem jsou využívány v oborech výroby hnacích ústrojí v energetice, turbínových motorů, letectví, kosmonautice a medicíně. Jejich skvělé vlastnosti během provozu ale mají za následek obtížnou výrobu hlavně při obrábění, proto je řadíme mezi těžkoobrobitelné slitiny, projevuje se to zejména na trvanlivosti nástroje. Zatímco při obrábění běžných ocelí vydrží 42CrMo4 okolo 45 min, u superlegovaných ocelí vydrží 7–10 minut při stejných podmínkách [1; 2].

### 1.1 Titan a jeho slitiny

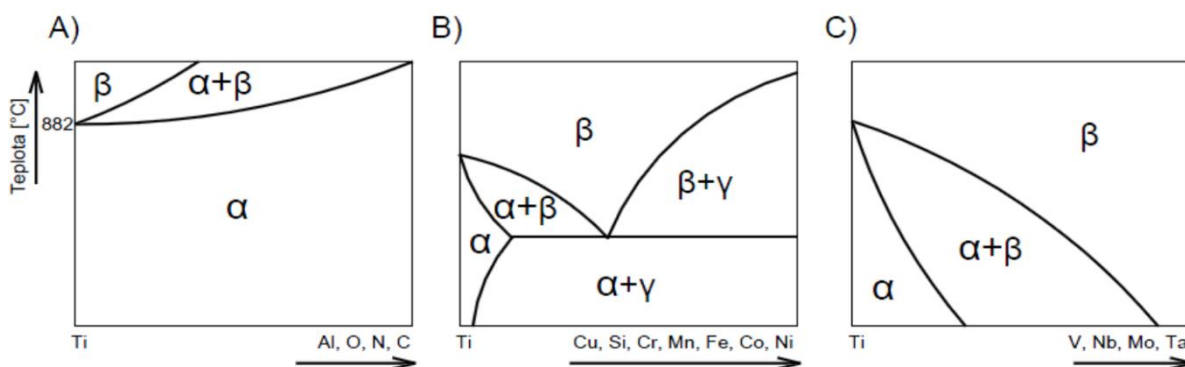
Titan a jeho slitiny vynikají díky jejich vysoké pevnosti, odolnosti vůči korozi a poloviční hmotnosti oproti ocelím a niklovým superslitinám. Navíc jsou použitelné ve vysokých i nízkých teplotách. Díky těmto vlastnostem byly zpočátku využívány v letectví a chemickém průmyslu. Nyní narůstá jeho použití ve stavebnictví, medicíně, energetice, lodní dopravě, sportu, volnočasových aktivitách a dopravě [3; 4].

Titan je neželezný polymorfní kov, který má 2 alotropické modifikace závislé na teplotě a přísadách. Ti  $\alpha$  má hexagonální mřížku a je stabilní do  $882 \pm 2$  °C a Ti  $\beta$  má mřížku BCC stabilní nad tuto teplotu do teploty tání ( $1668 \pm 4$  °C).

Jeho vlastnosti se z velké části odvíjejí od přísadových prvků, které se dělí na 3 základní skupiny:

**$\alpha$  – stabilizátory** (Al, O, N, C), které zvyšují teplotu fázové přeměny  $\alpha \leftrightarrow \beta$ , tedy stabilizují fázi  $\alpha$ , viz obr. 1.1A. Praktický význam má pouze hliník, který se používá téměř ve všech průmyslově vyráběných slitinách titanu. Nekovy (O, N, C) jsou nečistoty, jejichž množství se snažíme co nejvíce snížit, protože i malé množství výrazně zvyšuje tvrdost a křehkost.

**$\beta$  – stabilizátory** naopak snižují teplotu fázové přeměny  $\alpha \leftrightarrow \beta$ , čímž stabilizují tuhý roztok  $\beta$ . Při dostatečném množství (V, Nb, Mo, Ta) se tuhý roztok  $\beta$  zachová do normální teploty jako stabilní fáze, viz obr. 1.1C. Naopak s prvky (Cu, Si, Cr, Mn, Fe, Co, Ni) se tuhý roztok  $\beta$  rozpadá eutektoidní přeměnou při nízké teplotě, viz obr. 1.1B.



Obr. 1.1 Vliv přísadových prvků a nečistot na polymorfni přeměnu slitin titanu [2; 4].

**neutrální prvky** (Sn, Zr) nemají na teplotu fázové přeměny  $\alpha \leftrightarrow \beta$  vliv.

Podle konečné teploty se dělí slitiny titanu na:

**-slitiny  $\alpha$**  – Hlavním stabilizátorem je hliník, mimo hliník obvykle obsahují neutrálně působící Sn a Zr. Mají velkou tepelnou stabilitu, dobrou pevnost a odolnost vůči křehkému lomu i za nízkých teplot. Jsou tepelně stabilní a žárupevné do 300 °C. Optimální vlastnosti mají s 5 hmot. % Al a 2–3 hmot. % Sn.

**-slitiny pseudo  $\alpha$**  – Kromě hliníku jsou přidány stabilizátory fáze  $\beta$  a jsou zpevňovány neutrálními prvky Zr a Sn. Obsah fáze  $\beta$  je mezi 2 a 6 %. Mají o 10 až 20% větší pevnost než slitiny  $\alpha$  a zároveň lepší tvařitelnost za pokojových teplot díky fázi  $\beta$ , která má větší plasticitu než  $\alpha$ .

**-slitiny  $\alpha + \beta$**  – Mají mnoho různých vlastností a struktur závislých na tváření a tepelném zpracování. Patří mezi ně nejčastěji používané slitiny např. Ti-6Al4-V. Vyznačují se lepší tvařitelností v žíhaném stavu než slitiny  $\alpha$  a pseudo  $\alpha$ , lepší odolností vůči únavě a jsou vytvrditelné čímž se jim sníží lomová houževnatost. Oproti slitinám  $\alpha$  a pseudo  $\alpha$  mají menší odolnost vůči tečení a jsou hůře svařitelné. Používají se pro silově zatížené součásti nejčastěji v energetickém a leteckém průmyslu.

**-slitiny pseudo  $\beta$  a  $\beta$**  – Jsou odolné vůči korozi a dobře tvařitelné za pokojových teplot díky BCC mřížce, ale nevýhodou je velká hmotnost a vysoká cena díky přísadovým prvkům s velkou hmotností, vysokou teplotou tání a obtížnou výrobou. Dosahují pevnost až 1400 MPa [4].

## 1.2 Niklové superslitiny

Nikl je drahý feromagnetický kov. Asi 60 % vyráběného niklu se využije do slitinových ocelí, 15 % na různé polotovary a 25 % na niklové slitiny. Jeho slitiny mají vysoký elektrický odpor, vysokou odolnost vůči korozi a opalu, velkou pevnost, žárupevnost a houževnatost. Dle použití se rozdělují na konstrukční, slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi a slitiny žáruvzdorné a žárupevné [4].

**Konstrukční slitiny niklu** se dělí na:

Slitiny Ni-Cu zvané monely, které jsou vysoce odolné vůči korozi. Nachází využití v potravinářském, chemickém a farmaceutickém průmyslu nebo jako součásti čerpadel a lopatky turbín. Mohou být komplexně legované (přísadami Si, Mn, Fe) a dosahovat pevnosti 500–1200 MPa, nebo mohou být vytvrditelné s hliníkem a dosahovat pevnosti až 1400 MPa. Rozdíl mezi slévárenskými monely a tvářenými spočívá v obsahu křemíku a to o 3 až 4 %.

Slitiny Ni-Be obsahují do 2 % berylium a mohou dosahovat po vytvrzení pevnosti až 1800 MPa i s dobrou houževnatostí. Používají se v teplotách do 500 °C jako pružiny, membrány nebo trysky.

Slitiny Ni-Mn případně s přísadami Si a Cr odolávají výborně korozi za vyšších teplot i v prostředí obsahující sírné sloučeniny. Jejich hlavní použití je jako elektrody zapalovacích svíček.

Slitiny Ni-Mo se používají pro odlitky vystavené kyselině solné a chloridům [4].

**Slitiny niklu se zvláštními fyzikálními vlastnostmi** lze rozdělit na:

Termočlánkové slitiny jsou slitiny niklu a chromu (Cr 9–12 %) a jsou často nazývané jako chromel, který spolu s niklovou slitinou aludel (1,5 % Si, 2 % Mn, 2,2 % Al, zbytek Ni) tvoří termočlánky pro teploty 300 až 1000 °C

Odporové slitiny Ni-Cr (Cr okolo 20 %) se nazývají nichrom, chromnikl a pyrochrom se využívají jako topné odpory do 1150 °C. Přidáním železa do 25 % se sníží maximální použitelná teplota na 1000 °C, ale zlepší se odolnost vůči síře a ušetří na niklu.

Magneticky měkké slitiny zvané permaloy obsahují až 64 % železa, nebo při menším obsahu železa taky Mo, Cu, Cr a Si. Používají se jako jádra transformátorů u měřících zařízení. Jsou značně drahé kvůli náročné výrobě a potřebě čistých komponentů pro velké magnetické vlastnosti [4].

**Žáruvzdorné a žárupevné slitiny niklu** jsou drahé materiály používané jako teplotně a napětově nejvíce namáhané součásti. Jsou tavitelné a odlévatelné pouze vakuově. Tvářeni a obrábění jsou též nákladná. Dělí se na žáruvzdorné a žárupevné slitiny:

Žáruvzdorné slitiny jsou obvykle Ni-Cr nebo Ni-Cr-Fe. Základní přísadou je chrom (10–30 %) kvůli žáruvzdornosti. Úsporná ternární fáze obsahuje až 20 % železa. Tyto slitiny bývají také nazývány nichromy a jsou tvořeny FCC krystalickou mřížkou zpevněnou pouze substitučně. Proto hrozí za vyšších teplot nebezpečí creepu. Obsah nečistot bývá minimální.

Žárupevné slitiny jsou opět na bázi tuhého roztoku Ni-Cr. Jako přísadu se zde používají hliník a titan, které tvoří hlavní vytvrzující fázi, dále potom karbidotvorné prvky, které substitučně zpevňují niklovou matici a vytváří karbidy. Při rozpouštěcím ohřevu přecházejí do tuhého roztoku. Ochlazením lze dosáhnout metastabilního tuhého roztoku, který při stárnutí vylučuje precipitáty intermetalických sloučenin. Titan a hliník tvoří sloučeniny  $Ni_3Ti$  a  $Ni_3Al$  v případě, že jsou samostatně, dohromady tvoří sloučeninu  $Ni_3(Ti,Al)$ , která se chová jako tuhý roztok titanu v  $Ni_3Al$ , lze ho označit jako fázi  $\gamma$ , jejíž přítomností je podmíněna vysoká žárupevnost, pokud je rovnoměrně rozdělena ve formě jemných precipitátů. S podílem fáze  $\gamma$  pochopitelně žárupevnost roste, současně se však výrazně zhoršuje tvařitelnost, a to až natolik, že slitiny legované Ti a Al vykazují některé keramické vlastnosti a jediná možnost výroby je přesné lití. Při vhodném tepelném zpracování lze dosáhnout vytvoření karbidů podél hranic zrn, které zabraňují skluzům. Kovovou složku karbidů tvoří nejčastěji chrom a molybden.

Niklové součásti v plynových turbínách jsou vystavovány teplotám až 80 % teploty začátku tavení. Nejlepší slitiny mohou být vystaveny napětí za teplot do 950 °C (žárupevné slitiny). Bez napětí vydrží teploty až 1150 °C (žáruvzdorné slitiny). Niklové slitiny se nepoužívají pod 550 °C z důvodu vysoké ceny a možnosti levnějších variant. Žáruvzdorné slitiny se používají nejčastěji na plech a žárupevné na přesné výkovky a odlitky [4; 5].

### 1.3 Kobaltové superslitiny

Kobalt je drahý, feromagnetický, polymorfní kov. Tvoří 2 alotropické modifikace, modifikaci  $\alpha$  s šesterečnou mřížkou pod teplotou 417 °C a modifikaci  $\beta$  s FCC mřížkou nad touto teplotou do teploty tání (1495 °C). Používá se jako pojivo při výrobě slinutých karbidů např. WC a TiC práškovou metalurgií. Je důležitým prvkem jako přísada

niklových superslitin. Kobaltové slitiny dělíme na žárovevné slitiny, slitiny s vysokou tvrdostí a slitiny pro tvrdé magnety [4].

Žárovevné slitiny kobaltu představují asi 50 % objemu vyráběných slitin kobaltu. Jejich základ tvoří žáruvzdorný tuhý roztok Co-Cr-Mo-Ni. Zde neprobíhá precipitační vytvrzování titanem a hliníkem a díky tomu není potřeba požití vakuové lití jakou u niklových a titanových slitin. Kobaltové slitiny jsou zpevňovány pouze substitučním zpevněním matrice rozpuštěnými prvky a disperzním zpevněním hrubými částicemi karbidů. Za středních teplot mají proto kobaltové slitiny nižší žárovevnost než niklové slitiny, a to až do teploty 800 °C. Nad tuto teplotu u niklových slitin probíhá odpevňování v důsledku rozpouštění vytvrzující fáze  $\gamma$ , tudíž jsou jejich vlastnosti srovnatelné. Jsou dobře slévateľné ale celkově obtížněji zpracovatelné. Tváření obvykle vyžaduje mezižhání, obrábění je obtížné a svařování možné jen za zvláštních podmínek. Používají se místo niklu, je-li přítomna síra nebo v mořské vodě, např. lopatky plynových turbín nebo raketové motory v kosmu [4].

Slitiny s vysokou tvrdostí (stelity – Co-Cr-V) vynikají značnou tvrdostí a odolností vůči opotřebením za vysokých teplot. Nelze je tvářet, jenom odlévat a navařovat. Navařují se na funkční plochy součástí vystavené kavitaci a různým druhům opotřebením i za vysokých teplot jako např. sedla armatur nebo náběžné hrany lopatek parních turbín [4].

Slitiny pro tvrdé magnety jsou slitiny železa a kobaltu (60–65 % Fe). Kobalt se používá i v magneticky tvrdých slitinách Cu-Ni-Co (Co–30 %), které mohou být tvářeny i za studena [4].

## 1.4 Korozivzdorné oceli

**Nerezavějící oceli** jsou odolné vůči elektrochemické korozi díky pasivaci, pro kterou je potřeba více než 11,5 % chromu v tuhé fázi. Pro obsah chromu je důležitý obsah uhlíku (méně než 0,1 %), s kterým tvoří karbidy, díky čemuž snižuje obsah chromu v tuhé fázi, což je způsobeno vyšší difúzní rychlostí uhlíku. Díky těmto karbidům se zvyšuje heterogenita roztoku a místa s nižším obsahem chromu mají nižší korozivzdornost. Karbidy chromu a uhlíku se vylučují na hranicích zrn a způsobují mezikrystalickou korozi, ta vzniká převážně v tepelně ovlivněných oblastech a dá se jí předejít snížením obsahu uhlíku nebo přidáním prvků s vyšší afinitou k uhlíku než chrom (Nb, Ta, Ti). Druhým nejdůležitějším prvkem po chromu je nikl. Struktura korozivzdorných ocelí úzce souvisí s obsahem těchto prvků. Chrom vyvábí ferit a chromové korozivzdorné oceli mají podobné vlastnosti jako čisté železo. Nikl má stabilizační účinky, podporuje kalitelnost a vytváří austenitickou strukturu. Dalšími legujícími prvky jsou molybden, dusík, měď, mangan, hliník a křemík. [4; 6]

**Žárovevné oceli** mají velkou odolnost vůči oxidaci, korozi, jsou většinou svařitelné, a navíc mají dlouhou dobu stálé vlastnosti v horkých plynech. Za odolnost vůči oxidaci za velkých teplot vděčí legujícím prvkům (Cr, Si, Al, Ni). Podle struktury je dělíme na feritické, feriticko-austenitické a austenitické. Feritické rozlišíme hlavně obsahem chromu, feriticko-austenitické obsahem chromu a niklu a austenitické také obsahem chromu a niklu [4].

## 2 OBROBITELNOST

Obrobitelnost je pojem, který se používá k hodnocení obrábění materiálu dle kritérií vztahující se k průběhu obrábění, ekonomickým výsledkům, kvalitě obrobeného povrchu atd. Obrobitelnost není obecně platná vlastnost, která by se dala jednoduše měřit a závisí na mnoha faktorech. Nejdůležitější z nich jsou:

- chemické složení obrábějícího a obráběného materiálu,
- mikrostruktura,
- kompatibilita materiálů,
- způsob výroby a tepelné zpracování,
- řezné podmínky,
- geometrie nástroje,
- řezné prostředí,
- metoda obrábění [7; 6; 8].

Asi nejjednodušší definice obrobitelnosti je míra schopnosti konkrétního materiálu být zpracován některou obráběcí metodou. Je velmi náročné použít nějakou veličinu a charakterizovat materiál její absolutní hodnotou. Nejvhodnějšími absolutními veličinami mohou být:

- objem odebraného materiálu  $V$  [ $\text{cm}^3$ ],
- velikost obrobené plochy  $A$  [ $\text{cm}^2$ ],
- řezná dráha  $L$  [m] [8].

Materiály lze rozdělit buď podle převládajícího prvku a tepelného zpracování (litiny, oceli, těžké neželezné kovy, lehké neželezné kovy atd.) nebo podle obrobitelnosti:

- lehce obrobitelné materiály (měděné a hliníkové slitiny),
- běžně zpracované oceli a lité kovy,
- těžkoobrobitelné materiály [7; 8].

Tato práce se zabývá pouze těžkoobrobitelnými materiály, tudíž je zde voleno rozdělení podle obrobitelnosti.

### 2.1 Titan a jeho slitiny

Při obrábění titanu je potřeba dodržovat podobná kritéria jako u ostatních kovů, a navíc je potřeba reagovat na unikátní fyzikální a chemické vlastnosti, které jsou:

- nízká tepelná vodivost, která vede k rychlejšímu opotřebení nástroje,
- nízký modul pružnosti, který zapříčiňuje sklony titanu k plastické deformaci během obrábění,
- nízká tvrdost a velká reaktivita za vysokých teplot způsobuje reakci titanu s řezným nástrojem [3; 6].

Proto existují vhodné podmínky pro bezproblémové obrábění:

- obrobek by měl být co nejkratší a pevně upnutý, aby nedocházelo k vibracím,



- nástroj by měl být ostrý a při známkách prvního opotřebení by se měl vyměnit, aby nedošlo k jeho zničení,
- je potřeba, aby obráběcí stroj a upínací soustava byly dostatečně tuhé,
- je potřeba použít dostatečné množství řezné kapaliny, aby byl obrobek dostatečně chlazen, což umožňuje rychlou disipaci tepla a zároveň zabraňuje vzniku požárů, mohou být použity vodou-ředitelné oleje nebo roztok dusitanu aminu v plynné fázi zabraňující korozi,
- řezná rychlost by měla být nízká a posuvová vysoká, posuv by neměl ustát, jestli jsou nástroj a obrobek v kontaktu, jinak může dojít k nalepování a následnému rychlému opotřebení nástroje,
- drsný povrch by měl být odstraněn otrýskáním nebo mořením 2 % kyselinou fluorovodíkovou nebo 20 % kyselinou dusičnou,
- měl by být použit břit s pozitivní geometrií a velkým úhlem hřbetu,
- frézování by mělo být sousledné [3; 7; 6].

Nejlépe se obrábějí slitiny typu  $\alpha$  a čistý titan, směrem k slitině  $\beta$  se obrábění zhoršuje. Požadavky na nástroje jsou: vysoká odolnost vůči abrazivnímu opotřebení, odolnost vůči plastické deformaci a difuznímu opotřebení, houževnatost, kombinace spolehlivosti ostří s jeho ostrostí. Těmto kritériím nejlépe vyhovují nepovlakované jemnozrné slinuté karbidy, vysokorychlostní nástroje z kobaltových slitin (levnější varianta) nebo stelity [3; 6].

## 2.2 Niklové superslitiny

Niklové slitiny v zásadě kladou vysoké nároky na obrábění, některé z nich patří k nejobtížněji obrobitelným řeznými nástroji vůbec. Hlavní důvody pro tak obtížné obrábění jsou vysoké řezné teploty hlavně na špičce nástroje, deformační zpevnění, velké řezné síly a rychlé opotřebení nástroje. Vhodné nástroje pro obrábění niklu jsou slinuté karbidy a keramika při dodržení správných podmínek, které jsou podobné jako u titanu:

- pevné upnutí obrobku
- dostatečně tuhý obráběcí stroj
- ostrý nástroj
- břit s pozitivní geometrií
- doporučuje se rozpouštěcí žihání pro snížení deformačního zpevnění [7; 6].

## 2.3 Kobaltové slitiny

Kobaltové slitiny kladou na obrábění podobné nároky jako niklové slitiny, ale jejich obrábění je jednodušší [7].

## 2.4 Korozivzdorné oceli

Obrobitelnost ocelí z velké části závisí na legujících prvcích. Asi největší vliv na obrobitelnost má nikl. Při malém množství do 2 % na obrobitelnost nemá vliv,

protože se neúčastní tvorby karbidů. Se zvyšujícím se množstvím niklu se obrobiteľnosť zhoršuje díky zvyšování houževnatosti. Asi nejhůře obrobiteľné jsou austenitické oceli, a to díky vysoké pevnosti, tvárnosti, houževnatosti a nízké mezi kluzu. Díky těmto vlastnostem dochází ke zpevňování, a to jak třísky, tak povrchové vrstvy obroběné plochy. Proto je dobré dodržovat následující doporučení:

- posuvová rychlost by měla být vysoká a řezná nízká,
- je třeba intenzivního chlazení řeznou kapalinou díky špatné vodivosti a velké tvárnosti,
- nástroj by měl být stále ostrý,
- doporučuje se austenitizační žíhání pro rozpuštění karbidů a zrovnoměrnění struktury [8].



### 3 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je metoda obrábění, při které převážně břity otáčejícího se nástroje odebírají materiál posouvajícího se obrobku. U modernějších frézovacích strojů jako např. obráběcí centra nebo víceosé CNC frézky se mohou posuvové pohyby plynule měnit a realizovat ve všech směrech. Řezný proces je přerušovaný a střídají se v něm jednotlivé zuby frézy, které odřezávají krátké třísky. Frézování lze z technologického hlediska rozdělit na 2 základní druhy: čelní a válcové. Z těchto druhů se odvíjí některé další způsoby frézování jako např. okružní nebo planetové [9].

Hlavní pohyb při frézování je rotační a koná ho fréza, je definován řeznou rychlostí  $v_c$ .

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m \cdot \min^{-1}] \quad (3.1)$$

kde:  $D$  [mm] průměr frézy  
 $n$  [ $\min^{-1}$ ] otáčky frézy.

Vedlejší pohyb, který závisí na druhu frézy, počtu zubů  $z$  a posuvu na zub  $f_z$ , koná obrobek a je definován posuvovou rychlostí  $v_f$ .

$$v_f = \frac{f_z \cdot n \cdot z}{1000} [m \cdot \min^{-1}] \quad (3.2)$$

kde:  $f_z$  [mm] hodnota posuvu na zub  
 $n$  [ $\min^{-1}$ ] otáčky frézy  
 $z$  [-] počet zubů frézy.

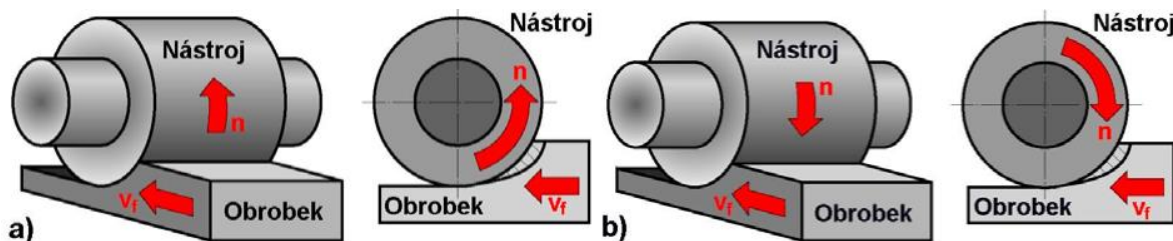
Jejich vektorový součet udává výsledný pohyb  $v_e$  ve skalárním vyjádření.

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} [m \cdot \min^{-1}] \quad (3.3)$$

kde:  $v_c$  [ $m \cdot \min^{-1}$ ] řezná rychlost  
 $v_f$  [ $m \cdot \min^{-1}$ ] posuvová rychlost [8; 9].

#### 3.1 Válcové frézování

Při válcovém frézování se používají válcové a tvarové frézy. Zuby se nacházejí po obvodu nástroje, hloubka odebírané vrstvy  $a_p$  se nastavuje kolmo na osu frézy a směr posuvu a obrobená plocha je rovnoběžná s osou frézy. Dle kinematiky obráběcího procesu dělíme válcové frézování na sousledné a nesousledné, viz obr. 3.1.



Obr. 3.1 Válcové frézování: a) nesousledné, b) sousledné [10].

Při sousledném frézování nástroj rotuje ve směru posuvu obrobku. Maximální tloušťka třísky je při vniku zubu do obrobku a obrobená plocha se vytvoří při vycházení zubu ze záběru. Řezné síly působí směrem do obrobku. Pro sousledné frézování je potřeba frézka, která umí vymezit vůli a předpětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu, jinak hrozí poškození nástroje nebo i stroje. Sousledné frézování potřebuje menší výkon, než nesousledné, méně se opotřebovávají břity, díky čemuž lze použít vyšší řezné a posuvové rychlosti. Řezná síla přitlačuje obrobek ke stolu, což snižuje požadavky na upnutí obrobku a obrobený povrch má zpravidla menší drsnost. Sousledné frézování má navíc menší sklony k vibracím a tvoření nárůstků.

Při nesousledném frézování nástroj rotuje proti směru posuvu. Tloušťka třísky postupně roste z nuly do maximální hodnoty, kdy tříška vychází z obrobku. Obrobená plocha vzniká při vcházení nástroje do obrobku. K oddělování třísky dochází až po určitém skluzu břitu po obrobené ploše, při kterém působí velké síly způsobující nežádoucí deformace a zvýšené opotřebení břitu. Řezná síla odtahuje obrobek od stolu. Výhodami jsou menší opotřebení šroubu a matice, není zapotřebí vymezování vůle mezi maticí stolu a posuvovým šroubem, trvanlivost nástroje nezávisí na povrchu obrobku a záběr zubů při vřezávání do obrobku nezávisí na hloubce řezu [8; 9].

Tloušťku třísky  $h_D$  lze spočítat jako

$$h_D = f_z \cdot \sin\varphi [\text{mm}] \quad (3.4)$$

kde:  $f_z$  [mm] hodnota posuvu na zub

$\varphi$  [°] úhel posuvového pohybu.

Maximální tloušťka třísky  $h_{Dmax}$

$$h_{Dmax} = 2 \cdot f_z \cdot \sqrt{\frac{a_p}{D}} [\text{mm}] \quad (3.5)$$

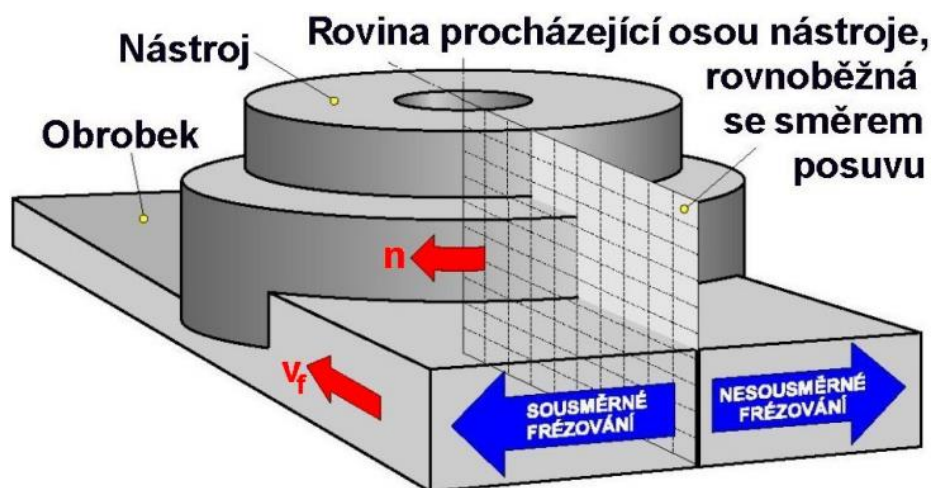
kde:  $a_p$  [mm] hloubka záběru

$D$  [mm] průměr frézy

$f_z$  [mm] hodnota posuvu na zub.

## 3.2 Čelní frézování

Při čelním frézování se používají čelní frézy, které mají břity na čele a obvodu. Podle poměru průměru frézy a šířky frézované plochy a také polohy osy frézy vzhledem k frézované ploše se rozlišuje symetrické a nesymetrické frézování. Obrobená plocha je kolmá na osu otáčení nástroje a šířka úběru  $a_p$  se nastavuje ve směru osy nástroje, viz obr. 3.2 [8; 9].



Obr. 3.2 Čelní frézování [10].

Jmenovitou tloušťku třísky  $h_D$  pro čelní frézování můžeme počítat následujícím vzorcem

$$h_D = f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi [\text{mm}] \quad (3.6)$$

kde:  $f_z$  [mm] hodnota posuvu na zub

$\kappa_r$  [°] úhel nastavení hlavního ostří

$\varphi$  [°] úhel posuvového pohybu.

Jmenovitá šířka třísky  $b_{Di}$

$$b_{Di} = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} [\text{mm}] \quad (3.7)$$

kde:  $a_p$  [mm] hloubka záběru

$\kappa_r$  [°] úhel nastavení hlavního ostří

Jmenovitý průřez třísky pro  $i$ -tý zub

$$A_{Di} = h_{Di} \cdot b_{Di} = f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi_i [\text{mm}^2] \quad (3.8)$$

kde:  $a_p$  [mm] hloubka záběru

$b_{Di}$  [mm] jmenovitá šířka třísky pro  $i$ -tý zub

$f_z$  [mm] hodnota posuvu na zub

$h_{Di}$  [mm] jmenovitá tloušťka třísky pro  $i$ -tý zub

$\varphi_i$  [°] úhel posuvového pohybu pro  $i$ -tý zub.

Síla, působící na  $i$ -tý zub  $F_{ci}$

$$F_{ci} = A_{Di} \cdot k_{ci} [\text{N}] \quad (3.9)$$

kde:  $A_{Di}$  [mm<sup>2</sup>] jmenovitý průřez třísky pro  $i$ -tý zub

$k_{ci}$  [MPa] měrná řezná síla.

---

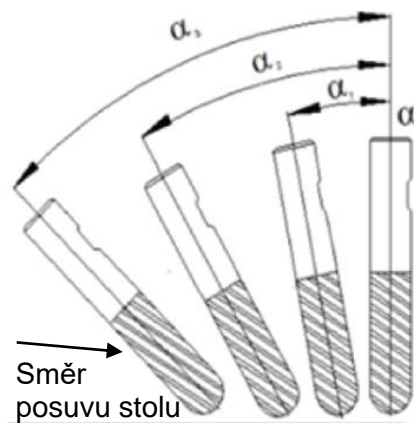
Celková řezná síla  $F_c$

$$F_c = \sum_{i=1}^z A_{Di} \cdot k_{ci} [\text{N}] \quad (3.10)$$

kde:  $A_{Di}$  [ $\text{mm}^2$ ] jmenovitý průřez třísky pro  $i$ -tý zub  
 $k_{ci}$  [MPa] měrná řezná síla [8].

## 4 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část je věnována obrábění slitiny Ti6Al4V-ELI, což je slitina se sníženým obsahem intersticiálních prvků, frézováním. Pokus byl proveden při 4 různých úhlech sklonu nástroje  $\alpha$ , viz obr. 4.1. Sledovanými parametry byly síly při obrábění, opotřebení nástroje a kvalita obrobeného povrchu. Pokus byl realizován bez použití řezné kapaliny.



Obr. 4.1 Úhly natočení frézy.

### 4.1 Obrobek

Jako obrobek byl použit materiál Ti6Al4V-ELI, vyrobený technologií Arcam EBM Q10 plus s chemickým složením, viz tabulka 4.1, má velmi malé množství nečistot a používá se pro kloubní náhrady v ortopedii. Jeho mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4.2. Ve srovnání se stejným materiálem vyrobeným pomocí tváření má lepší mechanické vlastnosti.

Tabulka 4.1: Chemické složení Arcam Ti6Al4V ELI.

Prvek	Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
hm. [%]	6,0	4,0	0,03	0,1	0,1	0,01	<0,003	zbytek

Tabulka 4.2: Mechanické vlastnosti obráběného materiálu.

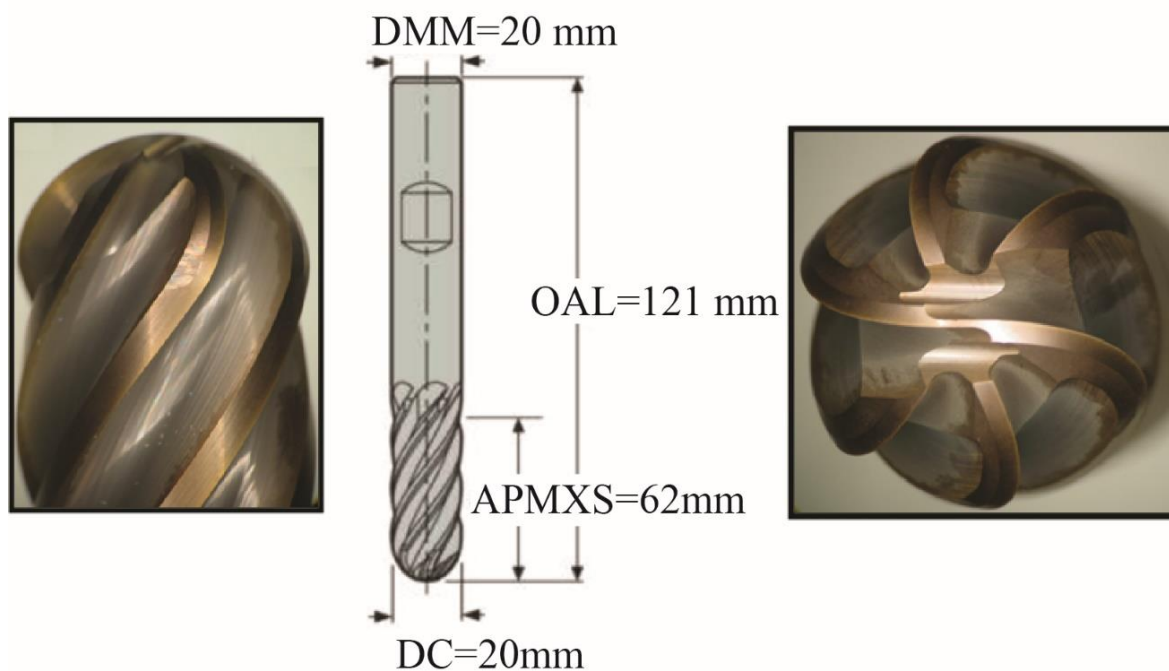
Ti6Al4V-ELI	Tvářený (ASTM F136)	Arcam Q10plus
Mez kluzu Rp0.2 [MPa]	795	894-914
Maximální pevnost v tahu Rm [MPa]	860	950-963
Prodloužení [%]	>10	11.4-11.5
Tvrдость [HRC]	30-35	36-42
Youngův modul [GPa]	114	116-118

EBM (electron beam melting) je speciální technologie, kdy stroj této značky postupným vrstvením a na-tavováním prášku vytváří díly požadované velikosti. Prášek je natavován elektronovým paprskem ve vakuu za vysokých teplot. Vysoká rychlost pohybu svazků elektronů umožňuje udržovat až několik desítek tavných bodů současně. Vysokou teplotu se redukuje pnutí při stavbě, a navíc titan nevyžaduje následné tepelné zpracování [11].

Jako obrobek byly použity polotovary 20x20-120 mm. Tento tvar byl zvolen pro možnost jednoduchého upnutí a snadného měření sil při obrábění. Pro každý sklon nástroje byl použit jiný obrobek. Upnutí zajišťoval sériový strojní svěrák o šířce čelisti 125 mm připevněný ke stolu stroje.

## 4.2 Nástroj

Jako obráběcí nástroj byla použita celokarbidová fréza JS730200D3B.3Z6-HXT od společnosti SECO s úhlem šroubovice 37°, tento nástroj umožňuje obrábění tvarových ploch, viz obr. 4.2.



Obr. 4.2 fréza JS730200D3B.3Z6-HXT a její rozměry.

## 4.3 Obráběcí stroj

Jako obráběcí stroj byla použita vertikální frézka od společnosti TOS Kuřim, vyrobená v pobočném závodě v Lipníku nad Bečvou v roce 1962, s označením FB32V, viz obr. 4.3. Jedná se o stroj s otočným vřetenkem do úhlu 45°. Pohon zajišťují 2 elektromotory. Jeden pohání vřeteno, druhý pohyb stolu. Stůl pro upínání obrobku má šířku 315 mm, délku 1250 mm a tři drážky pro upínací šrouby. Vřeteno stroje má strmý kužel ISO 50 [12].





Obr. 4.3 Vertikální frézka FB32V.

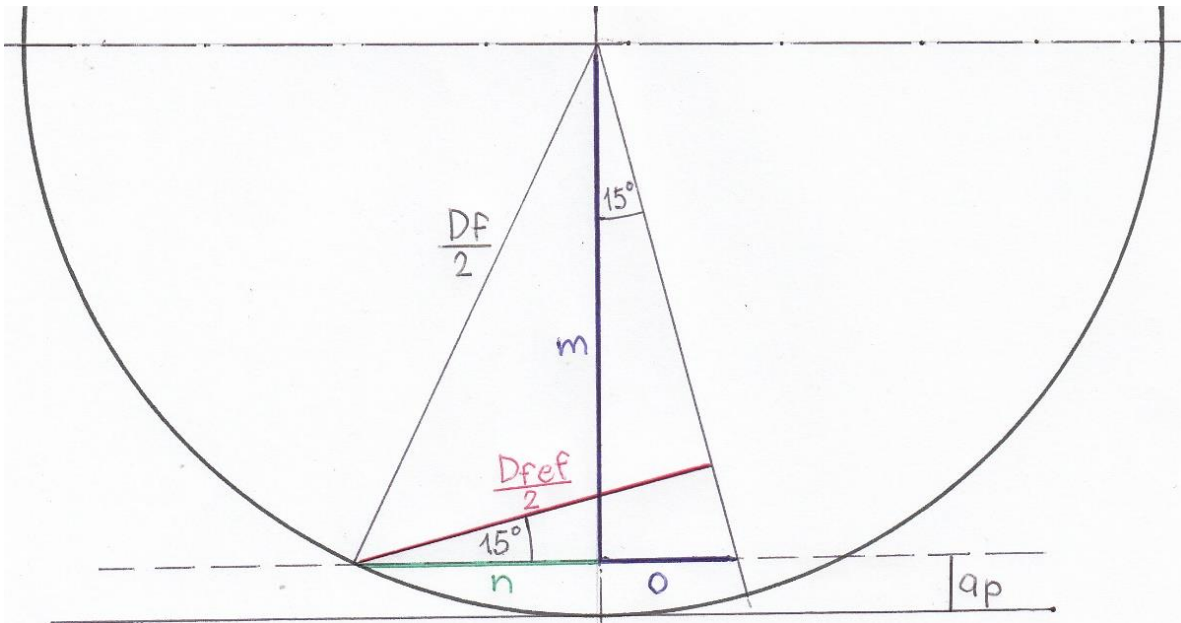
#### 4.4 Obrábění

Pokus byl realizován třemi nebo čtyřmi průjezdy na jedné straně obrobku s bočním krokem 6 mm a vstupními parametry uvedenými v tabulce 4.3. Vstupní parametry byly voleny s ohledem na přibližně stejný posuv na zub frézy  $f_z$  a taktěž průřez třísky  $A_D$ , více se této problematice věnuje kapitola 4.5.

Tabulka 4.3: Vstupní parametry při obrábění.

veličina	popis	hodnoty			
$\alpha$ [°]	úhel natočení nástroje	15	25	35	45
$a_p$ [mm]	hloubka záběru	1	1	1	1
$D_f$ [mm]	průměr zaoblení frézy	20	20	20	20
$n$ [min <sup>-1</sup> ]	otáčky	710	900	1120	1400
$v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	posuvová rychlost	200	250	315	400

Z těchto parametrů lze spočítat maximální řeznou rychlost při obrábění  $v_c$ , k tomu je potřeba nejprve spočítat maximální průměr záběru frézy  $D_{fef}$ , postupné kroky výpočtu budou značeny písmeny m, n, o, viz obr. 4.4. M bylo spočítáno následujícím způsobem.

Obr. 4.4 Geometrické znázornění výpočtu  $D_{fef}$  pro  $\alpha=15^\circ$ .

$$m = \frac{D_f}{2} - a_p [mm] \quad (4.1)$$

kde:  $a_p$  [mm] hloubka záběru

$D_f$  [mm] průměr zaoblení frézy.

Z toho lze spočítat  $n$  Pythagorovou větou z  $D_f/2$  a  $m$

$$n = \sqrt{\left(\frac{D_f}{2}\right)^2 - m^2} = \sqrt{\left(\frac{D_f}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_f}{2} - a_p\right)^2} [mm] \quad (4.2)$$

kde:  $a_p$  [mm] hloubka záběru

$D_f$  [mm] průměr zaoblení frézy.

$o$  bylo spočítáno jako součin  $m$  a tangens úhlu  $\alpha$

$$o = m \cdot \operatorname{tg} \alpha = \left(\frac{D_f}{2} - a_p\right) \cdot \operatorname{tg} \alpha [mm] \quad (4.3)$$

kde:  $a_p$  [mm] hloubka záběru

$D_f$  [mm] průměr zaoblení frézy

$\alpha$  [°] úhel natočení nástroje.

Následně byly sečteny délky  $n$  a  $o$



$$n + o = \sqrt{\left(\frac{D_f}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_f}{2} - a_p\right)^2} + \left(\frac{D_f}{2} - a_p\right) \cdot \operatorname{tg}\alpha [\text{mm}] \quad (4.4)$$

kde:  $a_p$  [mm] hloubka záběru

$D_f$  [mm] průměr zaoblení frézy.

Maximální průměr záběru frézy  $D_{fef}$  byl spočítán následujícím vztahem.

$$\begin{aligned} D_{fef} &= 2 \cdot (n + o) \cdot \cos\alpha \\ &= 2 \cdot \left( \sqrt{\left(\frac{D_f}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_f}{2} - a_p\right)^2} + \left(\frac{D_f}{2} - a_p\right) \cdot \operatorname{tg}\alpha \right) \cdot \cos\alpha [\text{mm}] \end{aligned} \quad (4.5)$$

kde:  $a_p$  [mm] hloubka záběru

$D_f$  [mm] průměr zaoblení frézy

$\alpha$  [°] úhel natočení nástroje.

K maximálnímu průměru záběru frézy  $D_{fef}$  lze spočítat maximální řeznou rychlost  $v_c$ , když se do vztahu (3.1) dosadí  $D_{fef}$

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_{fef} \cdot n}{1000} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4.6)$$

kde:  $D_{fef}$  [mm] maximální průměr záběru frézy

$n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] otáčky frézy.

Dále je třeba spočítat posuv na zub  $f_z$ , který lze spočítat ze vztahu (3.2)

$$f_z = \frac{v_f \cdot 1000}{n \cdot z} [\text{mm}] \quad (4.7)$$

kde:  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] otáčky frézy

$v_f$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] posuvová rychlost

$z$  [-] počet zubů frézy.

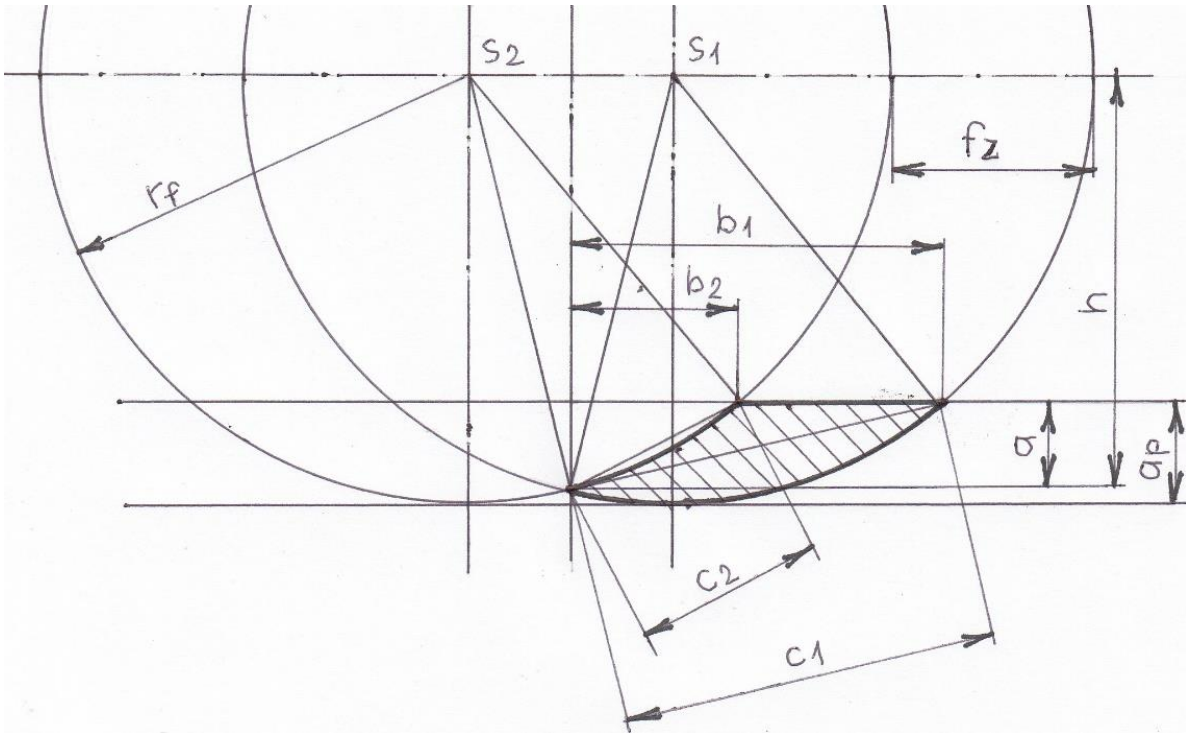
Hodnoty maximálního průměru záběru frézy, maximální řezné rychlosti a posuvu na zub pro úhly natočení frézy  $\alpha$  jsou uvedeny v tabulce 4.4.

Tabulka 4.4: Spočítané hodnoty  $D_{fef}$ ,  $v_c$ ,  $f_z$  pro úhly  $\alpha$ .

$\alpha$	Úhel natočení frézy [°]	15	25	35	45
$D_{fef}$	Maximální průměr záběru frézy [mm]	13,08	15,51	17,47	18,89
$v_c$	Maximální řezná rychlost	29,17	43,85	61,45	83,09
$f_z$	Posuv na zub	0,0469	0,0463	0,0469	0,0476

## 4.5 Průřez třísky

Průřez třísky nelze počítat ze vzorců pro válcové a čelní frézování z důvodu zaoblení a úhlu sklonu frézy, lze počítat integrálním přístupem nebo z geometrie ploch, viz obr. 4.5. V této práci je to řešeno geometricky z posuvu na zub  $f_z$ , hloubky záběru  $a_p$  a průměru zaoblení frézy  $D_f$ .



Obr. 4.5 Geometrické znázornění výpočtu maximálního průřezu třísky  $A_{Dmax}$ .

Poloměr zaoblení frézy  $r_f$

$$r_f = \frac{D_f}{2} [mm] \quad (4.8)$$

kde:  $D_f$  [mm] průměr zaoblení frézy.

Vzdálenost bodu počátku záběru od osy frézy  $h$

$$h = \sqrt{r_f^2 - \frac{f_z^2}{4}} [mm] \quad (4.9)$$

kde:  $f_z$  [mm] posuv na zub

$r_f$  [mm] poloměr zaoblení frézy.

Vzdálenost bodu počátku záběru od povrchu původní neobrobené plochy  $a$

$$a = h - r_f + a_p \quad (4.10)$$

kde:  $a_p$  [mm] hloubka záběru

$r_f$  [mm] poloměr zaoblení frézy.

Délka třísky z pohledu shora  $b_1$

$$b_1 = \sqrt{r_f^2 - (r_f - a_p)^2} + \frac{f_z}{2} = \sqrt{2 \cdot r_f \cdot a_p - a_p^2} + \frac{f_z}{2} \quad (4.11)$$

kde:  $a_p$  [mm] hloubka záběru

$f_z$  [mm] posuv na zub

$r_f$  [mm] poloměr zaoblení frézy.

Základna trojúhelníku vepsaného do kruhové výseče  $c_1$

$$c_1 = \sqrt{a^2 + b_1^2} \quad (4.12)$$

Výška trojúhelníku se základnou  $c_1$  a vrcholem  $s_1$   $v_1$

$$v_1 = \sqrt{r_f^2 - \frac{c_1^2}{4}} \quad (4.13)$$

kde:  $r_f$  [mm] poloměr zaoblení frézy.

Obsah kruhové úseče s tětivou  $c_1$  a pravoúhlého trojúhelníku s ní spojeného  $S_1$

$$S_1 = \frac{\sin \frac{c_1}{2 \cdot r_f}}{180} \cdot \pi \cdot r_f^2 - v_1 \cdot \frac{c_1}{2} + \frac{a \cdot b_1}{2} \quad (4.14)$$

kde:  $r_f$  [mm] poloměr zaoblení frézy.

Délka třísky z pohledu shora bez vzdálenosti posuvu na zub  $b_2$

$$b_2 = b_1 - f_z = \sqrt{2 \cdot r_f \cdot a_p - a_p^2} - \frac{f_z}{2} \quad (4.15)$$

kde:  $a_p$  [mm] hloubka záběru

$f_z$  [mm] posuv na zub

$r_f$  [mm] poloměr zaoblení frézy.

Základna trojúhelníku vepsaného do kruhové výseče  $c_2$

$$c_2 = \sqrt{a^2 + b_2^2} \quad (4.16)$$

Výška trojúhelníku se základnou  $c_2$  a vrcholem  $s_2$   $v_2$

$$v_2 = \sqrt{r_f^2 - \frac{c_2^2}{4}} \quad (4.17)$$

kde:  $r_f$  [mm] poloměr zaoblení frézy.

Obsah kruhové úseče s tětivou  $c_2$  a pravoúhlého trojúhelníku s ní spojeného  $S_2$

$$S_2 = \frac{\sin \frac{c_2}{2} \cdot r_f}{180} \cdot \pi \cdot r_f^2 - v_2 \cdot \frac{c_2}{2} + \frac{a \cdot b_2}{2} \quad (4.18)$$

kde:  $r_f$  [mm] poloměr zaoblení frézy.

Průřez třísky  $A_{Dmax}$  je rozdíl obsahů  $S_1$  a  $S_2$

$$A_{Dmax} = S_1 - S_2 \quad (4.19)$$

Výsledný vzorec průřezu třísky  $A_{Dmax}$

$$A_{Dmax} = \frac{\sin \frac{\sqrt{\left(\sqrt{r_f^2 - \frac{f_z^2}{4}} - r_f + a_p\right)^2 + \left(\sqrt{2 \cdot r_f \cdot a_p - a_p^2} + \frac{f_z}{2}\right)^2}}{2 \cdot r_f}}{180} \cdot \pi \cdot r_f^2 - \sqrt{r^2 - \frac{\left(\sqrt{r_f^2 - \frac{f_z^2}{4}} - r_f + a_p\right)^2 + \left(\sqrt{2 \cdot r_f \cdot a_p - a_p^2} + \frac{f_z}{2}\right)^2}{4}} + \frac{\sqrt{\left(\sqrt{r_f^2 - \frac{f_z^2}{4}} - r_f + a_p\right)^2 + \left(\sqrt{2 \cdot r_f \cdot a_p - a_p^2} + \frac{f_z}{2}\right)^2}}{2} + \frac{\left(\sqrt{r_f^2 - \frac{f_z^2}{4}} - r_f + a_p\right) \cdot \left(\sqrt{2 \cdot r_f \cdot a_p - a_p^2} + \frac{f_z}{2}\right)}{2} - \frac{\sin \frac{\sqrt{\left(\sqrt{r_f^2 - \frac{f_z^2}{4}} - r_f + a_p\right)^2 + \left(\sqrt{2 \cdot r_f \cdot a_p - a_p^2} - \frac{f_z}{2}\right)^2}}{2 \cdot r_f}}{180} \cdot \pi \cdot r_f^2 + \sqrt{r^2 - \frac{\left(\sqrt{r_f^2 - \frac{f_z^2}{4}} - r_f + a_p\right)^2 + \left(\sqrt{2 \cdot r_f \cdot a_p - a_p^2} - \frac{f_z}{2}\right)^2}{4}} + \frac{\sqrt{\left(\sqrt{r_f^2 - \frac{f_z^2}{4}} - r_f + a_p\right)^2 + \left(\sqrt{2 \cdot r_f \cdot a_p - a_p^2} - \frac{f_z}{2}\right)^2}}{2} - \frac{\left(\sqrt{r_f^2 - \frac{f_z^2}{4}} - r_f + a_p\right) \cdot \left(\sqrt{2 \cdot r_f \cdot a_p - a_p^2} - \frac{f_z}{2}\right)}{2} \quad (4.20)$$

kde:  $a_p$  [mm] hloubka záběru

$f_z$  [mm] posuv na zub

$r_f$  [mm] poloměr zaoblení frézy

Výsledný vzorec je poněkud delší a jeho hodnoty pro úhly  $\alpha$  jsou uvedeny v tabulce 4.5.

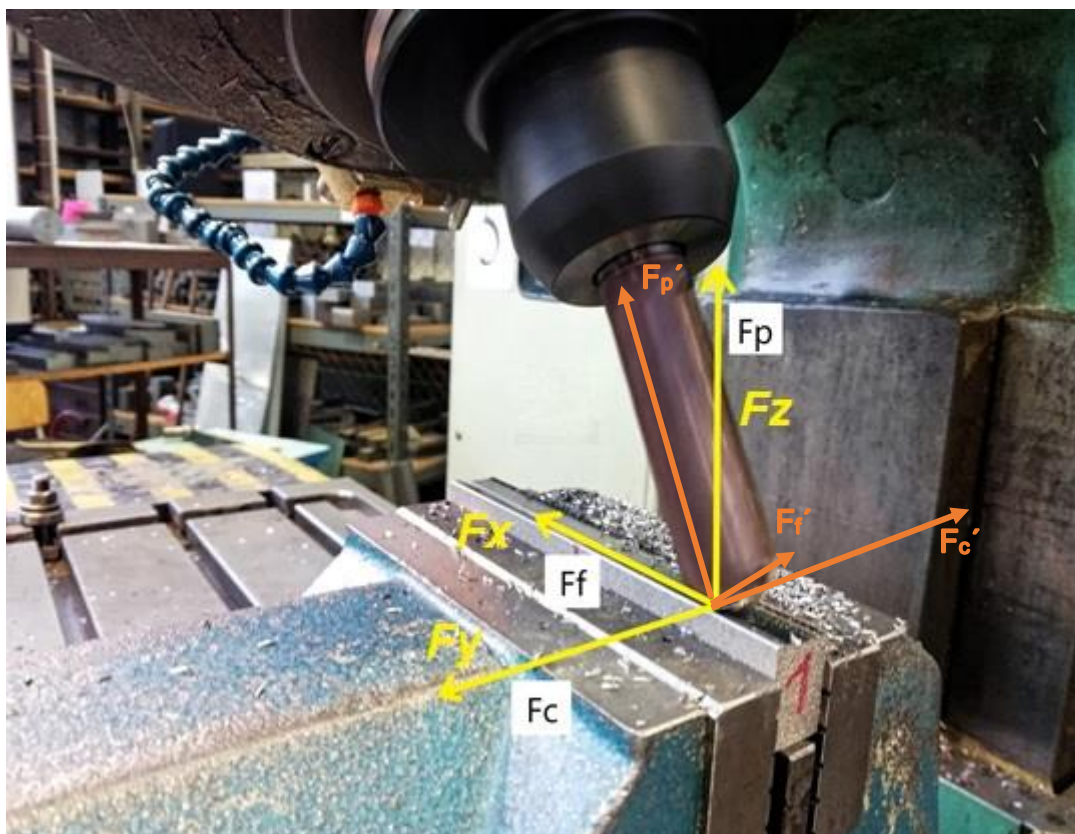
Tabulka 4.5: Maximální průřezy třísek  $A_{Dmax}$  pro úhly natočení frézy  $\alpha$ .

$\alpha$	Úhel natočení frézy [°]	15	25	35	45
$A_{Dmax}$	Maximální průřez třísky [mm <sup>2</sup> ]	0,1032	0,1026	0,1032	0,1039

Jmenovitý průřez třísky  $A_{Di}$  lze spočítat obdobně nahrazením posuvu na zub  $f_z$  ve vzorci za  $f_z \cdot \sin\varphi_i$ .

## 4.6 Měření

Pomocí tříšložkového dynamometru byla měřena velikost sil ve směru posuvu stolu stroje ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ), o frekvenci 10 Hz. Vektory sil jsou zobrazeny na obrázku 4.6 žlutou barvou. Byl proveden přepočít sil ve směru osy nástroje a dvou kolmých sil ( $F_{f'}$ ,  $F_{c'}$ ,  $F_{p'}$ ), viz obr 4.6 oranžovou barvou.



Obr. 4.6 Vektory měřených sil a přepočítaných sil.

Výsledná síla naměřených hodnot  $F_v$ .

$$F_v = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} [N] \quad (4.21)$$

Síla kolmá k ose nástroje  $F_{f'}$

---

$$F_f' = -F_x \cdot \cos\alpha - F_z \cdot \sin\alpha [N] \quad (4.22)$$

kde:  $\alpha$  [°] úhel sklonu nástroje.

Síla kolmá k ose nástroje  $F_c'$ .

$$F_c' = -F_y [N] \quad (4.23)$$

Síla ve směru osy nástroje  $F_p'$

$$F_p' = -F_x \cdot \sin\alpha + F_z \cdot \cos\alpha [N] \quad (4.24)$$

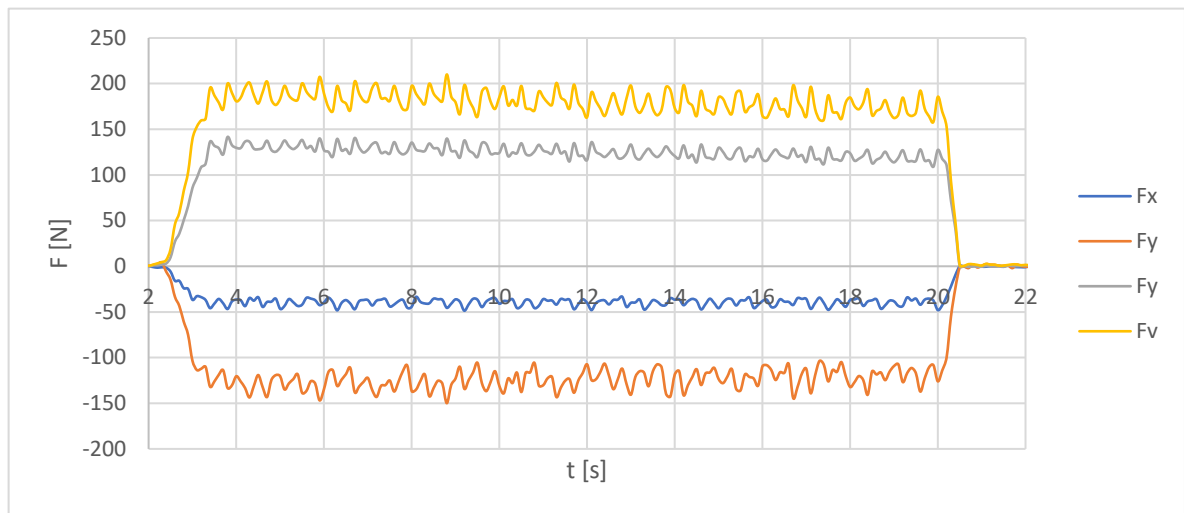
kde:  $\alpha$  [°] úhel sklonu nástroje.

Výsledná síla přepočítaných hodnot  $F_v$ , která je rovna výsledné síle naměřených hodnot.

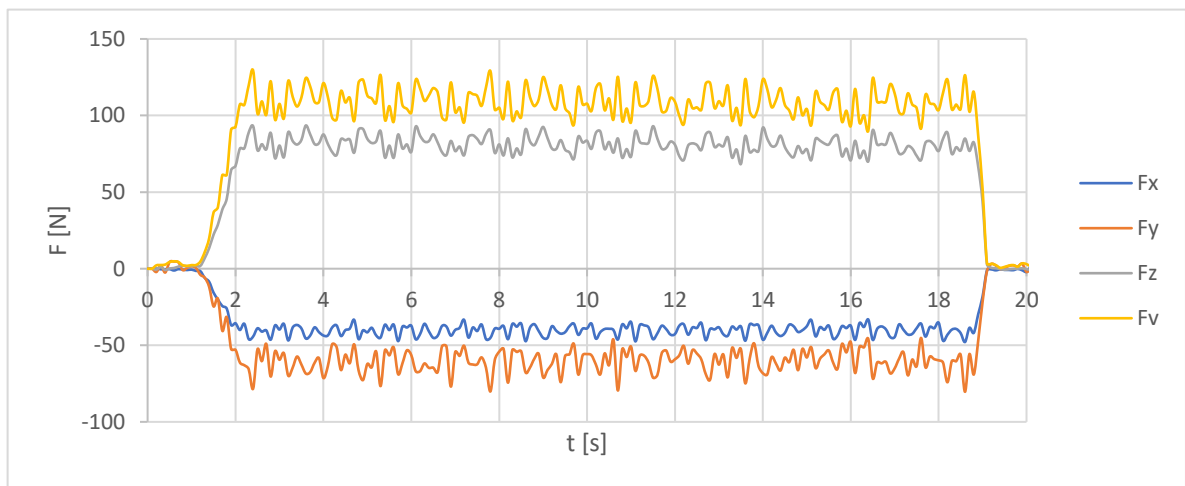
$$F_v = \sqrt{F_f'^2 + F_c'^2 + F_p'^2} [N] \quad (4.25)$$

Grafy naměřených sil jsou vykresleny v kapitole 5 a grafy přepočítaných sil v kapitole 6.

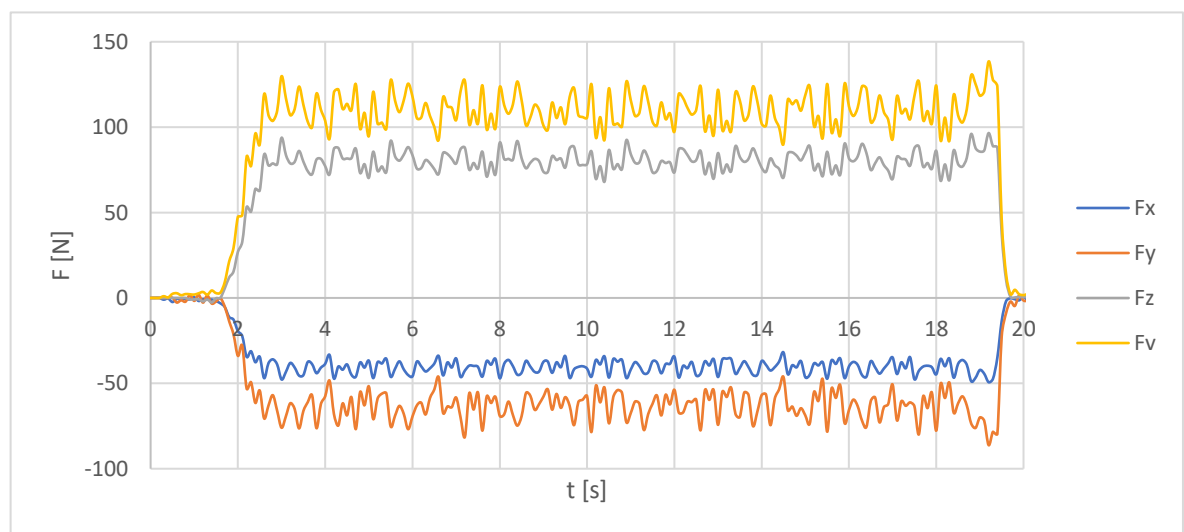
## 5 GRAFY NAMĚŘENÝCH HODNOT



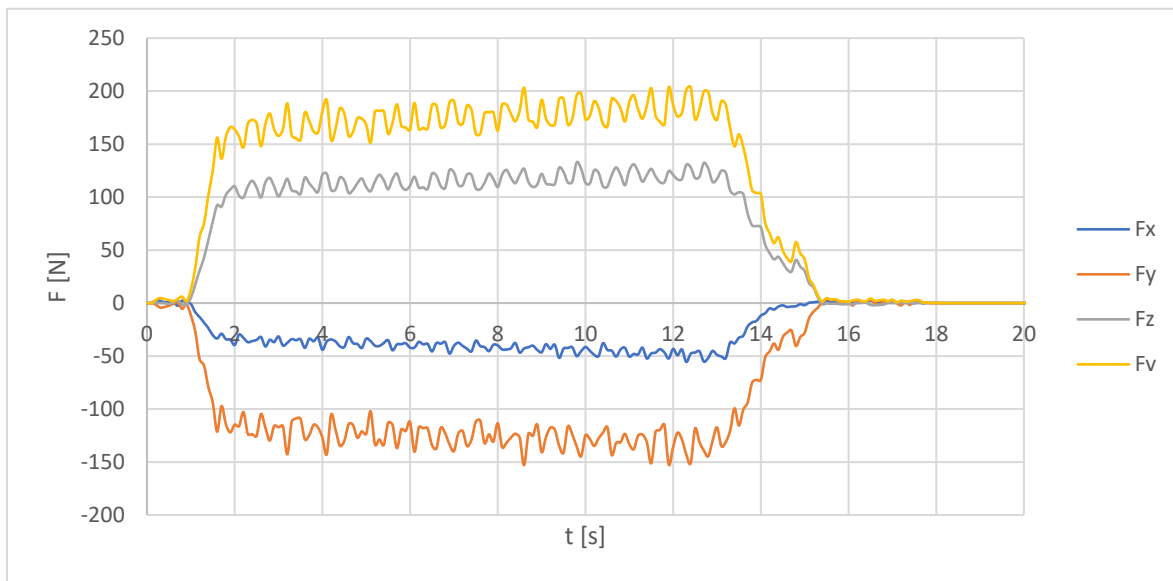
Obr. 5.1 Graf naměřených sil pro úhel sklonu nástroje  $15^\circ$ , první průjezd.



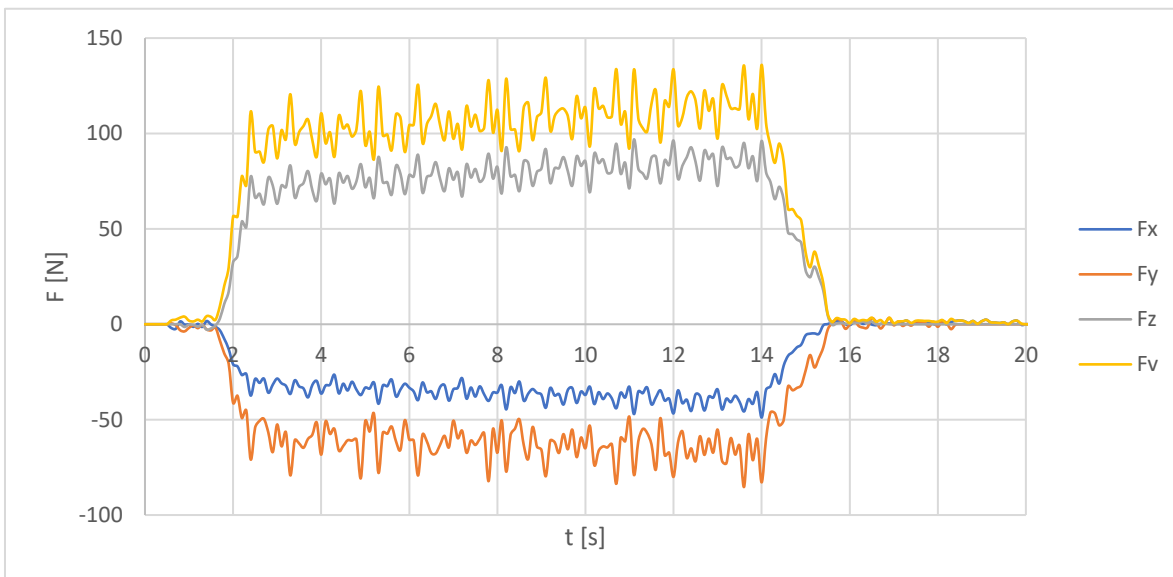
Obr. 5.2 Graf naměřených sil pro úhel sklonu nástroje  $15^\circ$ , druhý průjezd.



Obr. 5.3 Graf naměřených sil pro úhel sklonu nástroje  $15^\circ$  třetí průjezd.

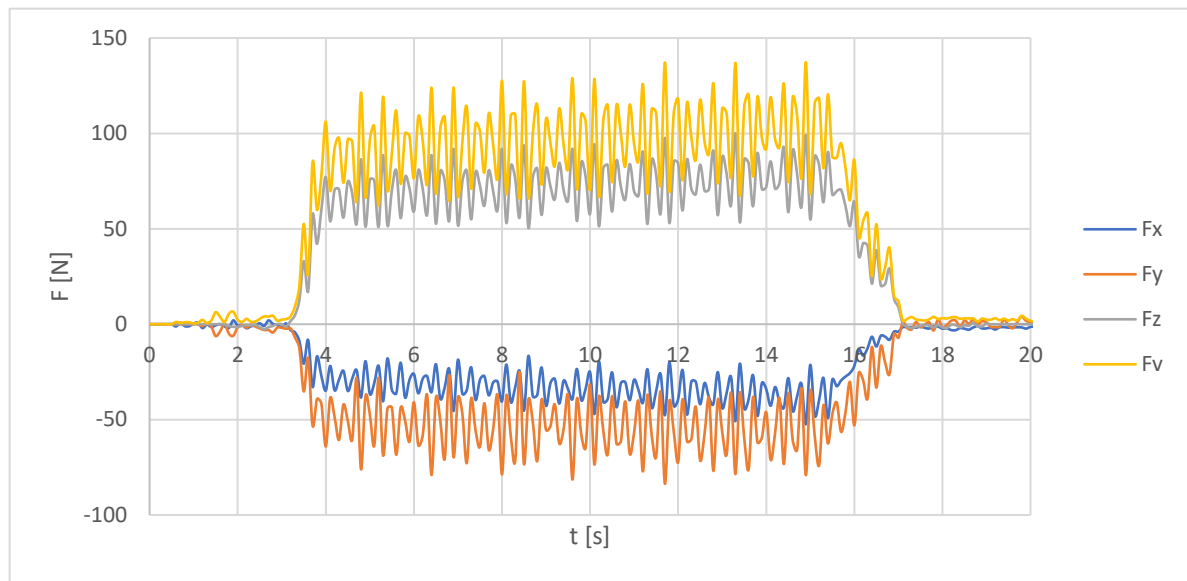


Obr. 5.4 Graf naměřených sil pro úhel sklonu nástroje 25°, první průjezd.

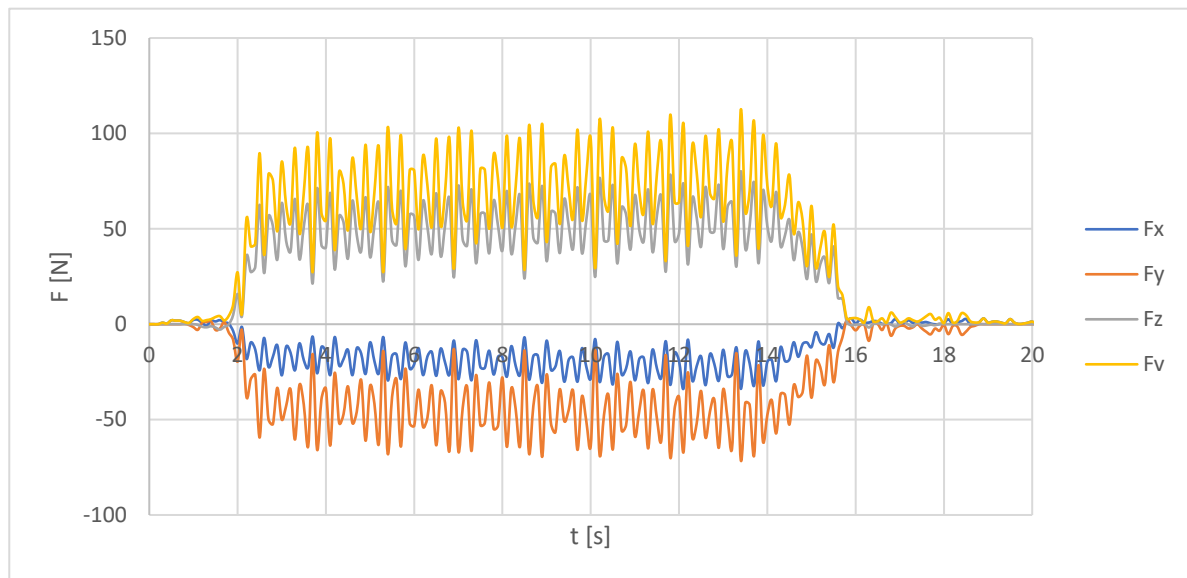


Obr. 5.5 Graf naměřených sil pro úhel sklonu nástroje 25°, druhý průjezd.

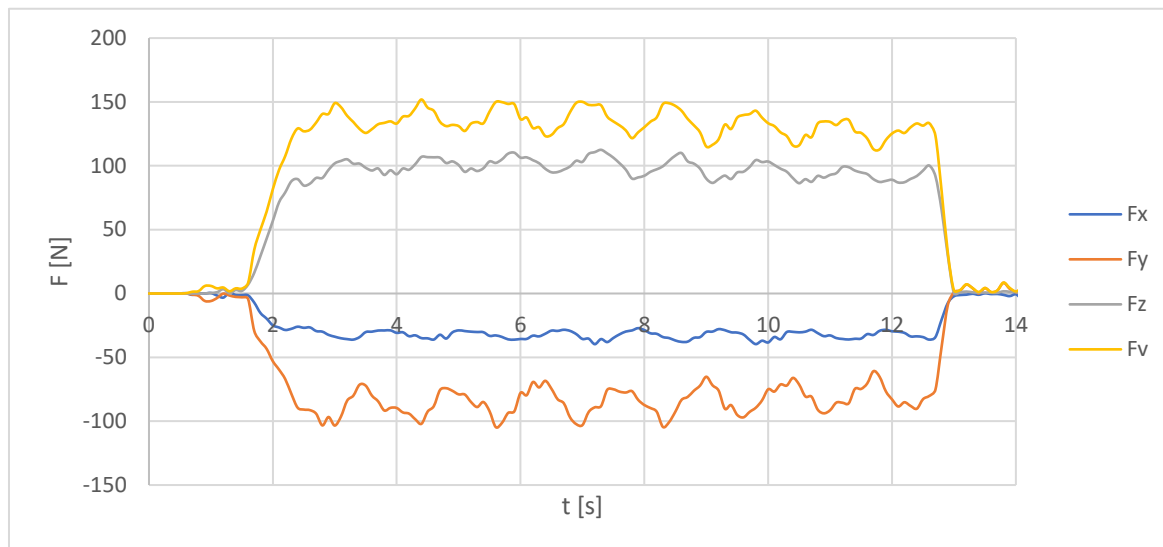




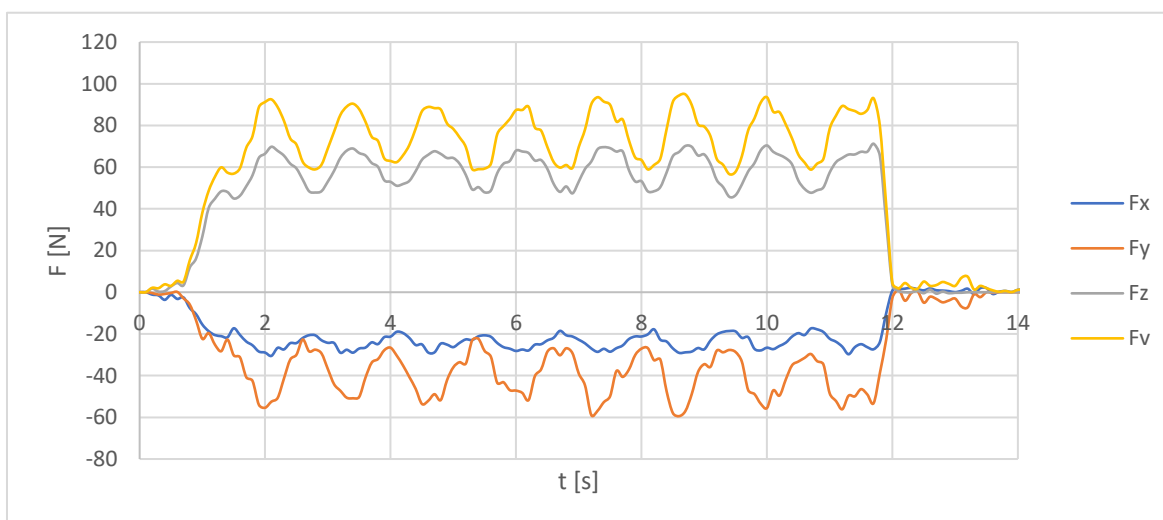
Obr. 5.6 Graf naměřených sil pro úhel sklonu nástroje  $25^\circ$ , třetí průjezd.



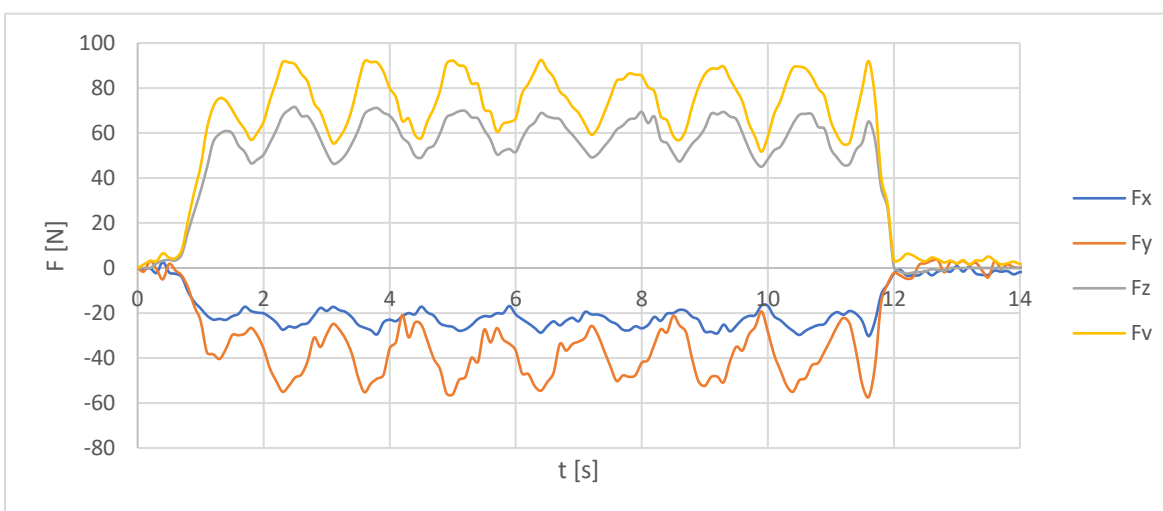
Obr. 5.7 Graf naměřených sil pro úhel sklonu nástroje  $25^\circ$ , čtvrtý průjezd.



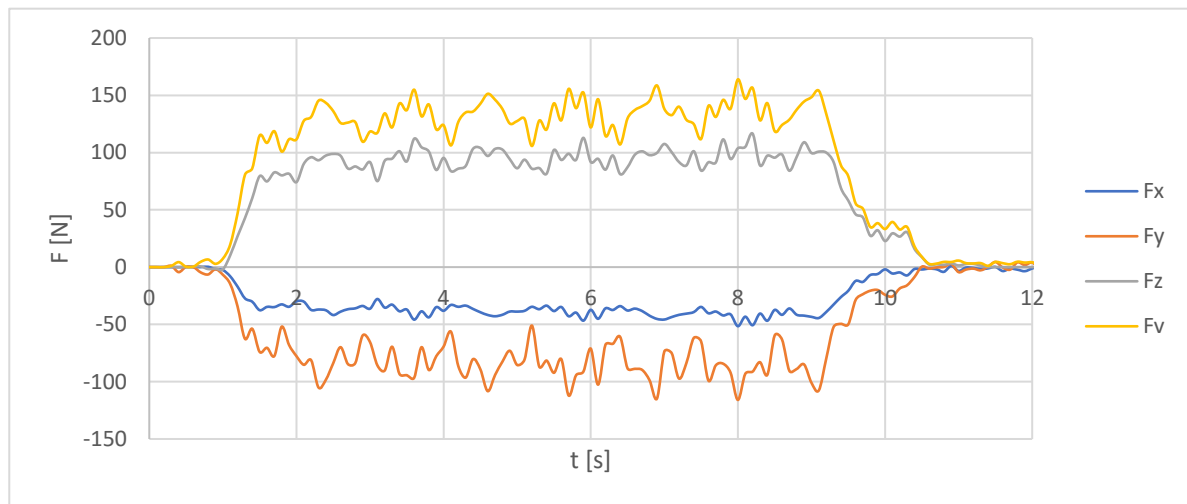
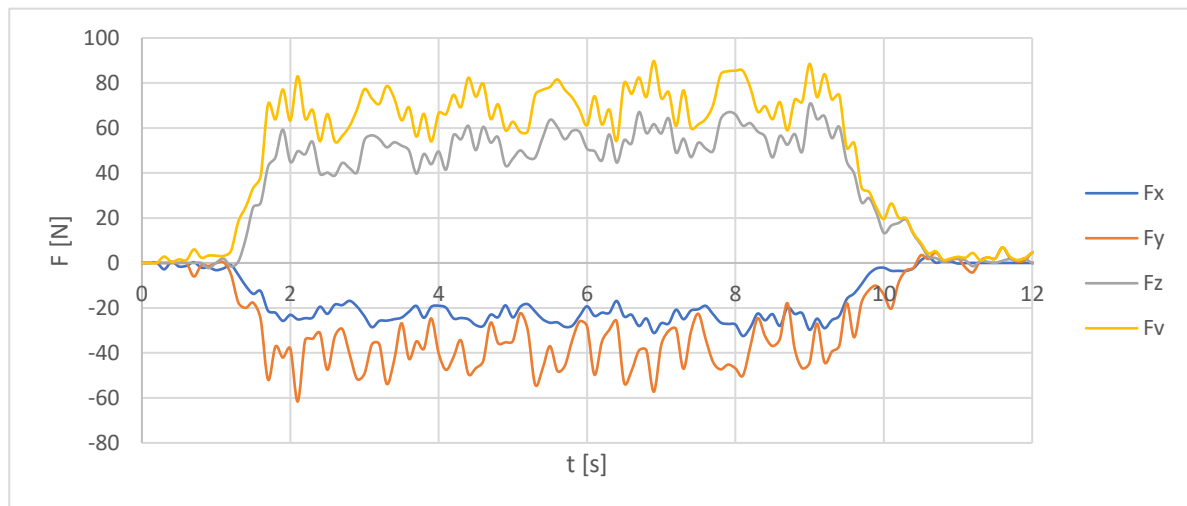
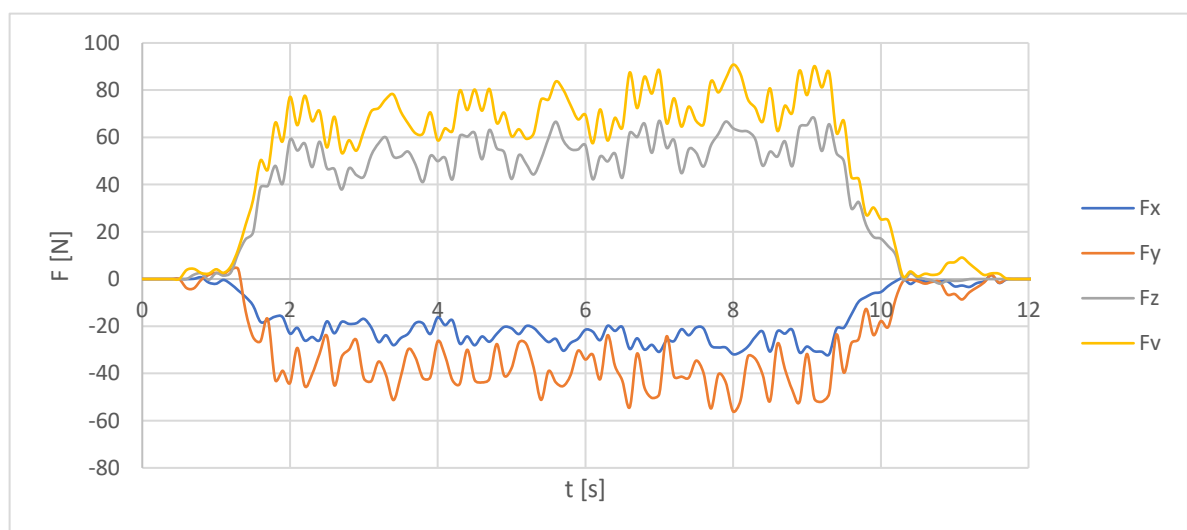
Obr. 5.8 Graf naměřených sil pro úhel sklonu nástroje 35°, první průjezd.



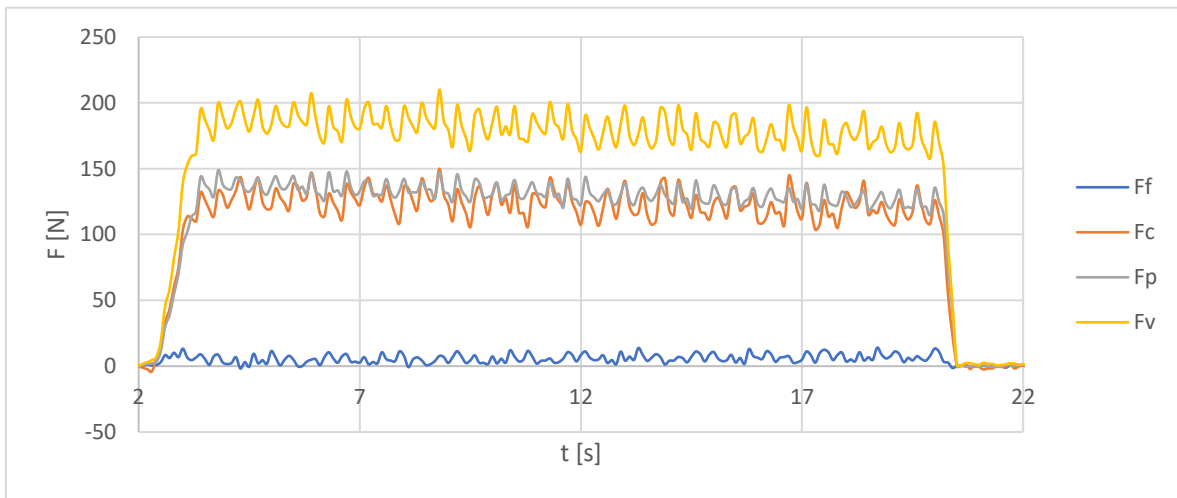
Obr. 5.9 Graf naměřených sil pro úhel sklonu nástroje 35°, druhý průjezd.



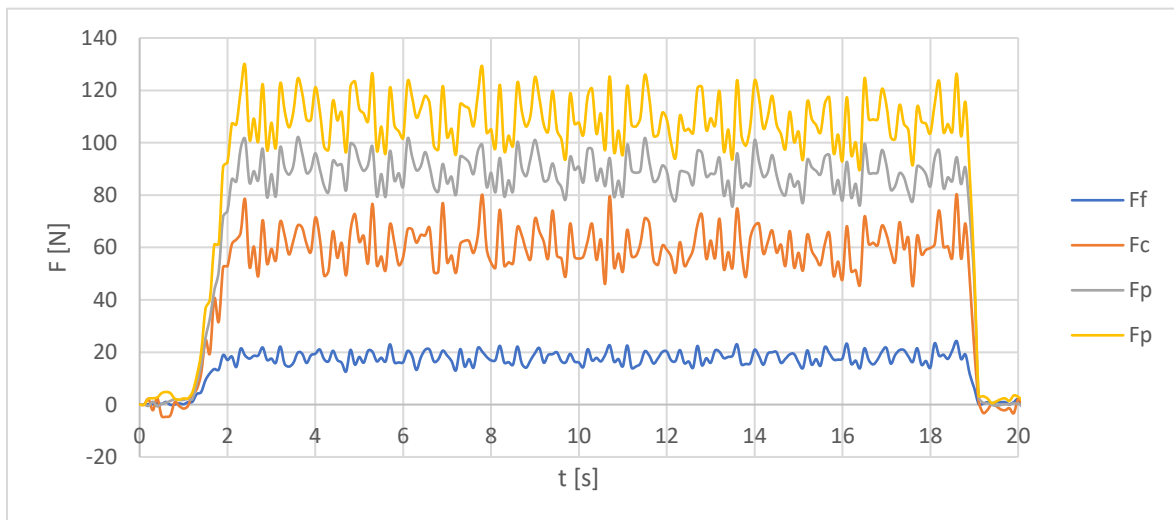
Obr. 5.10 Graf naměřených sil pro úhel sklonu nástroje 35°, třetí průjezd.

Obr. 5.11 Graf naměřených sil pro úhel sklonu nástroje  $45^\circ$ , první průjezd.Obr. 5.12 Graf naměřených sil pro úhel sklonu nástroje  $45^\circ$ , druhý průjezd.Obr. 5.13 Graf naměřených sil pro úhel sklonu nástroje  $45^\circ$ , třetí průjezd.

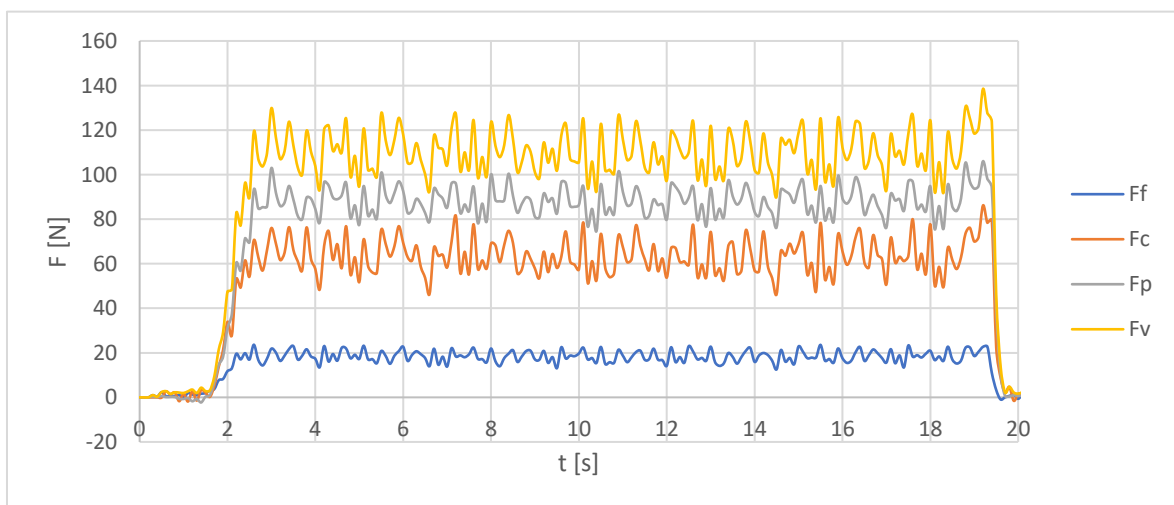
## 6 GRAFY PŘEPOČÍTANÝCH HODNOT



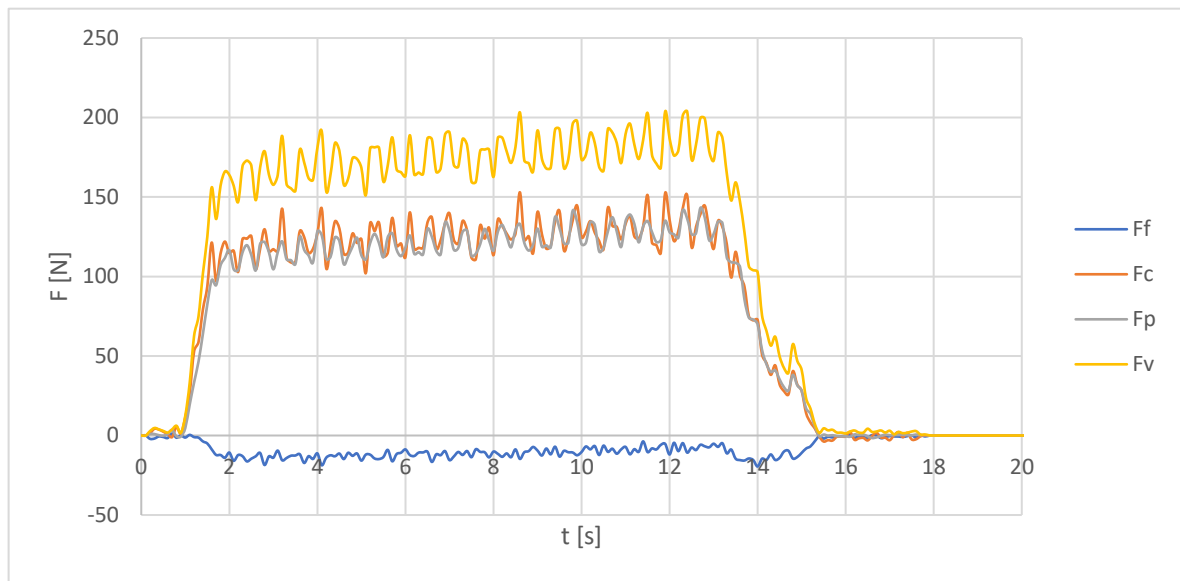
Obr. 6.1 Graf přepočtených sil pro úhel sklonu nástroje 15°, první průjezd.



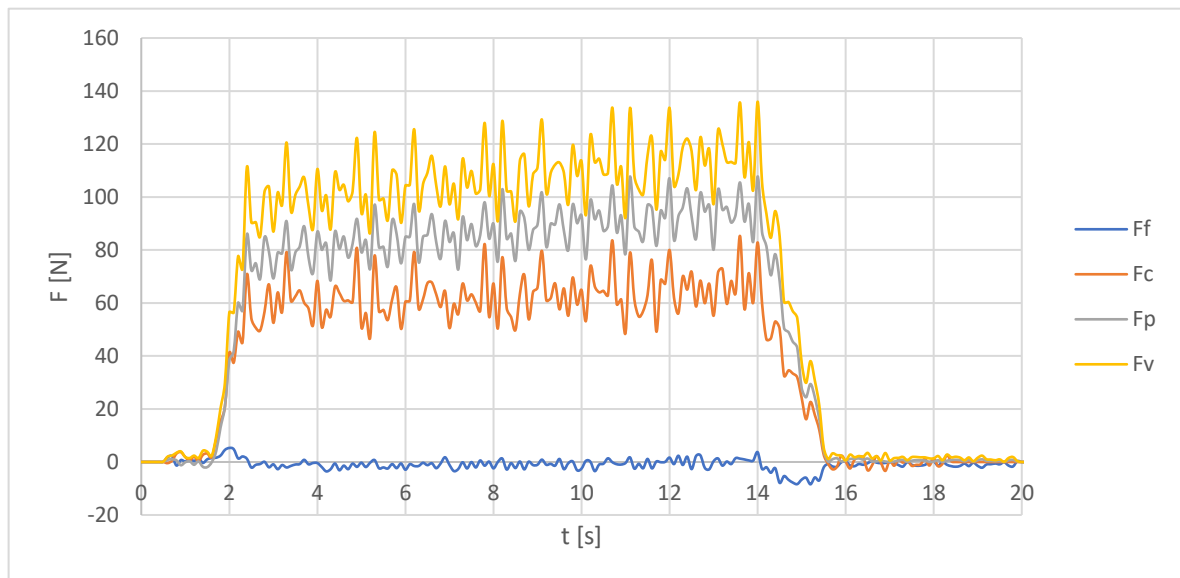
Obr. 6.2 Graf přepočtených sil pro úhel sklonu nástroje 15°, druhý průjezd.



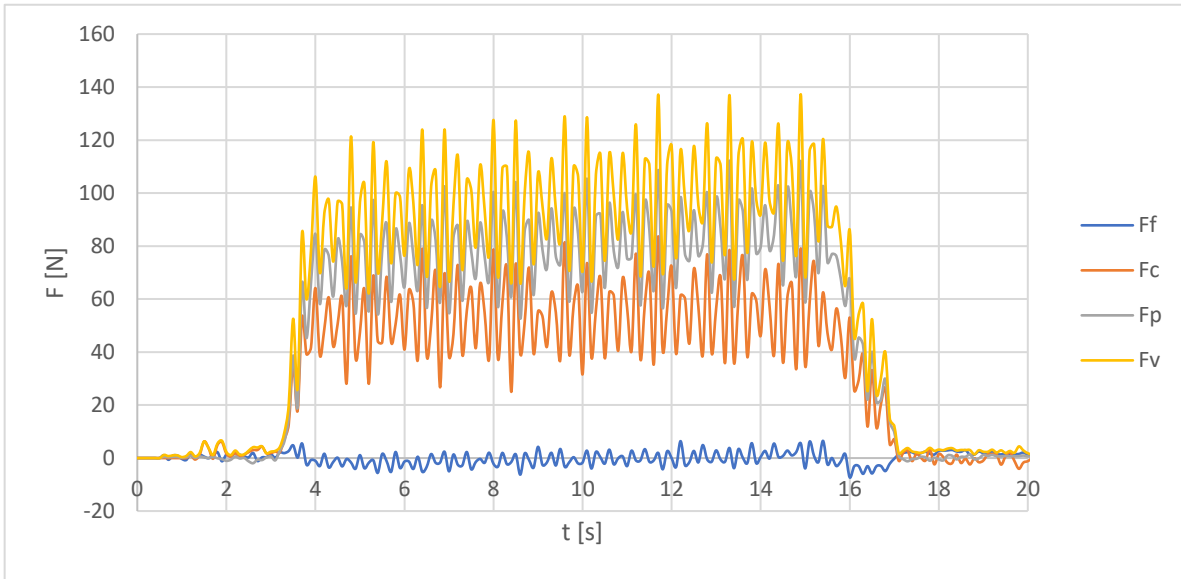
Obr. 6.3 Graf přepočtených sil pro úhel sklonu nástroje 15°, třetí průjezd.



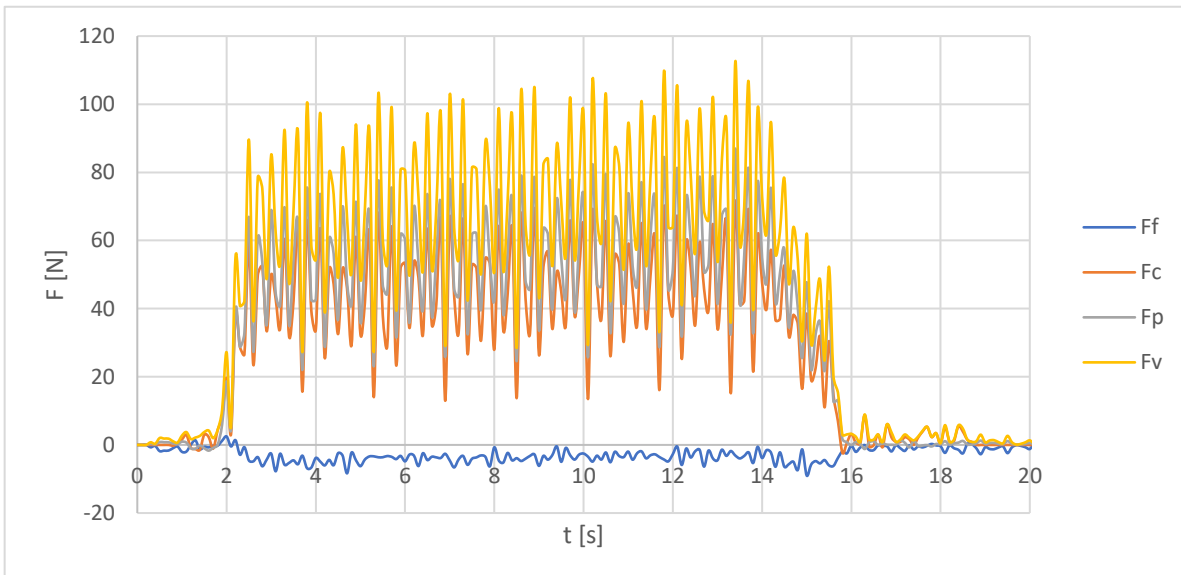
Obr. 6.4 Graf přepočtených sil pro úhel sklonu nástroje 25°, první průjezd.



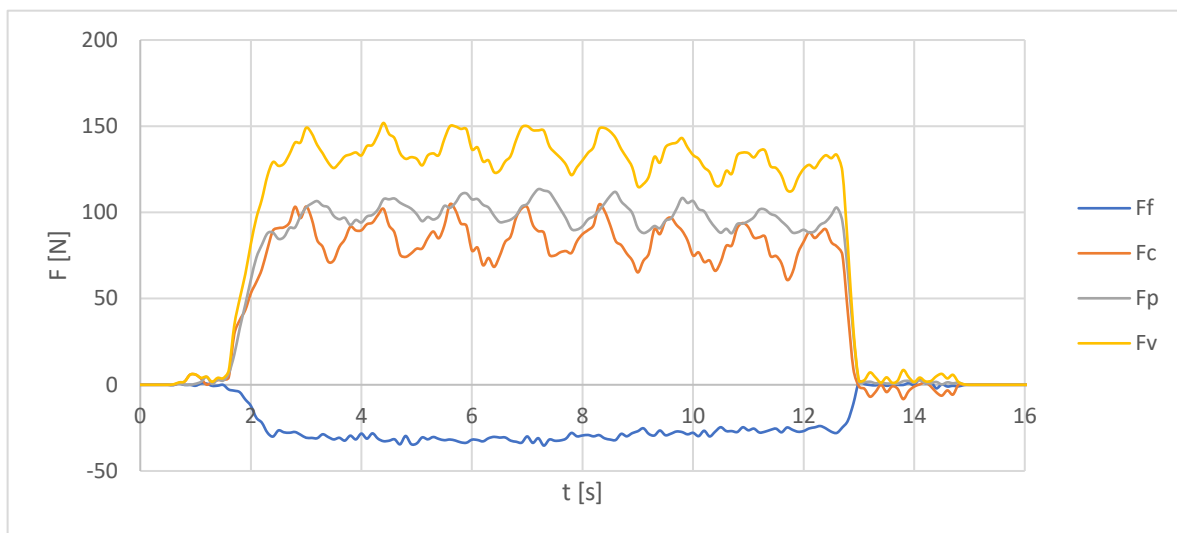
Obr. 6.5 Graf přepočtených sil pro úhel sklonu nástroje 25°, druhý průjezd.



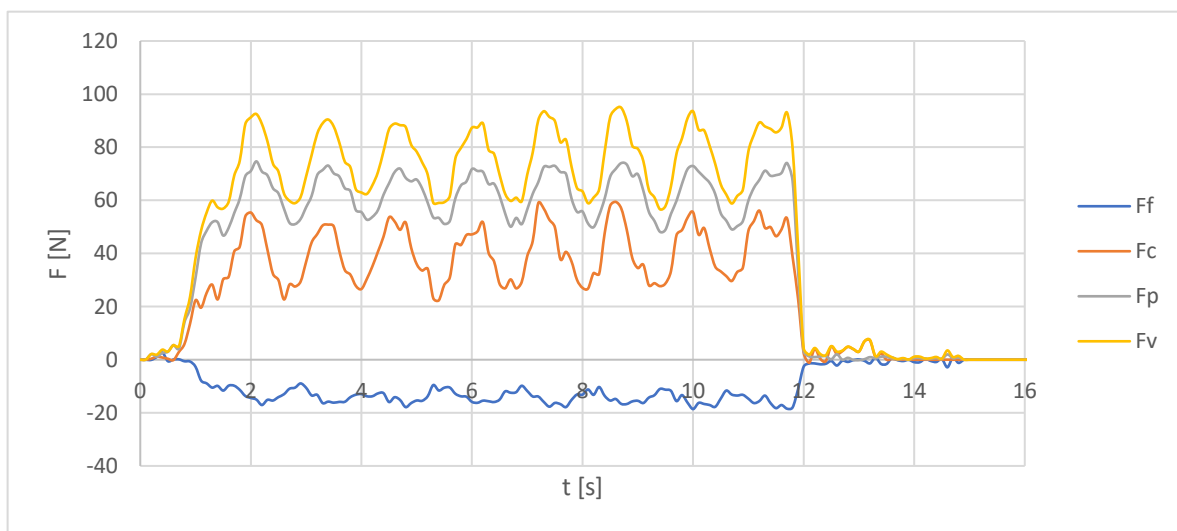
Obr. 6.6 Graf přepočtených sil pro úhel sklonu nástroje 25°, třetí průjezd.



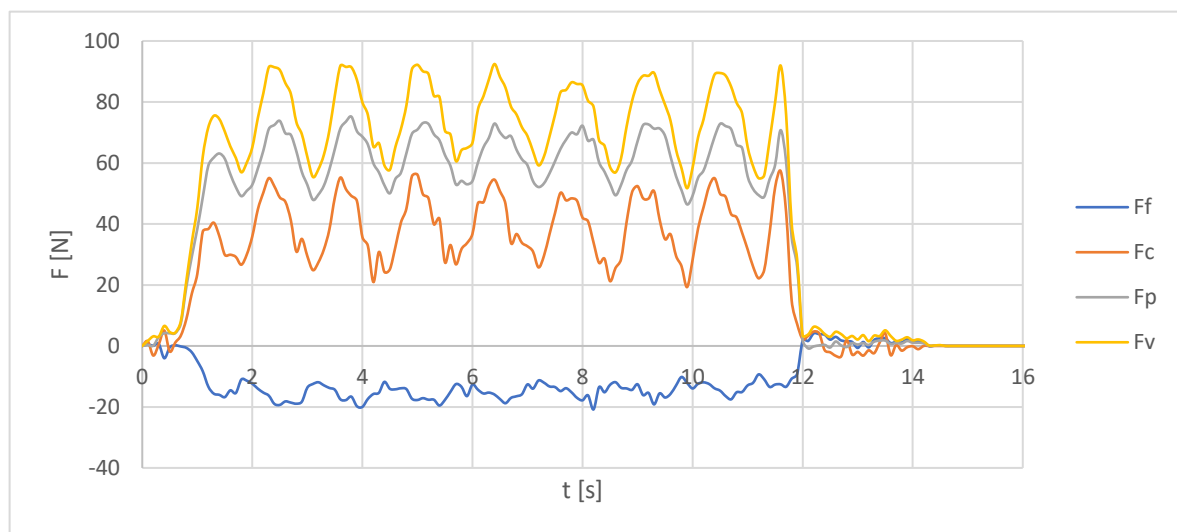
Obr. 6.7 Graf přepočtených sil pro úhel sklonu nástroje 25°, čtvrtý průjezd.



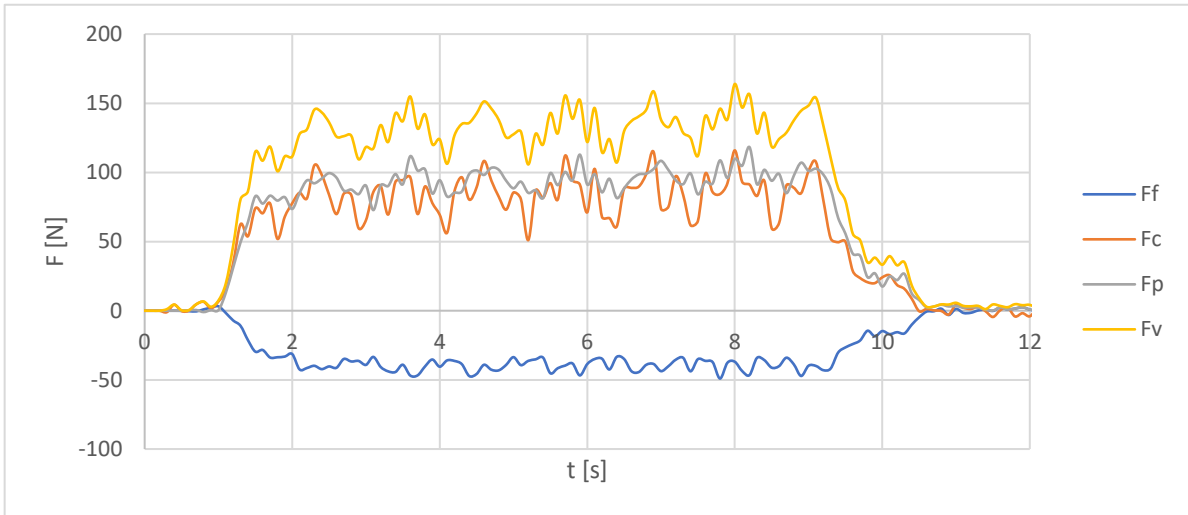
Obr. 6.8 Graf přepočtených sil pro úhel sklonu nástroje 35°, první průjezd.



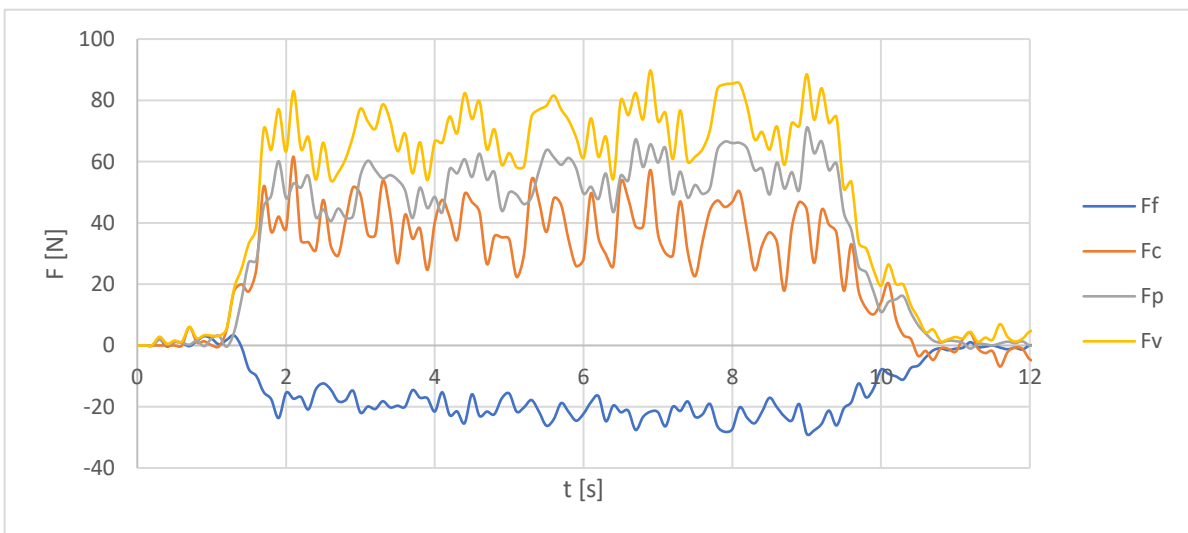
Obr. 6.9 Graf přepočtených sil pro úhel sklonu nástroje 35°, druhý průjezd.



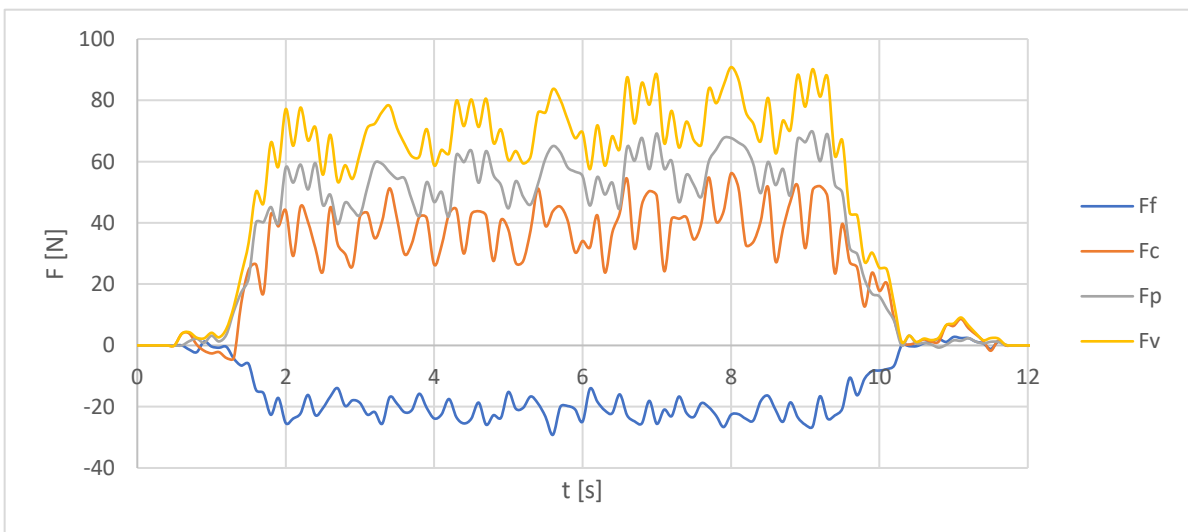
Obr. 6.10 Graf přepočtených sil pro úhel sklonu nástroje 35°, třetí průjezd.



Obr. 6.11 Graf přepočtených sil pro úhel sklonu nástroje 45°, první průjezd.



Obr. 6.12 Graf přepočtených sil pro úhel sklonu nástroje 45°, druhý průjezd.



Obr. 6.13 Graf přepočtených sil pro úhel sklonu nástroje 45°, třetí průjezd.

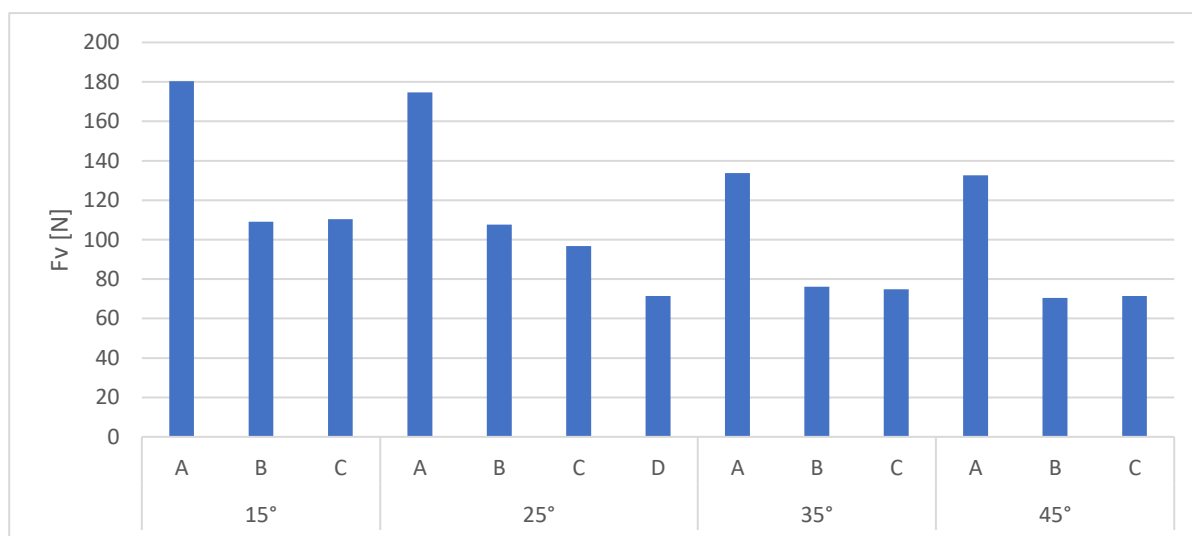


## 7 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Jak již bylo napsáno, rozhodujícími parametry při obrábění jsou síly při obrábění, opotřebením nástroje a kvalita obrobeného povrchu, tato kapitola se bude věnovat vyhodnocení těchto parametrů získaných z experimentu. Záznam měření je proveden z celé délky posuvu během obrábění a síly byly hodnoceny z hodnot v plném záběru.

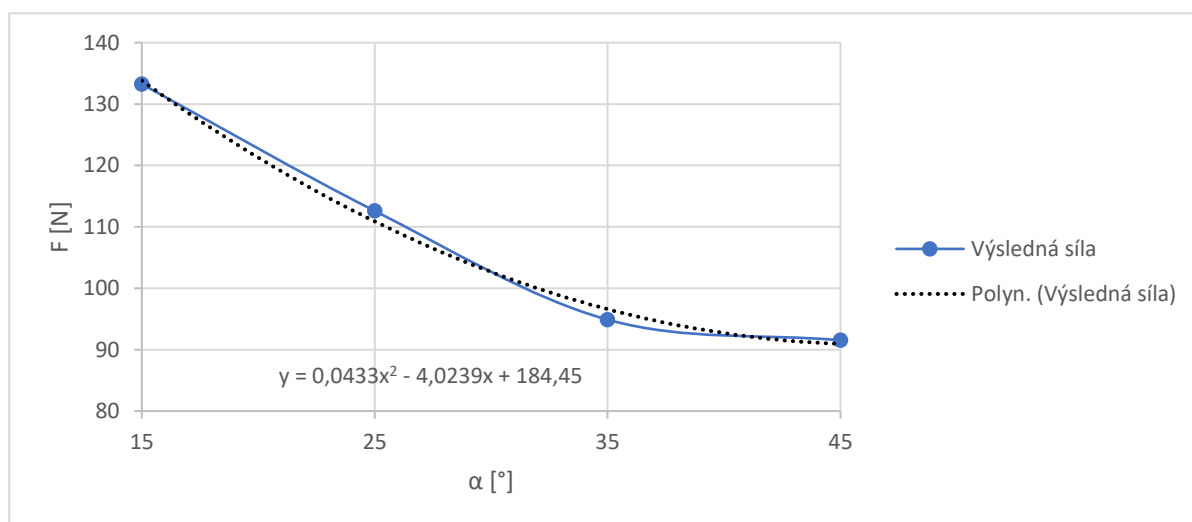
### 7.1 Vyhodnocení sil

Průběhy sil byly statisticky zpracovány na hladině spolehlivosti 95% a hodnocenými parametry jsou střední hodnota, směrodatná odchylka, maximální hodnota sil a doba průjezdu obrobkem. Jednotlivé průjezdy jsou značeny písmeny A, B, C, D.



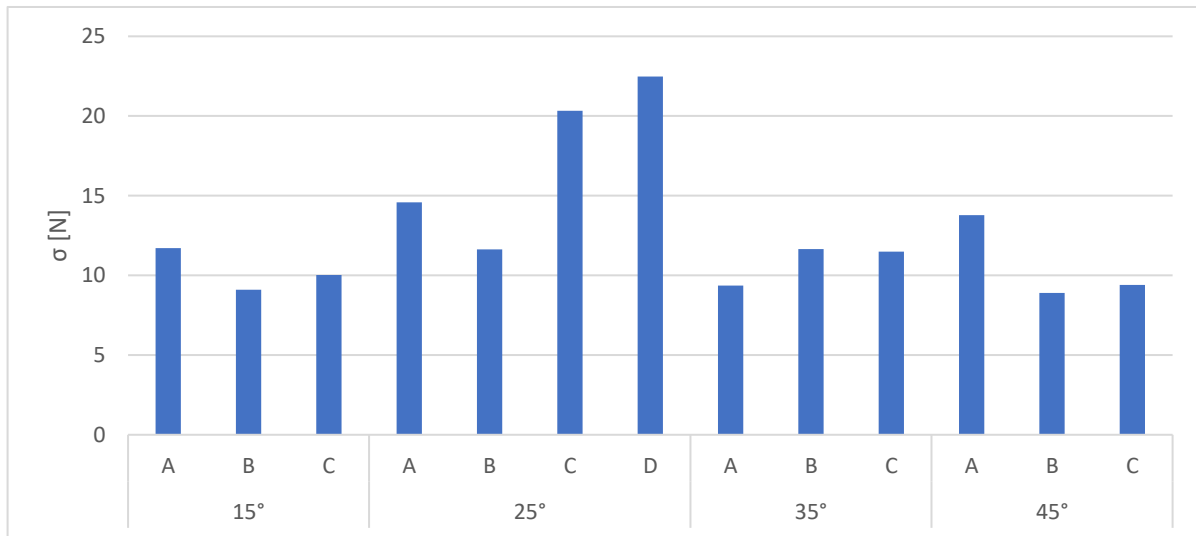
Obr. 7.1 Graf závislosti střední hodnoty výsledné síly na jednotlivých sklonech nástroje.

Z grafu 7.1 je patrné, že při prvním průjezdu u každého úhlu jsou síly působící na nástroj větší o 60-90% oproti dalším průjezdům, pravděpodobně z důvodu záběhu, otěru ochranného povlaku. Celkově při větším sklonu nástroje jsou výsledné síly menší.



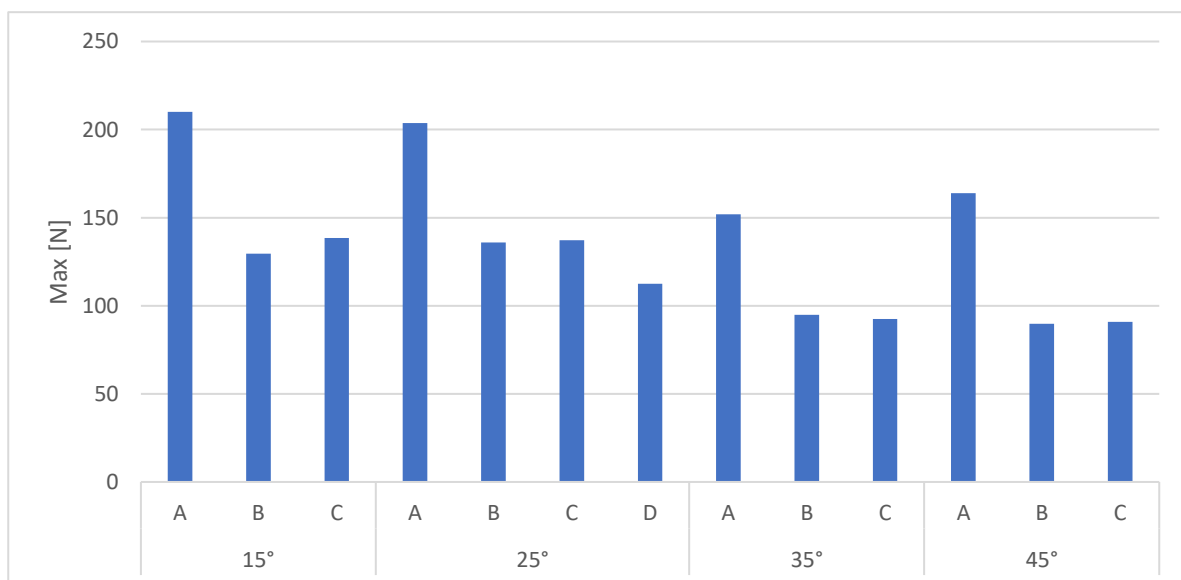
Obr. 7.2 Graf průměrů výsledných sil pro úhly  $\alpha$ , proložený polynomem 2. stupně.

Z grafu 7.2 je patrné, že výsledné síly se zvětšujícím se úhlem sklonu nástroje klesají podle křivky polynomu 2. stupně s rovnicí uvedenou v grafu 7.2. Body v grafu jsou průměrné hodnoty všech výsledných sil pro tyto úhly. Odchytky byly patrně způsobeny malými rozdíly v průřezu třísky a přesností měření.



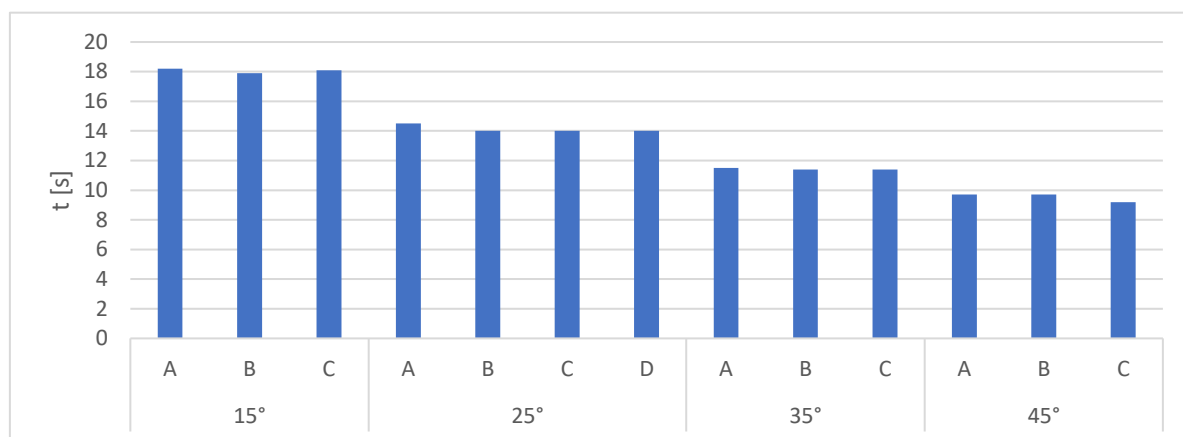
Obr. 7.3 Graf závislosti směrodatné odchytky výsledné síly na jednotlivých sklonech nástroje.

Z grafu 7.3 je patrné, že směrodatné odchytky jsou velikostně pro všechny úhly přibližně stejné až na úhel 25°, kde došlo pravděpodobně k rozkmitání nástroje vůči obrobku.



Obr. 7.4 Graf nejvyšších hodnot naměřených sil pro jednotlivé sklony nástroje.

Maxima výsledných sil, viz graf 7.4, jsou v podobném poměru jako střední hodnoty výsledné síly. Nevyšší síla byla 210 N.

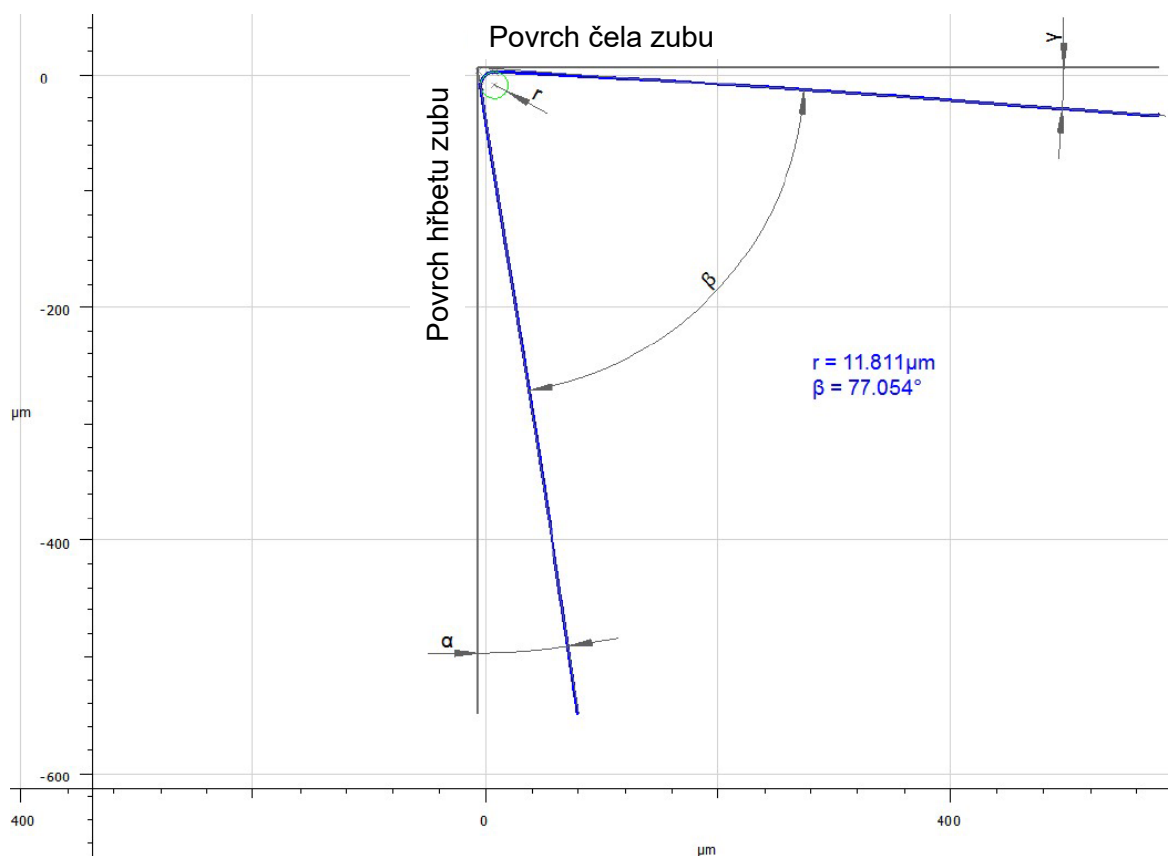


Obr. 7.5 Graf délky časových úseků kontaktu nástroje s obrobkem.

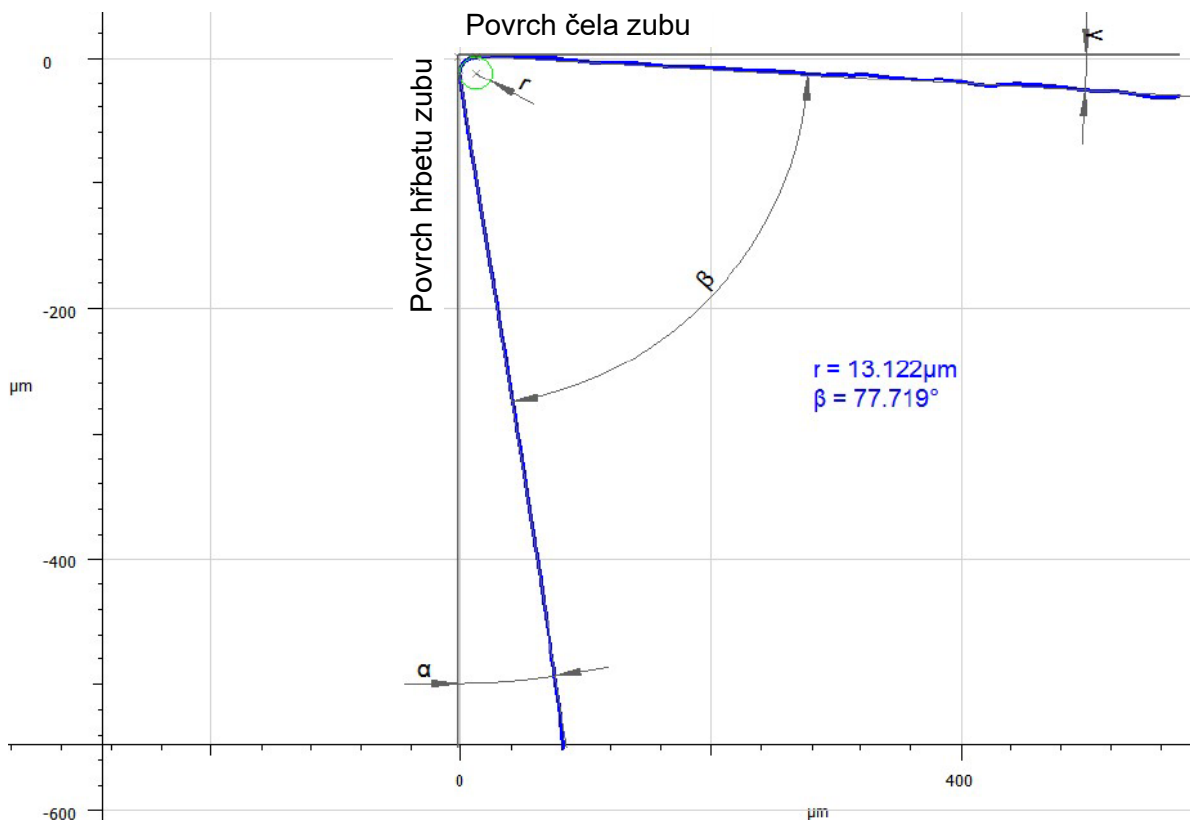
V grafu 7.5 jsou zobrazeny časy od dotyku nástroje s obrobkem do konce úseku obrábění. Pro zachování stejného posuvu na zub byly zvyšovány otáčky a posuvová rychlost, tím pádem došlo ke zkrácení strojního času.

## 7.2 Vyhodnocení opotřebení nástroje

Opotřebení nástroje bylo hodnoceno optickou metodou. K měření byly použity přístroje Alicona InfiniteFocus a Alicona EdgeMaster. Měření bylo provedeno v 50-ti řezech na břitu zubu a to před obráběním a po obrábění. Profil břitu zubu před obráběním je vidět na obrázku 7.6.



Obr. 7.6 Profil břitu zubu před obráběním.



Obr. 7.7 Profil břitu zuby po obrábění.

Obrázek 7.7 ukazuje profil zuby po obrábění, sledovanými parametry byly poloměr zaoblení ostří zuby  $r$ , úhel hřbetu zuby  $\alpha$ , úhel břitu zuby  $\beta$  a úhel čela zuby  $\gamma$ . V tabulce 7.1 jsou porovnány tyto průměry těchto hodnot ve zmíněných 50-ti řezech na břit zuby.

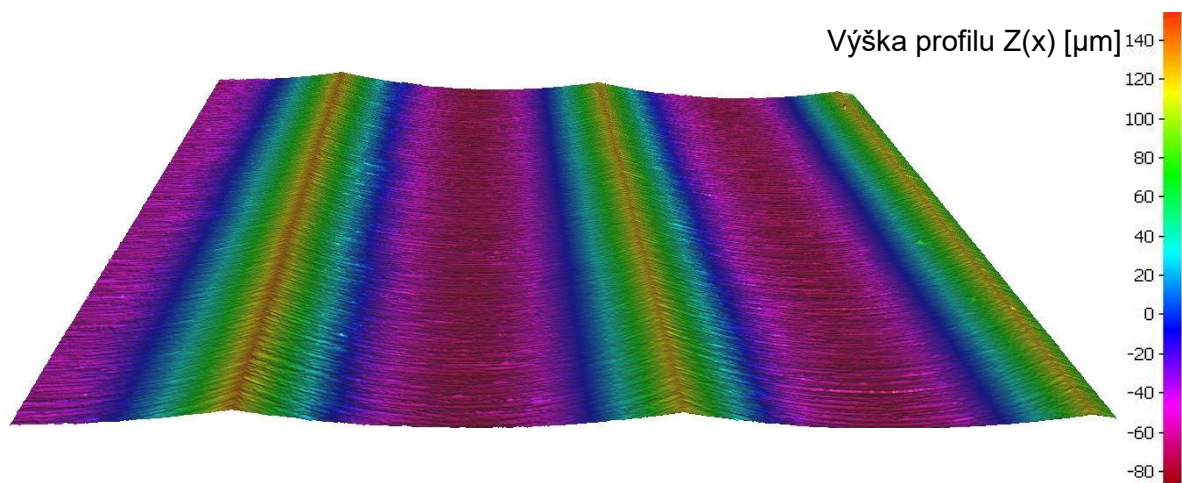
Tabulka 7.1 Porovnání hodnot před obráběním a po obrábění.

Symbol	Definice	Před obráběním	Po obrábění (průměr)	Po obrábění (max. hodnota)
$r$ [ $\mu\text{m}$ ]	Poloměr zaoblení ostří zuby	11,811	11,826	13,46
$\alpha$ [°]	Úhel hřbetu zuby	8,862	8,832	
$\beta$ [°]	Úhel břitu zuby	77,054	77,170	
$\gamma$ [°]	Úhel čela zuby	4,054	3,998	

Z těchto hodnot vyplývá, že opotřebení nástroje po provedení experimentu bylo minimální, na první pohled nepostřehnutelné a pro jeho přesnější měření by bylo potřeba více experimentů.

### 7.3 Vyhodnocení drsnosti obrobeného povrchu

Již na první pohled (viz obr 7.8) lze vidět, že na výslednou drsnost povrchu má převládající vliv tvar frézy.



Obr. 7.8 zobrazení povrchu po obrobení.

Drsnost povrchu byla hodnocena průměrnou aritmetickou úchytkou posuzovaného profilu  $R_a$ , která se vypočte vztahem

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx [\mu\text{m}] \quad (5.1)$$

kde:  $l_r$  [m] základní délka vyhodnocovaného profilu

$Z(x)$  [ $\mu\text{m}$ ] výška posuzovaného profilu [13].

Při bočním kroku frézy 6 mm dosahují rozdíly výšky profilu přibližně 230  $\mu\text{m}$  a aritmetická úchytká  $R_a$  přes 50  $\mu\text{m}$ , což je nepřijatelné. Lepší drsnosti povrchu by bylo možné dosáhnout zkrácením bočního kroku, volbou jiné frézy nebo následným broušením.

---

## 8 NÁVRHY DALŠÍCH EXPERIMENTŮ

Tato kapitola se zabývá návrhem dalších experimentů, které nebyly realizovány.

### 8.1 Změna frekvence měření

Při provedeném experimentu byla frekvence měření 10 Hz a počet záběrů zubů frézy 71–140 za sekundu. Z toho vyplývá, že frekvence je pro zobrazení všech záběrů zubů v grafu a zjištění měrné řezné síly nedostatečná. Pro dosažení lepších výsledků by byla potřeba frekvence vyšší než počet záběrů zubů a neměla by být násobkem počtu záběrů zubů.

### 8.2 Měření krouticího momentu nástroje

Další možností pro měření měrných řezných sil by bylo doplnit stroj pro měření krouticího momentu nástroje. Nebo by bylo možné měřit tuto veličinu přibližně z proudu hnacího elektromotoru s odečtem ztrát způsobených převody.

### 8.3 Zjištění opotřebení nástroje

Pro lepší stanovení trvanlivosti nástroje by bylo potřeba provést větší počet obráběcích operací pro každý úhel sklonu nástroje. Zároveň by bylo možné zopakovat tento pokus s použitím řezné kapaliny a porovnat výslednou velikost sil, opotřebení nástroje a drsnost povrchu obrobku.

---

## ZÁVĚR

Tato práce se zabývá po všeobecném rozboru těžkoobrobitelných slitin obrábění slitiny Ti6Al4V–ELI tvarovou frézou při různém nastavení stroje. Bylo dosaženo následujících výsledků:

- Z teoretického rozboru vyplývá, že těžkoobrobitelné slitiny kladou vysoké nároky na obrábění. Z toho důvodu byly stanoveny zásady pro dosažení lepších výsledků při obrábění těchto slitin.
- Výsledné síly při prvním průjezdu pro každý úhel sklonu frézy jsou přibližně o 60–90% větší oproti silám při dalších průjezdech, patrně z důvodu záběhu a otěru povlaku.
- S rostoucím úhlem sklonu nástroje klesají průměry výsledných sil (měřených při stejném sklonu nástroje) podle křivky polynomu 2. stupně.
- Opotřebením nástroje po provedení experimentu bylo zanedbatelné.
- Drsnost povrchu po obrábění byla nepřijatelná a povrch obrobku vyžaduje další dokončovací operaci.

---

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Lepší obrábění těžko obrobitelných slitin. In: *Technický týdeník* [online]. 2008 [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/lepsi-obrabeni-tezko-obrobitelnych-slitin\\_14833.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/lepsi-obrabeni-tezko-obrobitelnych-slitin_14833.html)
- [2] KOUŘIL, Petr. *Obrábění titanových a těžkoobrobitelných slitin frézováním* [online]. Brno, 2012, 49 s. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=54952](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54952). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [3] LEYENS, Christoph a M. PETERS. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, xix, 513 s. : il., grafy. ISBN 3-527-30534-3.
- [4] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3.
- [5] POLLOCK, Tresa a Sammy TIN. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties. *Journal of Propulsion and Power* [online]. 2006, **22**(2), 361-374 [cit. 2021-03-23]. ISSN 0748-4658. Dostupné z: doi:10.2514/1.18239
- [6] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. české vydání. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. ISBN 91-972-2994-6.
- [7] SHAW, Milton Clayton. *Metal cutting principles*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005, xix, 651 s. : il., čb. fot. ISBN 0-19-514206-3.
- [8] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [9] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 270 s. : il., tabulky, grafy, schémata. ISBN 80-214-3068-0.
- [10] HUMÁR, Anton. *Technologie I.: Technologie obrábění – 1. část* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/dtb/eopory.php>
- [11] Arcam EBM Q10 plus. *Misan s.r.o.* [online]. 2019 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.misan.cz/arcam/katalog-detail/q10plus-arcam-ebm-q10plus/>
- [12] ZLÁMAL, Pavel. *Projekt lehké obrobny v TOS Kuřim - OS, a.s. - frézařské pracoviště* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2008 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/1803>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
- [13] SVOBODA, Pavel. *Základy konstruování*. Vyd. 3., upr. a dopl. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-7204-633-1.



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A, B, C, D	–	Značení průjezdů
a, b, c, h	mm	Značení rozměrů obr. 4.5
$A_D$	$\text{mm}^2$	Jmenovitý průřez třísky
$a_e$	mm	Šířka záběru
$a_p$	mm	Hloubka záběru
$b_D$	mm	Jmenovitá šířka třísky
BCC		Prostorově středěná kubická krystalická mřížka
D	mm	Průměr frézy
$D_f$	mm	Průměr zaoblení nástroje
$D_{fef}$	mm	Maximální průměr záběru frézy
EBM		Technologický způsob výroby (electron beam melting)
ELI		Velmi malé množství nečistot (extra low interstitials)
FCC		Plošně středěná kubická krystalická mřížka
$F_c$	N	Celková řezná síla
$F_f', F_c', F_p'$	N	Vektory přepočtených sil
$F_v$	N	Výsledná síla
$f_z$	mm	Posuv na zub
$F_x, F_y, F_z$	N	Vektory naměřených sil
$h_D$	mm	Jmenovitá tloušťka třísky
HCP		Hexagonální těsně uspořádaná krystalická mřížka
$k_c$	MPa	Měrná řezná síla
$l_r$	m	Základní délka vyhodnocovaného profilu
m, n, o	mm	Značení rozměrů obr. 4.4
n	$\text{min}^{-1}$	Počet otáček za minutu

Ra	$\mu\text{m}$	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
r	$\mu\text{m}$	Poloměr zaoblení břitu zubu
r <sub>f</sub>	mm	Poloměr zaoblení frézy
R <sub>m</sub>	MPa	Mez pevnosti v tahu
R <sub>p0,2</sub>	MPa	Mez kluzu
t	s	Čas
v <sub>c</sub>	m.min <sup>-1</sup>	Řezná rychlost
v <sub>e</sub>	m.min <sup>-1</sup>	Výsledná rychlost
v <sub>f</sub>	m.min <sup>-1</sup>	Posuvová rychlost
z	–	Počet zubů frézy
Z(x)	$\mu\text{m}$	Výška posuzovaného profilu
$\alpha$	– /°	Tuhá fáze / Úhel sklonu nástroje / Úhel hřbetu zubu
$\beta$	– /°	Tuhý roztok / Úhel břitu zubu
$\gamma$	°	Úhel čela zubu
$\kappa_r$	°	Úhel nastavení hlavního ostří
$\sigma$	N	Směrodatná odchylka sil
$\varphi$	°	Úhel posuvového pohybu