

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Progresivní hrubovací strategie v CAM**

**software**

**Diplomová práce**

**Autor práce :** Bc. Adam Kunzo

**Studijní obor:** Výrobní a materiálové inženýrství

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Tomíček, Ph.D

**Praha 2016**

Vysoká škola: ČVUT v Praze  
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Fakulta: strojní  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Adama Kunzu**

obor Výrobní a materiálové inženýrství

Název: **Progressivní hrubovací strategie v CAM software**

Název anglicky: **Progressive roughing strategies in CAM software**

### Zásady pro vypracování:

1. Vývoj CAM software v oblasti hrubování
2. Nové nástroje optimalizace hrubování
3. Návrh zkušebního tělesa pro hrubovací strategie
4. Experimentální měření při hrubování
5. Vyhodnocení vlastností procesu hrubování

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 30. 10. 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 8. 1. 2016

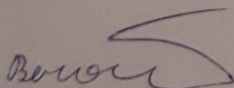
Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

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

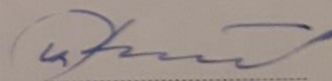
Zadání diplomové práce převzal dne: 5. 10. 2015



.....  
Diplomant



.....  
Vedoucí ústavu



.....  
Děkan

V Praze

dne 27. 10. 2015

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Autor</b>	Bc. Adam Kunzo
<b>Fakulta a ústav</b>	Fakulta strojní ČVUT, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
<b>Název práce</b>	Progresivní hrubovací strategie v CAM software
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Jan Tomíček, Ph.D
<b>Počet stran, obrázků, tabulek a grafů</b>	82, 44, 11, 5
<b>Klíčová slova</b>	Adaptivní obrábění, Vortex, PowerMill, CAD/CAM
<b>Charakteristika</b>	V diplomové práci jsou popsány obecně technologické podmínky frézování. Dále jsou popsány CAD/CAM softwary a jejich optimalizační nástroje pro hrubování. Praktická část je zaměřena na frézovací experiment za účelem porovnání třech softwarů.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUNZO, A. *Progresivní hrubovací strategie v CAM software*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016. 80 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

## SUMMARY OF MASTER THESIS

<b>Author</b>	Bc. Adam Kunzo
<b>Faculty and department</b>	Faculty of mechanical Engineering department of Machining, Process Planning and Metrology
<b>Title of the work</b>	Progressive roughing strategies in CAM software
<b>Supervisor</b>	Ing. Jan Tomíček, Ph.D
<b>Number of pages,</b>	80, 45, 11, 5
<b>Tables and charts</b>	
<b>Key words</b>	Adaptive clearing, Vortex, TrueMill, CAD/CAM
<b>Brief description</b>	This master's thesis focuses on a machining conditions of a milling, a description of CAD/CAM softwares and their optimization tools for roughing. The practical part of this thesis is concern with a milling experiment comparing for 3 relative softwares.

## **Prohlášení**

**Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu použité literatury.**

**V Praze dne .....**

\_\_\_\_\_

**podpis**

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Tomíčkoví, Ph.D za odborné vedení při zpracování diplomové práce, za jeho cenné rady, připomínky a za vstřícný přístup při konzultacích.

Dále bych rád poděkoval Pavlu Černému z firmy CKP Chrudim a.s. za řezné nástroje pro můj experiment a Tomáši Vrbickému z firmy 3E Praha Engineering a.s. za zapůjčení softwaru SurfCam.

## Obsah

1. Úvod.....	10
2. Technologické podmínky pro obrábění .....	11
2.1. Obrábění z hlediska množství odebraného materiálu .....	11
2.2 Řezné síly při frézování .....	12
2.2.1 Výpočet řezné síly .....	13
2.2.2 Přímé měření řezné síly .....	14
2.3 Požadavky na frézovací CNC obráběcí stroje.....	15
2.4 Požadavky na frézovací nástroje.....	18
2.4.1 Materiál řezného nástroje .....	18
2.4.2 Konstrukční řešení nástroje .....	21
3. CAD/CAM Software .....	23
3.1 Vývoj CAM software v oblasti hrubování .....	23
3.2 Popis použitých softwarů .....	28
3.2.1 HSMWorks.....	28
3.2.2 PowerMill .....	29
3.2.3 SurfCam.....	30
4. Experimentální část .....	31
4.1 Návrh zkušebních těles .....	31
4.2 Technologické podmínky pro obrábění .....	33
4.2.1 Materiál obrobku .....	33
4.2.2 Řezný nástroj .....	34
4.2.3 Obráběcí stroj .....	35
4.2.4 Upnutí polotovaru a nástrojů .....	37
4.2.5 Procesní kapalina.....	37
4.2.6 Řezné podmínky .....	38
4.3 Příprava partprogramů a NC kódů .....	40
4.3.1 HSMWorks.....	40
4.3.2 PowerMill .....	42
4.3.3 SurfCam.....	44
5. Výsledky experimentu a jejich vyhodnocení .....	47



5.1 Řezné síly .....	47
5.1.1 Hodnoty řezných sil.....	50
5.1.2 Vizualní porovnání řezných sil.....	62
5.2 Opatření řezných nástrojů .....	68
5.3 Vyhodnocení času obrábění .....	69
6. Závěr.....	72

# 1. Úvod

Ve strojírenském průmyslu je vždy co zlepšovat. Oblast obrábění se ubírá směrem zvyšováním produktivity výroby, snižováním času produkce a úsporou finančních a energetických zdrojů. CAM software má za úkol tyto náročné podmínky naplňovat. Hrubování zabírá v obráběcím procesu velice důležitou roli. Jedná se totiž o první operaci v průběhu obráběcího procesu, která má jasný úkol. Kromě již zmíněných podmínek musí odebrat co nejvíce materiálu v co nejkratším čase, zajistit aby samotné obrábění bylo bezpečné a plynulé. V neposlední řadě mají hrubovací operace za úkol připravit povrch obrobku pro další obrábění. V minulosti skloubit tyto požadavky do hrubovací strategie byl problém. Samotné dráhy se totiž příliš soustředily na obráběnou geometrii, ale méně na ostatní technologické podmínky, zejména na potřeby obráběcího nástroje. V poslední době se derou do popředí tzv. *inteligentní hrubovací strategie*, které berou v potaz potřeby obráběcích nástrojů a jsou schopny jim přizpůsobit generování obráběcí dráhy.

Tato diplomová práce se zabývá porovnáním tří progresivních hrubovacích strategií z různých CAM softwarů z oblasti frézování.

## 2. Technologické podmínky pro obrábění

### 2.1. Obrábění z hlediska množství odebraného materiálu

Z hlediska množství odebraného materiálu lze třískové obrábění rozdělit na hrubování, poločisté obrábění a dokončování [1].

**Hrubování** - zaujímá prvotní operaci v obráběcím procesu, ve kterém tedy hraje velice důležitou roli. Základním požadavkem, který je na hrubování kladen, je odebrání co možná největšího objemu přebytečného materiálu v co možná nejkratším čase. Pro splnění tohoto požadavku je nutné zaměřit se na technologické podmínky, které vstupují do procesu hrubování. Správná volba obráběcího stroje, nástroje a řezných podmínek je zásadní pro naplnění požadavků z hlediska produktivity a ekonomičnosti hrubovacího procesu.

**Poločisté obrábění** – toto obrábění má za úkol odstranit přebytečný materiál v podobě schodů a jiných výstupků na povrchu obrobku, které zde vznikly při hrubování. Po této operaci by přídavky na obrobku měli být sjednoceny na přibližně stejnou hodnotu a povrch součásti tak připravený na dokončování. V CAM softwarech bývá poločisté obrábění často integrováno přímo do hrubování.

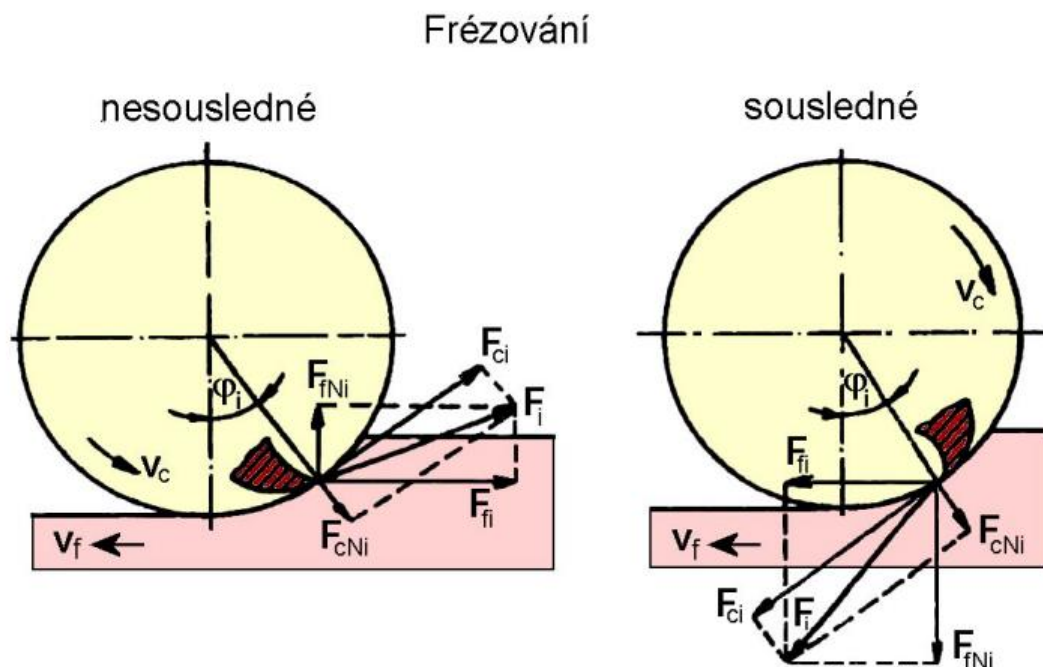
**Dokončování** – cílem této operace je vytvoření finálního povrchu obrobku s ohledem na požadovanou přesnost a drsnost. Při dokončování dochází k velice malým úběrům materiálu s výslednou drsností povrchu Ra přibližně 1,6 až 6,3  $\mu\text{m}$  při přesnosti rozměrů IT 9 až 11. Při jemném obrábění je možno dosáhnout drsnosti Ra 0,2 až 1,6  $\mu\text{m}$  při přesnosti rozměrů IT 5 až 8 [2].

## 2.2 Řezné síly při frézování

Řezné síly jsou doprovodným jevem jakéhokoliv obrábění. Obráběný materiál klade břitu řezného nástroje řezný odpor. Překonání řezného odporu řeznou silou  $F$  je podmínkou pro samotné obrábění.

Poznání silových poměrů při obráběcím procesu nám umožňuje získat přehled o mechanickém namáhání obráběcí soustavy, díky čemuž jsme schopni navrhnout technologickou soustavu z hlediska pevnosti, tuhosti a stability obráběcího procesu. Další důležité informace, které nám řezné síly poskytují, se využívají pro určení příkonu obráběcího stroje, posuzování tepelných jevů, které se významně projevují na životnosti nástroje a tak i na celkové ekonomické bilanci třískového obrábění [3].

Pro názorný přehled řezných sil při frézování lze vycházet ze záběru jednoho břitu válcové frézy. Takové zobrazení poskytuje obrázek 1, který zobrazuje silové působení při sousledném a nesousledném frézování.



Obr. 1 Řezné síly při nesousledném a sousledném frézování [5]

$F_i$  – celková řezná síla

$F_{ci}$  – řezná síla

$F_{cNi}$  – kolmá řezná síla

$F_{fi}$  – posuvová síla

$F_{fNi}$  – kolmá posuvová síla

$\varphi_i$  – úhel určující polohu břitu

Řezná síla  $F_{ci}$  se vyjádří na základě měrné řezné síly  $k_{ci}$  a průřezů třísky  $A_{Di}$  [5]:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i [N] \quad (1.1)$$

Měrná řezná síla  $k_{ci}$  se vyjádří pomocí vztahu (5):

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} [MPa] \quad (1.2)$$

kde:  $C_{Fc}$  [-] – konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu,

$x$  [-] – exponent vlivu tloušťky třísky.

Po dosazení vztahu (1.2) do (1.1) a úpravě dostaneme [5]:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i [N] \quad (1.3)$$

Řezné síly je možno teoreticky vypočítat nebo změřit dynamometrem.

### 2.2.1 Výpočet řezné síly

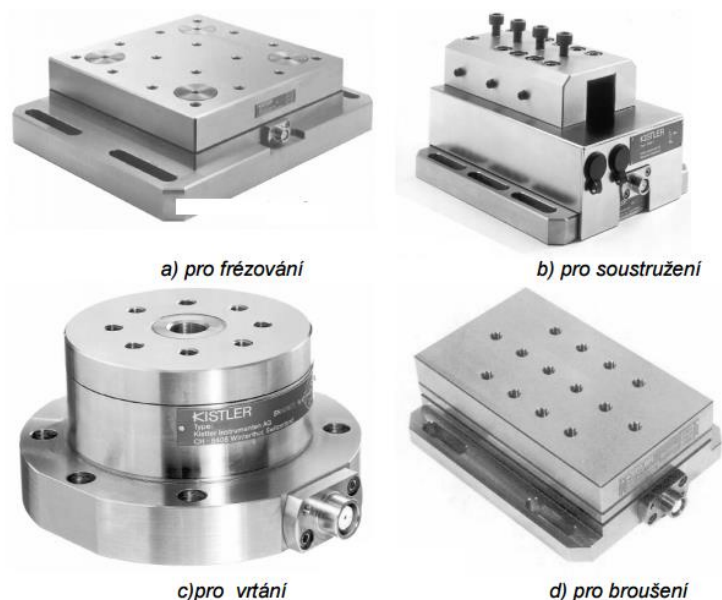
Řeznou sílu počítáme obvykle pomocí složek řezné síly. Nejvýznamnější složkou řezné síly je tangenciální řezná síla, která se určuje nejčastěji. Tato síla ovlivňuje vzniklý krouticí moment a tím i potřebný příkon pro obráběcí proces. Výpočet řezné síly, resp. jejích dalších složek se provádí podle výše uvedených vztahů [4].

## 2.2.2 Přímé měření řezné síly

Přímé měření složek řezných sil se zakládá na měření deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek během obráběcího procesu za použití dynamometrů. Dynamometr je přístroj na měření řezných sil a krouticích momentů. Má schopnost měření sledované veličiny ve zvoleném rozsahu s maximální přesností, musí zaručit stálost naměřených hodnot s časem včetně její reprodukovatelnosti [3].

Rozdělení dynamometrů lze provést dle následujících hledisek [3]:

- Podle počtu měřených složek sil řezání jde o dynamometry jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření točivých momentů.
- Podle metody obrábění existují dynamometry pro soustružení, frézování, vrtání, broušení, případně univerzální.
- Podle aplikované metody měření existují dynamometry mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické nebo optické.
- Podle konstrukce se dělí dle způsobu upnutí nástroje na deskové a rotační.



Obr. 2 Piezoelektrické Dynamometry KISTLER pro měření složek řezné síly [3]

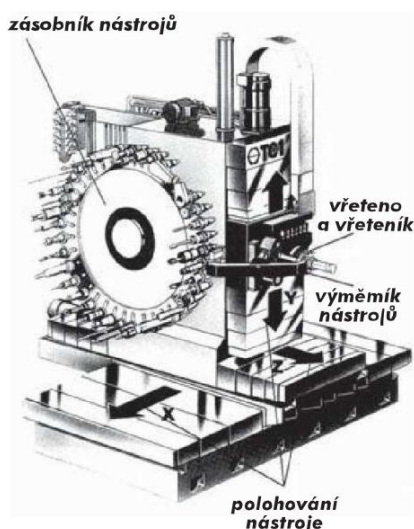
Deskový dynamometr umožňuje snímat řezné síly ve třech osách, které jsou dány souřadným systémem dynamometru. Používá se pro upnutí soustružnických nožů a držáků břitových destiček. Naopak rotační dynamometr se používá pro upnutí rotačních nástrojů a má tu výhodu, že dokáže měřit řezné síly i ve směru tangenciálním a radiálním.

Řezná síla je dynamickým jevem. Při obrábění v závislosti na čase její okamžitá velikost kolísá. Je to způsobeno zejména drsností obráběné plochy, rozptylem mechanických vlastností obráběného materiálu a mechanikou tvorby třísky. Proto při experimentech pro zjištění řezných sil je vhodné pro věrohodnost naměřených výsledků experiment opakovat [4].

### **2.3 Požadavky na frézovací CNC obráběcí stroje**

Frézovacích strojů existuje na trhu široká škála s různým stupněm automatizace. Tato kapitola bude zaměřena čistě na numericky řízené obráběcí stroje a na požadavky pro jejich konstrukci.

Číslicově řízený obráběcí stroj má většinou šest hlavních prvků [6]:



*Obr. 3 Hlavní části číslicově řízeného stroje [6]*

1. polohování nástroje (obrobku)
2. vřeteno s vřeteníkem
3. zásobník a výměník nástrojů
4. zásobník (výměník) obrobků
5. přívod média
6. ochranné kryty

Každý z těchto prvků má svoje speciální požadavky na konstrukci, přičemž pro hrubovací operace je nejdůležitější polohování nástroje či obrobku a vřeteno s vřeteníkem.

#### 1. Polohování nástroje nebo obrobku

- *Rám s vodicími plochami, stůl [6]*
  - vysoká statická a dynamická tuhost
  - dobrý odvod třísek
- *Posuvová soustava [6]*
  - vyvinutí dostatečně velké síly k překonání řezných, setrvačných a třecích sil v celém rozsahu pracovních pohybů
  - stabilita pohybů při působení vnějších vlivů
  - maximální tuhost posuvového systému
  - minimální vůle v kinematickém řetězci
  - zajištění plynulého pohybu v celém rozsahu pracovních pohybů

Pro hrubovací operace je potřeba vyzdvihnout zejména vysokou statickou a dynamickou tuhost. Tyto vlastnosti zajišťují zachování vzájemné polohy mezi nástrojem a obrobkem a utlumují jakékoliv formy chvění.

Každé obrábění je doprovázeno odpadním produktem – třískami. Zejména pak pokud se má mluvit o produktivním hrubování, je potřeba tuto záležitost řešit. Velké množství horkých třísek musí být odstraněno a moderní obráběcí stroje tak bývají vybaveny různými skluzy a často i třískovými dopravníky, které odvádí třísky do vyměnitelných nádob.



## 2. Vřeteno s vřeteníkem

Vřeteno představuje velmi důležitý prvek ve skladbě obráběcího stroje, a proto jsou na konstrukční provedení kladeny vysoké požadavky:

- *Uložení vřetena [6]*
  - maximální tuhost
  - přesnost chodu
  - otáčková schopnost
  - teplotní stabilita
  
- *Upínací systémy nástrojů [6]*
  - spolehlivé upnutí a uvolnění
  - opakovaná přesnost upnutí
  - spolehlivý přívod procesní kapaliny
  
- *Náhon vřetena [6]*
  - dostatečný regulační rozsah
  - zabezpečení potřebného řezného výkonu
  - možnost regulace otáček
  - rychlá reverzace a zabrždění pohonu
  - polohování vřetena a diagnostika poruch

Pro hrubovací operace je výkon vřetene obráběcího stroje velice důležitým parametrem. U obráběcích strojů předurčených pro hrubovací práce se výkonnost stroje posuzuje podle měrné výkonnosti obrábění  $Q$  [ $kg \cdot s^{-1}$ ], která reprezentuje množství odebraného materiálu za jednotku času. Nebo podle objemové výkonnosti obrábění  $Q$  [ $mm^3 \cdot s^{-1}$ ], která reprezentuje objem odebraného materiálu v čase.

Přitom platí, že čím je vyšší měrná či objemová výkonnost obrábění, tím vyšší je potřebný výkon. U strojů s nedostatečným výkonem a krouticím momentem dochází ke kolísání tloušťky třísky, což má za následek nestabilitu chování a výkonnosti stroje [7].

## **2.4 Požadavky na frézovací nástroje**

Produktivní obrábění není zajištěno pouze kvalitním strojem, ale i správně zvoleným nástrojem. Je zapotřebí orientovat se v široké škále nástrojů podle různých kritérií:

- Řezné materiály
- Konstrukční řešení nástroje
- Geometrie nástroje

### **2.4.1 Materiál řezného nástroje**

Současné řezné nástroje pro strojní obrábění jsou vyráběny z rozmanitých materiálů. Od nástrojových ocelí (zejména rychlořezných) přes slinuté karbidy, cermety, řeznou keramiku až po moderní materiály typu syntetický diamant a kubický nitrid boru. Každý z těchto materiálů má svoje specifické využití, které je vymezeno jejich fyzikálními, chemickými, tepelnými a mechanickými vlastnostmi. Na výběr materiálu řezného nástroje má dále veliký vliv jeho cena.

Požadavky kladené na materiál břitu nástroje jsou následující [8]:

- vysoká tvrdost a pevnost při pracovních teplotách, zajišťující odolnost proti deformacím a abrazivnímu opotřebení
- vysoká houževnatost, eliminující křehké porušení břitu
- chemická stálost, zaručující odolnost proti difuzi a oxidaci
- odolnost proti teplotnímu rázu
- snadná zpracovatelnost
- dostupnost a přijatelná cena

Požadavky na nástroje jsou značně protichůdné, neexistuje nástrojový materiál, který by všechny tyto vlastnosti splnil. Proto je volba správného řezného nástroje z hlediska optimalizace řezného procesu velice důležitá a musí být provedena v souladu s ostatními technologickými podmínkami, zejména obráběným materiálem.

Ze škály řezných materiálů, které nám trh s nástroji nabízí, se nejčastěji používají nástroje ze slinutých karbidů nebo z rychlořezných ocelí. Hrubovací obrábění je totiž doprovázeno velkými řeznými silami a přerušovaným řezem. To vše vyžaduje vysokou houževnatost řezného nástroje. Dalším důvodem je fakt, že při hrubování nejsou kladeny vysoké požadavky na přesnost, jelikož obrábění probíhá ve většině případů s přídavkem. Tyto řezné materiály navíc mají přijatelnější cenu a dostupnost, v porovnání s ostatními řeznými materiály jako je keramika, kubický nitrid bóru nebo diamant.

### **Slinuté karbidy**

Slinuté karbidy jsou nejpoužívanějším nástrojovým materiálům vůbec. Vyrábějí se technologií práškové metalurgie, která se zabývá přípravou prášků odpovídajících karbidů a pojících kovů, jejich smísením v patřičných poměrech, lisováním směsi a slinováním výlisků. Tyto polotovary se poté upraví do požadovaného tvaru a následně povlakuji [8].

Používané karbidy jsou velmi tvrdé částice. Mezi nejdůležitější patří karbid wolframu (WC), karbid titanu (TiC), karbid tantalu (TaC) a karbid niobu (NbC). Jako pojivo se většinou používá kobalt (Co) [8].

Nejvhodnější rozdělení slinutých karbidů je podle použití na obráběný materiál. Nástroje jsou označeny písmenem, které označuje vhodnost pro obrábění určité skupiny materiálů a číselným kódem, který určuje poměr mezi tvrdostí a houževnatostí.

Tab. 1 Rozdělení nástrojů ze slinutých karbidů do skupin [8]

Skupina	Podskupiny	Základní chemické složení	Efektivní aplikace pro obráběný materiál
<b>P</b>	P01, P05, P10, P15, P20, P25, P30, P35, P40, P45, P50	WC (30÷82)% +TiC (8÷64)% +Co (5÷17)% + (TaC.NbC)	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající dlouhou, plynulou třísku: Nelegovaná, nízkolegovaná a vysoce legovaná ocel, litá ocel, automátová ocel, nástrojová ocel, feritická a martenzitická korozivzdorná ocel.
<b>M</b>	M01, M05, M10, M15, M20, M25, M30, M35, M40	WC (79÷84)% +TiC (5÷10)% +TaC.NbC (4÷7)% +Co (6÷15)%	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající dlouhou a střední třísku: Austenitická a feriticko austenitická ocel, korozivzdorná, žáruvzdorná, žárovevná, nemagnetická a otěruvzdorná ocel.
<b>K</b>	K01, K05, K10, K15, K20, K25, K30, K35, K40	WC (87÷92)% +Co (4÷12)% + (TaC.NbC)	Slinuté karbidy pro obrábění materiálů, dávající krátkou, drobnou třísku: Nelegovaná i legovaná šedá litina, tvárná litina, temperovaná litina.
<b>N</b>	N01, N05, N10, N15, N20, N25, N30		Slinuté karbidy pro obrábění neželezných materiálů: Slitiny mědi a hliníku, duroplasty, fibry, plasty s vlákninou, tvrdá guma.
<b>S</b>	S01, S05, S10, S15, S20, S25, S30		Slinuté karbidy pro obrábění: Žáruvzdorné slitiny na bázi Fe, superslitiny na bázi Ni nebo Co, Titanu, Ti slitiny.
<b>H</b>	H01, H05, H10, H15, H20, H25, H30		Slinuté karbidy pro obrábění: Zušlechtnuté oceli s pevností nad 1500 MPa, kalené oceli HRC 48÷60, tvrzené kokilové litiny HSh 55÷58

Výkonnost nástrojů ze slinutých karbidů lze zvýšit povlakováním, které umožňuje podstatné zvýšení řezných rychlostí a trvanlivosti břítu. V dnešní době jsou téměř všechny základní druhy slinutých karbidů opatřeny povlakem. Nejdůležitější materiály pro povlakování jsou: karbid titanu (TiC), nitrid titanu (TiN), oxid hlinitý (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a karbonitrid titanu (TiCN), nitrid zirkonu (ZrN) [9].

### Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli jsou speciální skupinou nástrojových ocelí a podle chemického složení je lze rozdělit do třech základních skupin [10]:

- oceli s převažujícím obsahem wolframu,
- oceli s převažujícím obsahem molybdenu,
- oceli komplexně legované prvky wolframu + molybdenu a vanadu.

V porovnání s ostatními řeznými materiály mají rychlořezné oceli výbornou houževnatost, odolnost proti adheznímu opotřebení a vysokou lomovou pevnost. Nevýhodou těchto ocelí je nízká popouštěcí teplota asi 600°C. Proto jsou používány pro výkonné řezné nástroje vystavované nárazům a při přerušovaném řezu. Další nespornou výhodou tohoto řezného materiálu je nízká výrobní cena [10].

Obecně lze s nástroji z rychlořezných ocelí obrábět široké spektrum kovových i nekovových materiálů, s výjimkou tvrdých a silně abrazivních materiálů [10].

Nízké mechanické vlastnosti rychlořezných ocelí lze vylepšit povlakováním. Dosud nejčastěji je aplikován povlak TiN, který se aplikuje PVD procesem. Trvanlivost bříty lze zlepšit povlakem až o 200%, což je nízká hodnota v porovnání s nástroji ze slinutých karbidů [10].

## **2.4.2 Konstrukční řešení nástroje**

Konstrukční řešení nástroje zahrnuje jednotlivé konstrukční prvky, které se na nástroji vyskytují. Z hlediska hrubování jsou důležité zejména tyto prvky nástroje: řezná drážka, utvařeče třísek, upínací stopka nebo přívod procesní kapaliny [11].

### **Řezná drážka**

Úkolem řezné drážky je utváření a odvod třísek. Z hlediska odvodu třísek je důležité, aby řezná drážka byla co největší. Na druhou stranu je potřeba si uvědomit, že s rostoucí velikostí řezné drážky klesá pevnost a tuhost řezného nástroje. Pro hrubování je řezná drážka obzvláště důležitým konstrukčním prvkem, jelikož hrubování je doprovázeno vysokým objemovým součinitelem třísky a vysokými požadavky na tuhost řezného nástroje [11].

### **Děliče a utvařeče třísek**

Úpravou hřbetního povrchu bříty lze dosáhnout dělení třísek. Děliče třísek umožňují rozdělit široké třísky na několik úzkých, čímž umožňují zvýšení výkonu obrábění. Utvařeče třísek se nejčastěji vytvářejí lisováním do vyměnitelných břitových destiček. Zajišťují výhodný typ utváření třísek s nízkým objemovým součinitelem [11].

Pro hrubování je důležité, aby vznikající třísky měly vhodný tvar a docházelo k jejich dělení. V opačném případě by se mohlo stát, že se třísky hromadily a nedocházelo by k jejich odstranění z místa řezu. Konkrétně u hrubování je toto problém, kvůli velké měrné výkonnosti obrábění.

### **Upínací část nástrojů**

Mezi hlavní požadavky na upínací část nástrojů patří [11]:

- Přenos krouticího momentu z držáku nástroje do nástroje
- vystředění nástroje (zabránění radiálnímu házení pro rotační nástroje)
- možnost snadné a rychlé výměny, často automatizované
- přívod procesní kapaliny do řezné části nástroje

Pro hrubovací operace je potřeba vyzdvihnout zejména požadavek na přenos krouticího momentu. Nástroje se upínají do držáku buď na principu tření, nebo pomocí tvarového konstrukčního řešení. Pro efektivní hrubování hlubokých nebo úzkých uzavřených kapes je důležité, aby nástroj měl zajištěn přívod procesní kapaliny, která často vede vnitřkem nástroje a je poté aplikována přímo do místa řezu pod vysokým tlakem. Tento způsob přívodu procesní kapaliny dokáže kromě chlazení zajistit i transport třísek v těžko dostupných oblastech.

### **3. CAD/CAM Software**

Zkratka CAx (Computer – aided technologies) je obecný výraz využívaný v počítačové terminologii pro konstrukční, analytickou nebo výrobní činnost. V minulosti převažoval trend, kdy CAD a CAM softwary byly rozděleny jako samostatné aplikace. To však přináší zřejmé nevýhody – přenos dat navíc, složitější správa dat, absence použití CAD nástrojů v CAM softwarech, které mohou být pro obrábění důležité. Nehledě na to, že uživatelům vzrůstají náklady na pořízení a školení dvou softwarů. Pokud bych měl vyzdvihnout výhodu použití CAM softwaru, jakožto samostatného produktu, může své uplatnění nalézt ve specializované výrobě, jakou je například obrábění uměleckých předloh.

V současné době se derou do popředí komplexní CAD/CAM softwary, které uživatelům poskytují počítačovou podporu jejich výroby od návrhů, přes konstrukci až po samotné obrábění. Mezi jednoznačné výhody těchto komplexních softwarů patří plná asociativita mezi konstrukcí a obráběním, jednotná správa dat nebo jednotná logika používání v rámci jednoho produktu. Všechny tyto výhody zvyšují efektivitu práce v těchto softwarech, snižují pořizovací náklady a náklady na školení.

#### **3.1 Vývoj CAM software v oblasti hrubování**

Historie vzniku CAM softwarů sahá až do 70. let minulého století a pojí se se snahou zproduktivnit výrobu v oblasti obrábění a umožnit výrobu součástí se složitými tvary. První CAM softwary se potýkaly s problémem nízké výpočetní kapacity tehdejších počítačů, navíc umožňovaly jen základní dvourozměrné obráběcí úlohy. S rozvojem osobních počítačů a číslicově řízených obráběcích strojů, přichází na trh v roce 1982 první CAD/CAM software GibbsCAM, který si zasloužil titul první software tohoto typu na bázi PC s opravdovým grafickým uživatelským rozhraním [14].

V současné době se na trhu vyskytuje široká škála CAD/CAM nebo CAM softwarů, které oproti ručnímu programování NC strojů přináší dvě základní výhody.

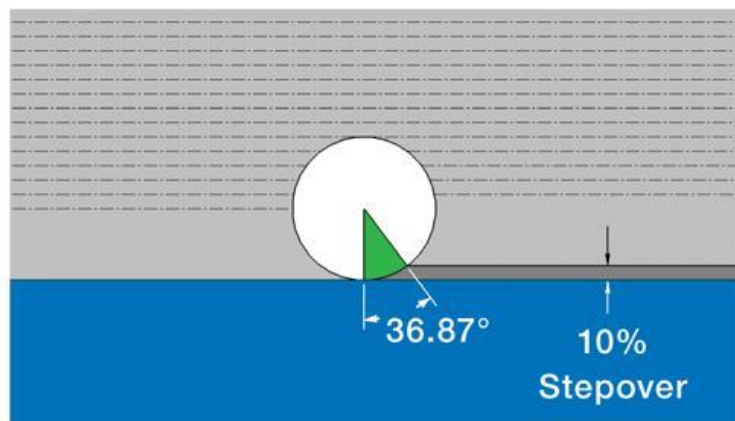
První nespornou výhodou je umožnění naprogramování tvarově složitých obrobků. Ruční programování umožňuje tvorbu jednoduché dráhy po základních geometrických útvarech, jako jsou přímky, kružnice, obdélníky atd. Používá se zejména pro 2D obráběcí operace jako je vrtání, srážení, tvorbu závitů, zahloubení, hrubování a začištění jednoduchých tvarů nebo při programování již předdefinovaných cyklů v řídicím systému obráběcího stroje. Pokud chceme obrábět například formy s tvarovými vložkami, nevyhneme se použití CAM softwaru. Při takovém obrábění je totiž potřeba generovat dráhy se změnou souřadnic ve všech osách, případně řídit najednou tři i více os obráběcího stroje.

Druhou důležitou výhodou CAD/CAM softwarů je optimalizace, resp. zvýšení produktivity obrábění. Výrobci těchto softwarů se předhání ve vývoji funkcí, které tyto důležité faktory naplňují a umožňují tak svým uživatelům snížit čas programování, dávají jim možnost rychlé aktualizace obráběcích drah při změně zadání a potlačují lidský faktor jakožto zdroj chyb. Samotná optimalizace obrábění může spočívat například v obrábění dle úhlu sklonu obráběných ploch, automatická detekce zbytkového materiálu a následné obrobení nástrojem menšího průměru, optimalizace posuvů, nájezdů/odjezdů nástroje nebo volba strategií dle různé typologie obráběných ploch.

Hrubování v CAD/CAM softwarech zažívá v poslední době boom v podobě optimalizace obráběcích drah. Kromě tradičních hrubovacích strategií nabízí i progresivní hrubovací strategie, jejichž algoritmus tvorby obráběcí dráhy se výrazně liší. Tradiční hrubování v těchto softwarech spočívá v kapsovacím cyklu. Software si vytvoří offset od dané geometrie, který je zadán radiální hloubkou řezu. Takový postup generování obráběcí dráhy se však příliš zaměřuje na obráběnou geometrii, ale méně na ostatní technologické podmínky, zejména na potřeby obráběcího nástroje.

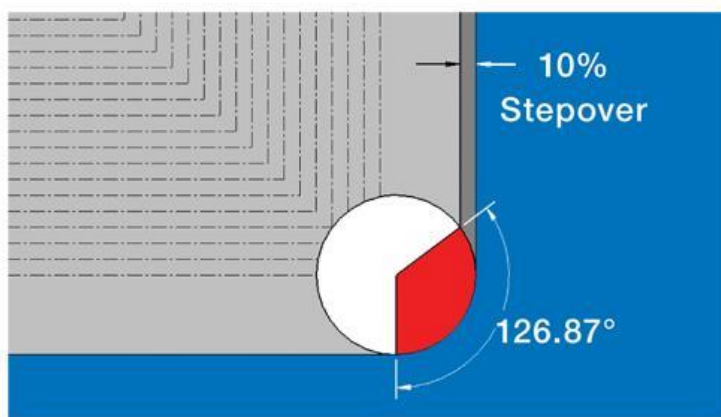


Pro demonstraci tohoto problému si představme obrábění čtvercové kapsy, kde důležitou technologickou podmínkou pro řezný nástroj je radiální hloubka řezu. Například při hodnotě o velikosti 10% z průměru nástroje, činí jeho opásání přibližně  $36^\circ$ . Úhel opásání je úhel, ve kterém je fréza v kontaktu s materiálem obrobku.



Obr. 4 Kapsovací cyklus s 10% radiální hloubkou řezu [15]

Pokud však řezný nástroj obrábí v oblasti ostrého rohu nebo jiné specifické obráběné geometrii, jeho opásání je výrazně navýšeno a to i přes fakt, že jednotlivé odebírané vrstvy jsou od sebe vzdáleny oněch 10% z průměru nástroje.



Obr. 5 Kapsovací cyklus s 10% radiální hloubkou řezu – ostrý roh [15]

Tento jev se v celém průběhu kapesovacího obrábění neustále opakuje a dochází tak k oscilaci zatěžování řezného nástroje, řezných sil a teplot. Dále může docházet k nežádoucímu chvění sestavy obrobek – nástroj – stroj. Všechny tyto faktory se negativně projevují na životnosti nástroje a kvalitě obrobené plochy. Dříve se tento nedostatek kompenzoval zpomalováním v rozích, programátoři si tedy nemohli dovolit použít optimální řezné podmínky. To však má neblahý vliv na produktivitu obrábění, nehledě na vyšší náklady na řezné nástroje.

V posledních letech proto do CAM softwarů přibývají hrubovací strategie, které problém s neustálým přetěžováním nástroje řeší. Obecný název pro tyto strategie není sjednocený, běžně se používá inteligentní hrubování, progresivní hrubování, dynamické frézování nebo adaptivní obrábění. V zásadě existují dva přístupy takového hrubování, které problému s přetěžováním řezného nástroje zamezují.

První přístup je zaměřen na úhel opásání nástroje, neboli TEA (Tool engagement angle). V CAM softwaru je naprogramován takový algoritmus, který při zadané hodnotě radiální hloubky řezu generuje dráhu tak, aby hodnota TEA nikdy nebyla překročena [15].

Druhý přístup je zaměřen na dynamickou úpravu posuvů pro kompenzaci dynamicky měnícího opásání nástroje. I tímto způsobem lze dosáhnout konstantního zatěžování nástroje a zvýšit tak životnost nástrojů. Nicméně takový přístup znamená odklon od optimálních řezných podmínek a změny v dynamice obráběcího stroje.

Tyto strategie bývají doprovázeny neřeznými pohyby nástroje například v rozích nebo drážkách. Proto jsou CAM softwary vybaveny možnostmi nastavení výšky těchto přejezdů a posuvů přejezdů. Hodnota výšky nadzvednutí nástroje se volí většinou nízká hodnota kolem 1 mm, takže nedochází k dření nástroje po obrobené ploše a ušetří se čas tím, že nástroj nevyjíždí až do bezpečné roviny nad úroveň polotovaru. Hodnota posuvů se volí vyšší než obráběcí posuv a nižší než rychloposuv, jelikož se nástroj často pohybuje v úzkých místech obráběné geometrie.

Díky těmto algoritmům hrubovacích strategií se začaly využívat tři technologické způsoby frézování. Jedná se o optimalizační postupy, které umožňují využití tří rozdílných vlastností ostří nástroje (materiál, geometrie a pevnost nástroje). Jejich vhodnou aplikaci určuje řada technologických prvků, například stabilita obráběcí sestavy,

výkon obráběcího stroje, materiál obrobku, řezný nástroj nebo požadovaná kvalita povrchu [16].

- Vysoce výkonné frézování (HPM)
- Frézování vysokým posuvem (HFM)
- Vysokorychlostní frézování (HSC)

Technologie vysoce výkonného frézování se opírá o základní myšlenku obrábění kovů. Tou je dosažení maximální produktivity při co nejnižších nákladech. Tato technologie je založena na použití řezného nástroje, který umožňuje nastavení velké axiální a radiální hloubky řezu. Následuje optimalizace posuvů a řezných rychlostí, které budou minimalizovat náklady na obrábění [17].

Frézování vysokým posuvem je technologií, kde je velkého úběru materiálu dosaženo kombinací vysokých posuvů na zub, malými axiálními hloubkami řezu a středními řeznými rychlostmi. Hlavním předpokladem realizace frézování velkými posuvy je zvýšení schopnosti odvádět teplo od břitu do tělesa destičky, aniž by došlo ke zvýšení jeho teploty. Zvýšení schopnosti břitu odvádět teplo se dosáhne především zvětšením aktivní délky břitu, což nám dává možnost použití většího posuvu  $f_z$  a tím i zvýšení výkonu frézování [18].

Vysokorychlostní frézování je technologie, kdy je větších úběrů materiálu dosaženo zvýšením řezné rychlosti. Princip této technologie je založen na faktu, že při vyšších řezných rychlostech dochází rychlým nárůstem teploty v místě oddělování třísky od polotovaru k ohřevu, který způsobí jeho změknutí až tavení. Tímto efektem je vysvětlován pokles řezné síly [6].

I přes nesporné výhody moderních hrubovacích strategií, se do CAM softwarů stále dodávají tradiční hrubovací strategie na bázi kapsovacího cyklu. Uživatelé je totiž stále používají. Někteří nedisponují dostatečně výkonným obráběcím strojem či vhodnými nástroji. Další problém může být v řídicím systému obráběcího stroje, který nedokáže přečíst takové kvantum dat, které tyto strategie generují. Jiní uživatelé používají tradiční hrubovací cykly, jelikož jsou na ně zvyklí, bojí se vyzkoušet něco nové nebo nemají a někdy ani nechtějí získat zkušenosti ohledně technologických podmínek moderních hrubovacích strategií.

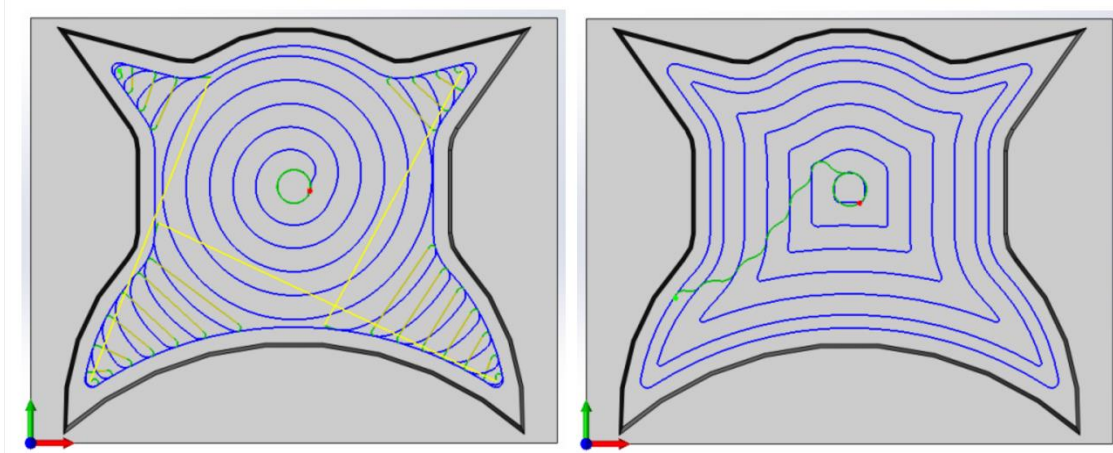
## 3.2 Popis použitých softwarů

### 3.2.1 HSMWorks

HSMWorks je plnohodnotný CAD/CAM software, který nabízí počítačovou podporu strojírenského konstrukčního procesu a souvisejících inženýrských činností (CAD, který je zde zastupován softwarem SolidWorks), dále podporu řízení těchto procesů a související dokumentaci a technologii pro řízení CNC obrábění (CAM, který je zde zastupován softwarem HSMWorks). Z nabídky obráběcích strategií lze vybírat z vrtacích operací, 2.5D frézování, 3D frézování, 4osé frézování, 5osé indexované i plynulé frézování a soustružení.

Z hrubování lze vybírat mezi tradičním hrubováním a progresivní hrubovací strategií, která se v tomto softwaru nazývá Adaptivní obrábění. Obě strategie jsou dostupné pro 2D i 3D frézování.

Důležitým parametrem pro Adaptivní obrábění je Optimální záběr, který definuje šířku opásání rezného nástroje. HSMWorks vypočítá dráhu nástroje tak, aby v žádném místě této dráhy nedošlo k přetížení nástroje nad zadanou hodnotu opásání nástroje. Adaptivní obrábění je tedy založeno na principu TEA. Pro plynulost obráběcího stroje dále důležité, mít možnost zadat parametr minimálního poloměru dráhy. Dráhy Adaptivního obrábění jsou navíc generovány hladkými, tečně napojenými průchody, které mají pozitivní vliv i na obráběný povrch.



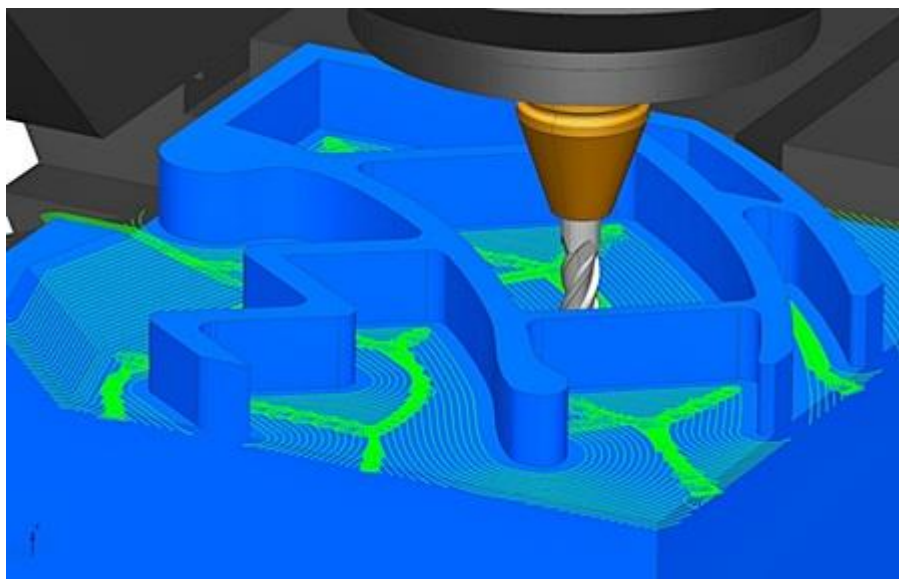
Obr. 6 Porovnání Adaptivní dráhy a tradičního hrubování [19]

### 3.2.2 PowerMill

Delcam PowerMill je CAM software pro CNC programování tříosých i víceosých frézovacích center. Primárně je určen pro frézování tvarových ploch tříosými, čtyřosými i pětiosými strategiemi, nicméně obsahuje i rozšířené možnosti 2.5D frézování. PowerMill lze pořídit i jako CAD/CAM software, v případě pořízení doplňkového modulu – PowerMill Modelling. Kromě doplňkového CAD modulu jsou v nabídce i moduly pro obrábění lopatek a kanálek [20].

PowerMill obsahuje tradiční strategii, která se jmenuje hrubování modelu. V této strategii lze nastavit styl Vortex. Pokud uživatel povolí tento styl, nedochází při generování dráhy k zvyšování opásání nástroje, ke kterému dochází u tradičních hrubovacích strategií. V místech, jako jsou rohy nebo drážky, jsou přidány kruhové pohyby (tzv. trochoidy), které zabraňují nežádoucímu přetěžování nástroje. Obrábění pomocí stylu Vortex je tedy založeno na principu TEA a PowerMill hlídá maximální opásání nástroje a drží ho v průběhu obrábění konstantní.

PowerMill obsahuje technologii Machine DNA, která vygeneruje testovací obrábění, díky kterému na konkrétním obráběcím stroji zjistí důležitá data pro obrábění. Jsou to zejména hodnoty minimálních rádiusů a minimální mezery mezi jednotlivými body na dráze. Díky těmto parametrům je PowerMill schopen navrhnout takovou kombinaci parametrů strategie Vortex, která umožní využít maximum z konkrétního obráběcího stroje [20].

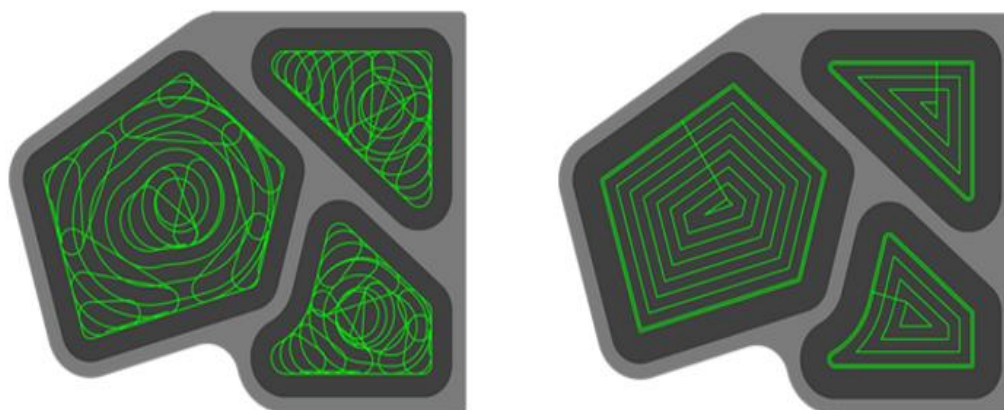


*Obr. 7 Dráhy nástroje při použití technologie Vortex [21]*

### 3.2.3 SurfCam

Ačkoliv je SurfCam známý zejména jako CAM software, jedná se o CAD/CAM software, jehož CAD část je založena na parametrickém objemovém modeláři na bázi jádra parasolidu. CAM část umožňuje řídit CNC technologie, jako jsou 2 až 5-osé frézky, soustruhy a soustružnická centra, vrtáčky a drátořezy [42].

Nosnou částí SurfCamu je technologie TrueMill, která automaticky přizpůsobí dráhu nástroje tak, aby úhel styku nástroje s materiálem nepřekročil maximálně povolenou hodnotu. TrueMill (z anglického *Tool Radius Uniform Engagement*) je tedy opět založena na principu konstantního úhlu styku nástroje s odebíraným materiálem.



Obr. 8 Porovnání TrueMill dráhy a tradičního hrubování [22]

## **4. Experimentální část**

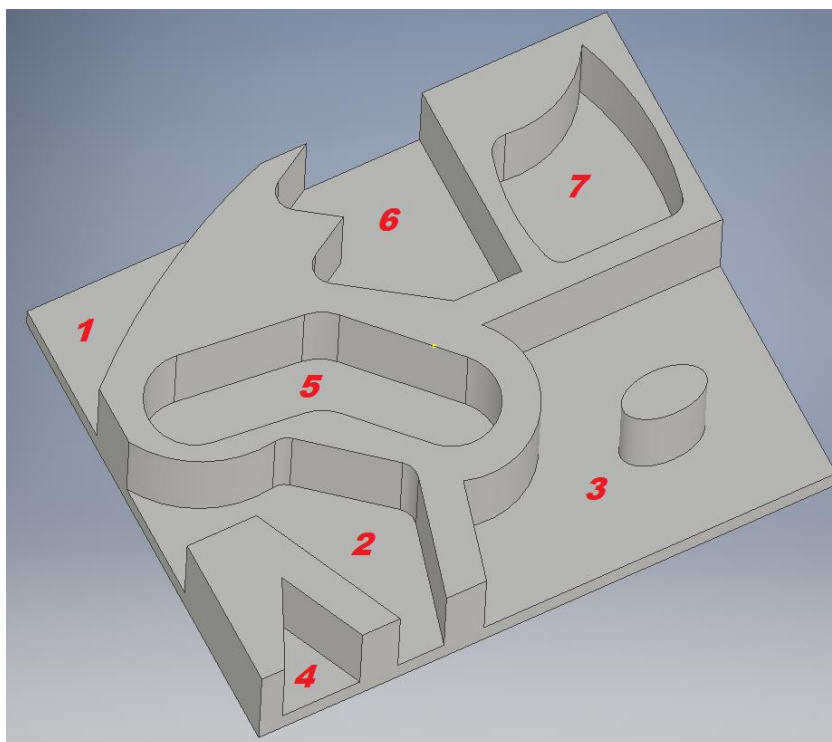
Experimentální část této diplomové práce je zaměřena na porovnání tří progresivních hrubovacích strategií z jednoho CAM softwaru – PowerMill a dvou CAD/CAM softwarů – HSMWorks a SurfCam. Pro úplnost experimentu bylo provedeno i porovnání s tradičním hrubováním. S takovou praktickou částí je spojen návrh zkušebních těles, návrh technologických podmínek obrábění, tvorba partprogramu, úpravy postprocesorů respektive výstupních NC kódu. Cílem experimentu je zhodnocení formou měření řezných sil, času obrábění a opotřebení nástroje. Podmínkou pro porovnání jsou shodné technologické podmínky, použité pro všechny zmíněné softwary. I z tohoto důvodu možného porovnání byla experimentální část provedena na speciálně navržené součásti.

### ***4.1 Návrh zkušebních těles***

Pro tvorbu zkušebních těles byl použit 3D CAD software Autodesk Inventor 2016. Pro obrábění byly vytvořeny dva modely, přičemž první model je komplexní a obsahuje různé typologické oblasti, které otestují výpočetní algoritmy použitých CAM softwarů. U tohoto modelu byly vytvořeny obráběné oblasti takovým způsobem, aby typově pokryly geometrii, s kterou se tyto progresivní strategie běžně setkávají v praxi.

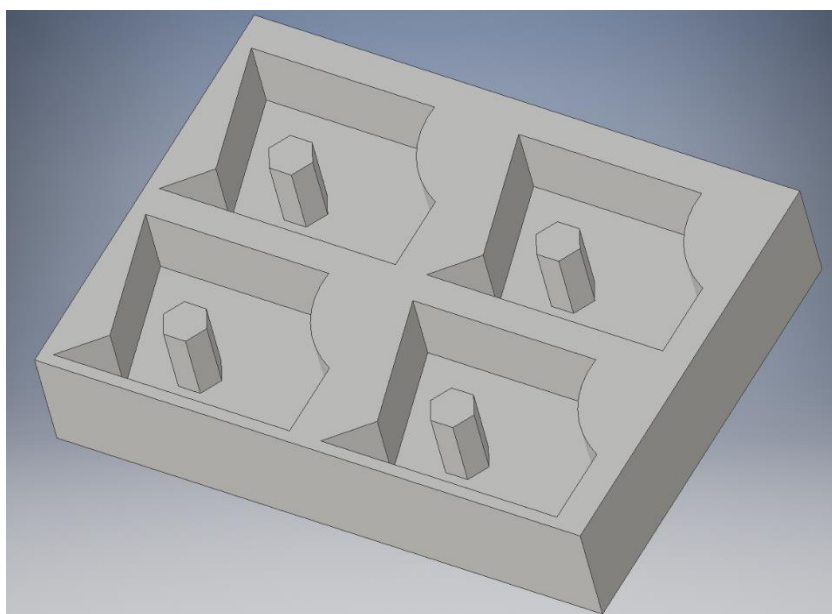
Na níže zobrazeném modelu se vyskytují tyto technologické oblasti:

1. Otevřená kapsa pravidelná
2. Otevřená kapsa nepravidelná
3. Otevřená kapsa s ostrůvkem
4. Otevřená kapsa s ostrým rohem
5. Uzavřená kapsa pravidelná
6. Otevřená kapsa nepravidelná
7. Uzavřená kapsa nepravidelná



*Obr. 9 Komplexní model pro 2D hrubování*

Druhý model obsahuje 4 identické uzavřené kapsy, přičemž každý software obrobí jednu kapsu. Čtvrtá kapsa bude obrobena tradičním hrubováním za použití vybraného softwaru.



*Obr. 10 Model se 4 identickými kapsami*



## 4.2 Technologické podmínky pro obrábění

Mezi technologické podmínky vstupující do procesu obrábění lze v tomto experimentu zařadit materiál obrobku, druh řezného nástroje a jeho geometrie, procesní kapalinu, obráběcí stroj. Mezi řezné podmínky, které jsou součástí podmínek technologických, patří v tomto experimentu řezná rychlost, posuv na zub, smysl obrábění. Dále hloubka řezu v axiálním směru a šířka záběru řezného nástroje do materiálu, která při progresivním hrubování není konstantní v průběhu celého obráběcího procesu.

### 4.2.1 Materiál obrobku

Pro experimentální část této práce byly použity bloky z materiálu EN-AW 7075 [AlZn5.5MgCu]. Mechanické vlastnosti a chemické složení jsou uvedeny v tabulce 2 a 3. Tento materiál má velmi dobrou obrobiteľnosť a používá se v různých oblastech ve tvaru lisovaných a válcovaných polotovarů (profily, panely, pásy, tyče, plechy), volných a zápusťkových výkovek. Určený pro vysoce namáhané konstrukce dlouhodobě pracující do teploty 100 - 120°C, např. pro leteckou výrobu: kryty, podélná žebra, výztuže, přepážky. Používá se pouze ve stavu vytvrzeném za tepla. Zvyšování teploty stárnutí je doprovázeno snížením pevnosti i tažnosti a zvýšením korozní odolnosti. Při dlouhodobém (100 - 200 h) působení teploty nad 50°C pevnost materiálu významně klesá. Pro své časté použití v leteckém průmyslu se tomuto materiálu přezdívá letecký dural [23].

Tab. 2 Mechanické vlastnosti EN-AW 7075 [24]

Mechanické vlastnosti		typické hodnoty (pokojová teplota)
Mez kluzu Rp0,2	[MPa]	220 – 460
Pevnost v tahu Rm	[MPa]	360 – 540
Tažnost A 50	[%]	1 – 6
Tvrdost HBW	[2,5/62,5]	104 – 160

Tab 3: Chemické složení EN-AW 7075 [24]


EN AW 7075	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	Jiné
Složení [hm%]	0,4	0,5	1,2-2	0,3	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,2	0,4	Zbytek

Materiál EN - AW 7075 byl zvolen zejména pro jeho dostupnost. Zároveň také protože pracoviště Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie má zkušenosti s obráběním dílů pro letecký průmysl, které se z tohoto materiálu vyrábí a které zároveň obsahují velké množství hrubování. Byl zde tedy předpoklad, že získané výsledky budou moci být použitý v praxi

#### 4.2.2 Řezný nástroj

Pro frézování byla doporučena dodavatelem nástrojů CKP Chrudim a.s. monolitní stopková fréza ze slinutého karbidu. Tato třibřitá fréza je opatřena povlakem Nitrid Zirkonu (ZrN).

Tento nástroj lze najít v katalogu výrobce – InovaTools pod číslem 245. Použití nástroje je doporučeno pro hliníkové slitiny nebo slitiny mědi. Ideální použití dle katalogu výrobce je pro hrubování i dokončování hliníkových slitin s krátkou třískou. Dále je vhodné použít tento nástroj pro ostatní hliníkové slitiny a slitiny mědi, bronzu a mosazi [25].



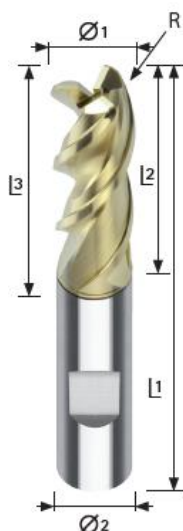
Caption	Roughing	Finishing
Ideal		
Good		
Applicable	245	245
Limited applicable		
Aluminium long-chipping		
Aluminium short-chipping		
Aluminium alloyed over >8% S		
Copper, brass, bronze, red brass		
Plastics - thermoplast		
Coating	ZrN	ZrN

Obr. 11 Aplikace řezného nástroje č. 245 [25]

Jedná se o toroidní frézu o průměru 8mm s rádiusem v rohu 1mm. Výrobce neudává v katalogu přesnou geometrii tohoto nástroje. Jediné, co lze o geometrii zjistit, jsou rozdílné úhly šroubovice – 43° a 47°, což by mělo zajistit snížení vibrací v průběhu obrábění a zlepšit tak kvalitu povrchu obrobku. Pro lepší odvod třísek je povrch nástroje leštěný.

Tvar a velikost nástroje byly zvoleny s ohledem na předpokládanou realizaci obrábění na vytvořeném modelu a s ohledem na pořizovací náklady nástrojů.

Tab. 4 Rozměry frézy 245 [25]



d1	d2	R	l1	l2	l3
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
8,00	8,00	1,00	63,00	21,00	25,00

#### 4.2.3 Obráběcí stroj

Pro obráběcí experiment bylo použito vertikální frézovací centrum VMC 500 s řídicím systémem Acramatic 2100. Toto frézovací centrum je opatřeno pevným vřeteníkem a svislým vřetenem, které je opatřeno číslicově řízeným posuvem, stejně jako číslicově řízeným posuvem stolu ve směru podélném a příčném. Stroj disponuje zásobníkem nástrojů s 20 polohami. V níže uvedené tabulce jsou zobrazeny technické parametry stroje.

Tab. 5 Technické parametry frézovacího centra VMC 500

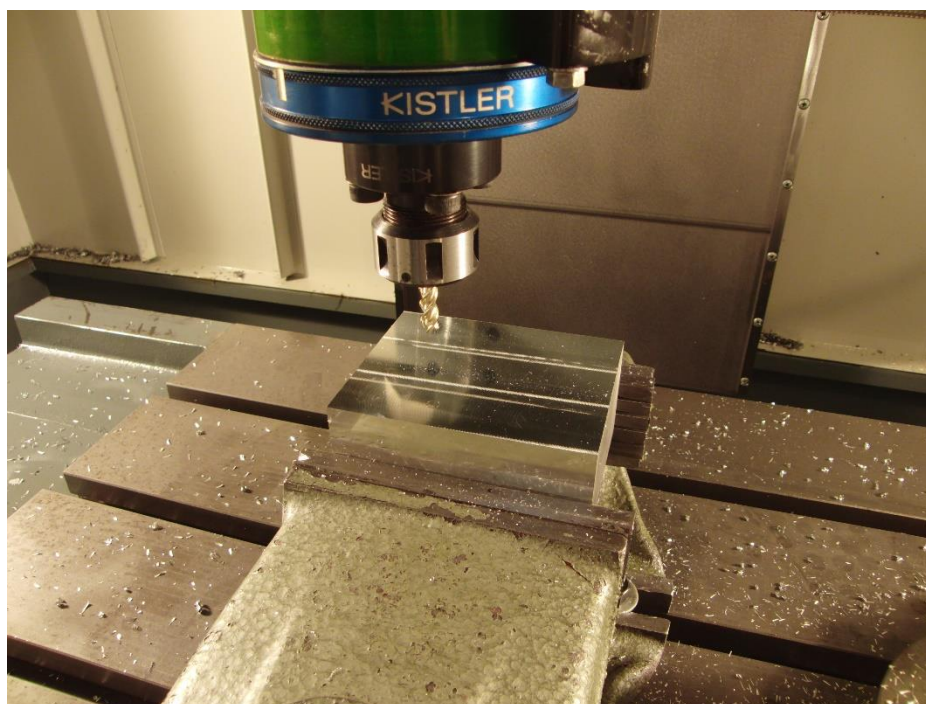
Technické parametry		
Rozměry upínací plochy stroje	délka (ve směru osy x)	800 mm
	šířka (ve směru osy y)	500 mm
Rozpětí posuvu	osa x	500 mm
	osa y	500 mm
	osa z	500 mm
Maximální zatížení stolu		300 kg
Maximální otáčky		10 000 min <sup>-1</sup>
Jmenovitý moment		102 Nm
Výkon motoru		7,5 kW



Obr. 12 Frézovací centrum VMC 500

#### 4.2.4 Upnutí polotovaru a nástrojů

Na níže uvedeném obrázku lze vidět blok materiálu, který byl po podložení dvěma broušenými destičkami upnut ve svěráku. Řezný nástroj byl upnut do kleštiny, která byla vsazena do držáku s dynamometrem.



*Obr. 13 Upnutí polotovaru*

#### 4.2.5 Procesní kapalina

Při frézování byla použita chladicí a mazací řezná, vodou ředitelná emulzní kapalina Blasocut 35 Kombi. Roztok byl tvořen 10% této emulze ředěné vodou. Funkcí této kapaliny bylo zejména chlazení a odvod třísek od místa řezu v uzavřených kapsách. Množství procesní kapaliny bylo možné regulovat výstupním kohoutem. Procesní kapalinu bohužel nebylo možné přivádět přímo do místa řezu, kvůli tělesu dynamometru, které zasahovalo do prostoru určeném pro chlazení. Díky vyšším posuvům obráběcího stolu byl však odvod třísek a chlazení částečně zajištěn.

## 4.2.6 Řezné podmínky

Při volbě řezných podmínek pro hrubování jsem vycházel z doporučení výrobce nástroje, dodavatele nástroje, vlastních zkušeností a možností obráběcího stroje. V níže uvedené tabulce jsou uvedeny hodnoty řezných podmínek, které byly použity pro všechny softwary stejně, aby bylo možné provést cílené porovnání výsledků obrábění.

Tab. 6 Řezné podmínky při experimentu

Řezná podmínka	Doporučení výrobce nástroje	Doporučení dodavatele nástroje	Použité řezné podmínky
$a_p$ [mm]	8	10	10
$a_e$ [mm]	8	1,6	1,6
$v_c$ [m/min]	346	400	201
$s$ [ot/min]	13 786	15 924	8 000
$f$ [mm/min]	1 913	1 911	1450
$f_z$ [mm/z]	0,046	0,04	0,06

Jelikož řezným nástrojem je monolitní fréza o délce ostří 21mm, zvolil jsem axiální hloubku řezu  $a_p=10$  mm. Ostatní řezné podmínky byly uzpůsobeny omezeným možností konstrukce obráběcího stroje. Řezná rychlost  $v_c$  byla snížena tak, aby korespondovala s 80% maximálních otáček vřetene. Radiální hloubka řezu je volena zvolena tak, aby bylo dosaženo 20% opásání z průměru nástroje. Posuv  $f=1450$ mm/min byl zvolen dle  $f_{min}=1450$  mm/min. Tato hodnota byla doporučena dodavatelem nástroje.

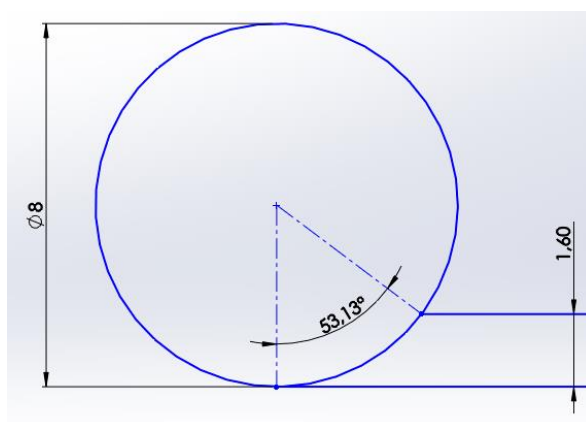
Výhodou CAD/CAM softwarů oproti ručnímu programování je optimalizace obráběcích drah. Proto sem lze zařadit i další řezné podmínky, jako jsou posuv nájezdů/odjezdů nebo posuv rampování.

Tab. 7 Ostatní řezné podmínky při experimentu

Řezná podmínka	Použité řezné podmínky
$f_{\text{nájezd}}$ [mm/min]	1 450
$f_{\text{odjezd}}$ [mm/min]	1 450
$f_{\text{rampa}}$ [mm/min]	700

Obrábění probíhalo ve smyslu sousledném.

Jak již bylo zmíněno v kapitole Řezný nástroj, k obrábění byla použita tříbřitá fréza. Vhodným zvolením radiální hloubky řezu  $a_e=1,6$  mm jsem docílil toho, že v průběhu obrábění bude v záběru vždy pouze jeden břit nástroje. Takové nastavení usnadňuje výpočet řezných sil, které jsou součástí tohoto experimentu.



Obr. 14 Výsledné opásání nástroje při použitém  $a_e$

## **4.3 Příprava partprogramů a NC kódů**

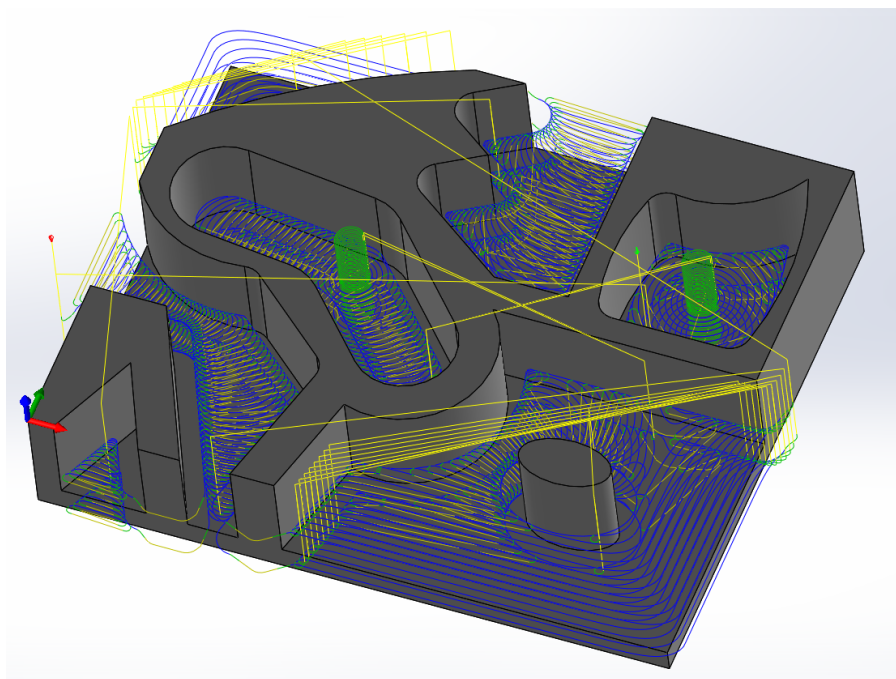
### **4.3.1 HSMWorks**

Jelikož SolidWorks obsahuje překladače formátů, proběhlo načtení externího modelu z Inventoru bez nutnosti převádění dat do přenosového formátu. V HSMWorksu začíná každé obrábění nastavením tzv. projektu, ve kterém se definuje obráběný model, polotovar a počátek souřadného systému. V tomto případě stačilo změnit pouze počátek souřadného systému a umístit ho do vrchního rohu polotovaru.

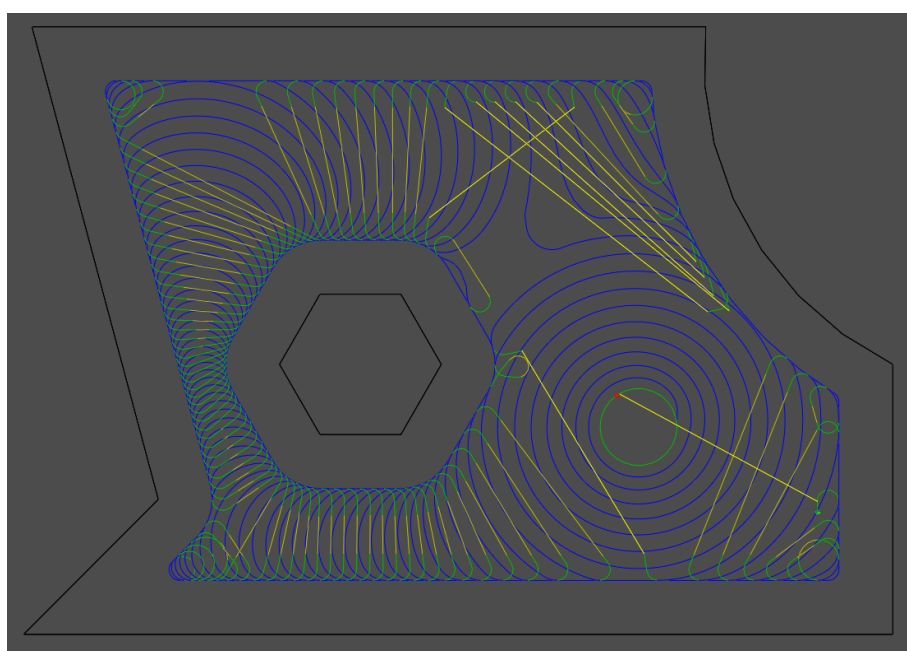
Po zvolení strategie Adaptivního hrubování bylo zapotřebí definovat rozměry nástroje a k němu přiřadit zvolené řezné podmínky. Pro samotné nastavení strategie pak bylo dostačující nastavit axiální a radiální hloubku řezu. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, je Adaptivní obrábění doprovázeno neřeznými pohyby v místech, kde by u tradičních hrubovacích strategií docházelo k přetěžování nástroje. V těchto místech jsem tak pro lepší produktivitu obrábění nastavil výšku nadzvednutí nástroje 0,5 mm. Poslední nastavení, které jsem provedl, bylo zvětšení úhlu rampování nástroje na 5°. Výchozí nastavení 2° by totiž spíš odpovídalo obrábění oceli.

Všechno ostatní nastavení jako obráběné hranice, bezpečná rovina, nájezdy nebo odjezdy je HSMWorks schopen si nastavit sám. Všechny užitečné parametry obsahují grafickou a textovou nápovědu a jsou přehledně seříděné do 5 záložek. Samotné programování tedy bylo velice rychlé, jednoduché a intuitivní.





*Obr. 15 Adaptivní obrábění v HSMWorksu*

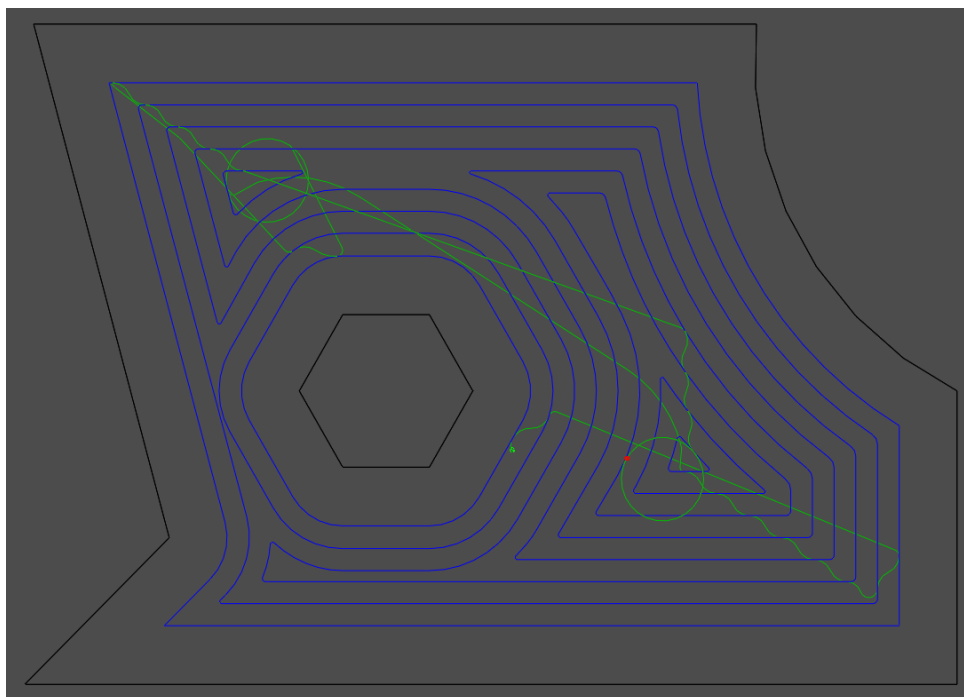


*Obr. 16 Adaptivní obrábění – detail dráhy druhého modelu*

Pro vygenerování NC kódu byl použit postprocesor Acramatic. Tento postprocesor je v základní nabídce, který HSMWorks nabízí. Po otestování výstupního NC kódu na obráběcím stroji byla provedena drobná úprava v nastavení postprocesingu v podobě

použití rádiusů při kruhové interpolaci. Tato úprava proběhla na úrovni uživatelského rozhraní HSMWorksu a nebylo tedy zapotřebí provést ruční zásah do samotného postprocesoru nebo NC kódu.

Pro srovnání strategií, které disponují funkcí pro řízení úhlu opásání nástroje a tradičních hrubovacích operací, byl z HSMWorksu naprogramováno i tradiční hrubování. Obsahuje stejné nastavení parametrů, jako ostatní optimalizované strategie.



*Obr. 17 Kapsovací obrábění – detail dráhy druhého modelu*

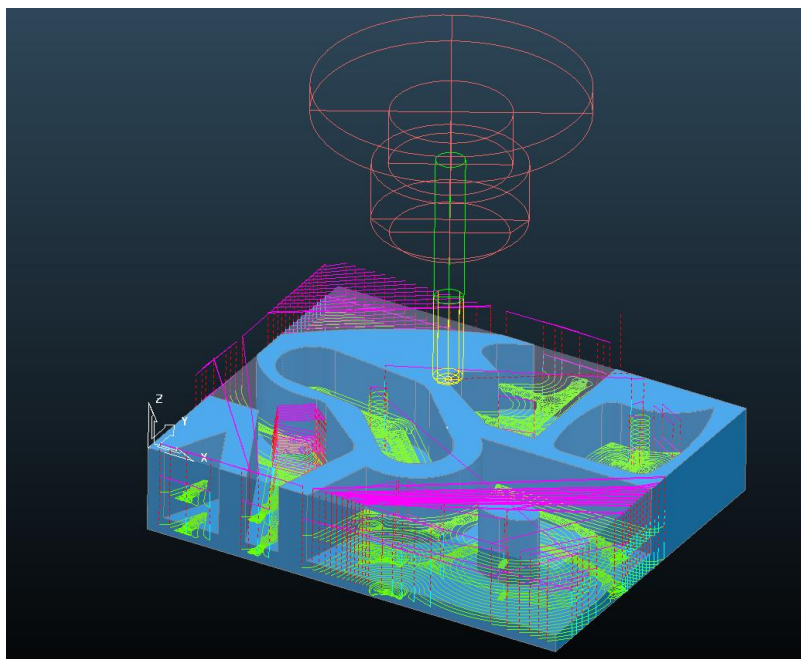
### **4.3.2 PowerMill**

Pro načtení modelu do uživatelského prostředí PowerMillu byl použit přenosový formát *IGS*. PowerMill 2015 sice disponuje překladačem pro Inventor, nicméně model byl vytvořen v novější verzi Inventor 2016. Po načtení modelu bylo zapotřebí transformovat souřadný systém do místa, které bude definovat počátek obrábění. Pro transformaci souřadného systému bylo zapotřebí zadat přesnou hodnotu odsazení. Počátek obrábění tedy v tomto softwaru nelze umístit na obráběný polotovár. Nastavení rozměrů polotovaru proběhlo automaticky – ohraničujícím kvádrem z modelu.

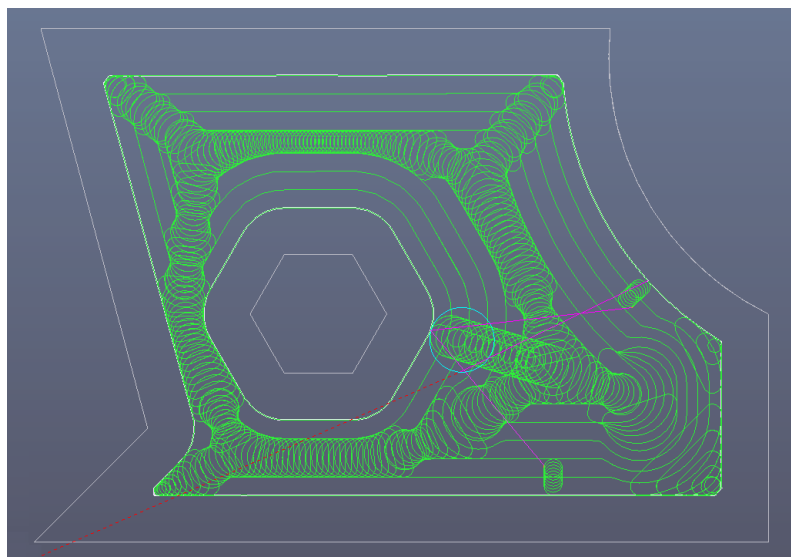
Po zvolení strategie Hrubování modelu bylo zapotřebí zvolit styl Vortex a dále nadefinovat rozměry nástroje a k němu přiřadit zvolené řezné podmínky. Pak zbývalo nastavit ostatní parametry jako je axiální a radiální hloubka řezu, stejné parametry rampování a výšky přejezdů. Stejně jako u Adaptivního obrábění je i hrubování Vortex doprovázeno neřeznými pohyby v místech, kde by u tradičních hrubovacích strategií docházelo k přetěžování nástroje. V těchto místech jsem opět pro lepší produktivitu obrábění nastavil výšku nadzvednutí nástroje 0,5 mm.

Při tvorbě partprogramu v PowerMillu jsem se setkal s jedním problémem. Software totiž generoval obráběcí dráhy při výše uvedeném nastavení i na vnějších stěnách modelu. Tento nežádoucí jev se mi podařilo odstranit tím, že jsem zmenšil rozměry polotovaru o 0,1 mm vůči obráběnému modelu.

Samotné programování v PowerMillu je podle mého názoru méně intuitivní než programování v HSMWorksu. Uživatel je nucen zadat více parametrů a provést více kroků k tomu, aby získal takovou dráhu, s kterou může být spokojen. Na druhou stranu tyto parametry jsou přehledně popsány a větší množství parametrů může vést k lepší optimalizaci obráběcí dráhy. Avšak čas strávený nad programováním může být tedy v tomto CAMu delší.



*Obr. 18 Vortex obrábění v PowerMillu*



*Obr. 19 Vortex - detail dráhy druhého modelu*

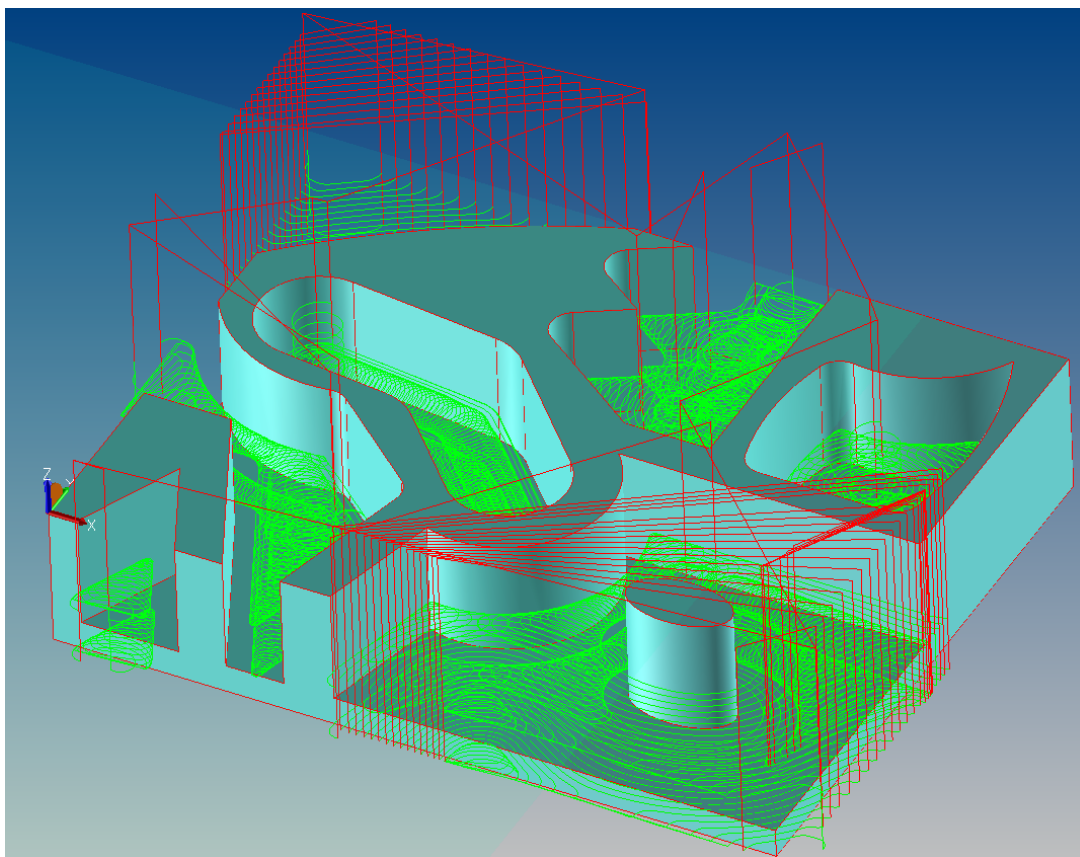
Pro vygenerování NC kódu byl použit již odladěný postprocesor. I přes fakt, že při postprocesingu byly nahlášeny neznámé chyby, proběhlo testovací obrábění na stroji bez problémů. Tyto neznámé chyby souvisely se zápisem dat nedůležitých pro obrábění.

### **4.3.3 SurfCam**

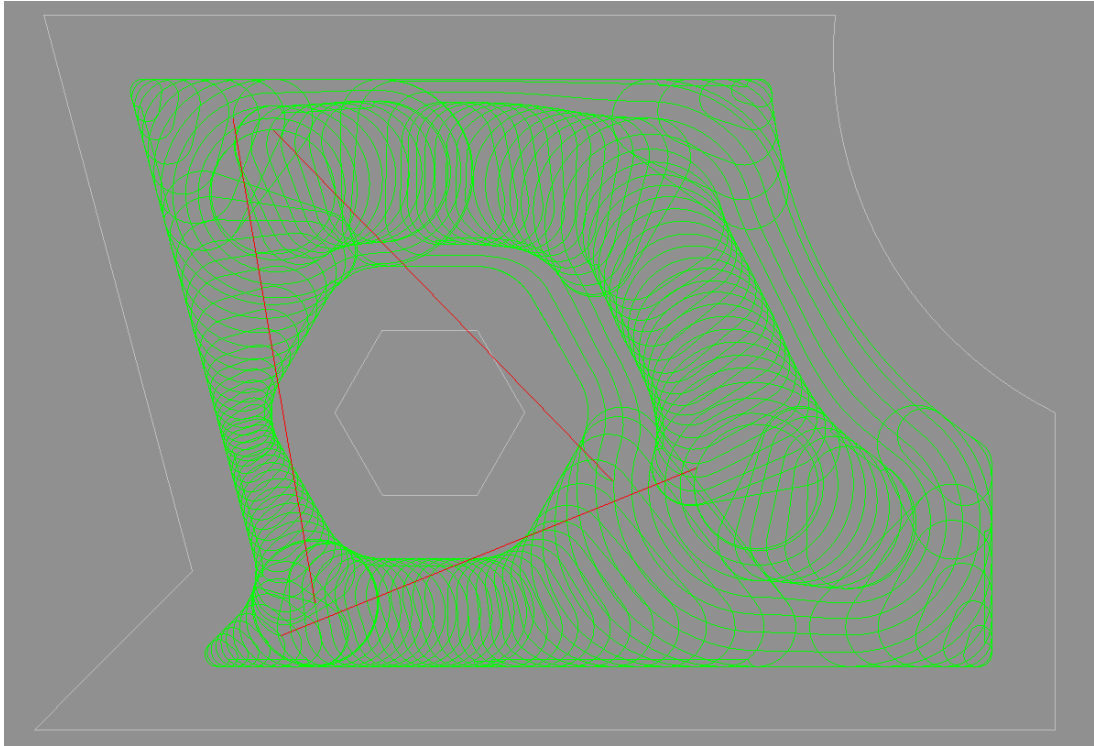
SurfCam disponuje, stejně jako dva výše uvedené softwary, širokou škálou překladače formátů. Načtení modelu tedy proběhlo bez nutnosti převádění dat do přenosového formátu.

Stejně jako v ostatních CAM softwarech, je i v SurfCamu před samotným obráběním zapotřebí nastavit rozměry polotovaru a počátek obrábění. V SurfCamu se toto nastavení provádí v NC Projektu. Po zvolení strategie TrueMill bylo zapotřebí nastavit rozměry nástroje a k němu přiřadit zvolené řezné podmínky. V nastavení strategie jsem dohledal a nastavil všechny potřebné parametry, které byly upravovány v předchozích softwarech. Axiální a radiální hloubku řezu, minimální poloměr obrábění, výšku přejezdů rychloposuvů i neřezných pohybů nad povrchem obrobku, rozměry a stoupání šroubovice.

Při tvorbě partprogramu v SurfCamu jsem se nesetkal s žádným problémem, který by zapříčinil nevygenerování potřebné dráhy. V porovnání s HSMWorksem a PowerMillem vypadá uživatelské prostředí zastarale, jako by vývoj produktu ustal před 10 lety. Chybí mi zde průzkumník strategií, bublinková nápověda k jednotlivým prvkům a i samotné grafické zobrazení rozhodně nevypadá lákavě.



*Obr. 20 TrueMill hrubování v SurfCamu*



*Obr. 21 TrueMill - detail dráhy druhého modelu*

Pro vygenerování NC kódu byl použit postprocesor Fanuc. Tento postprocesor je v základní nabídce, který tento software nabízí. Nejedná se sice o postprocesor určený pro řídicí systém Acramatic, nicméně oba postprocesory jsou založeny na G-kódu (ISO-kód). Po otestování vzorového NC kódu na stroji jsem zjistil, které úpravy postprocesoru budou nezbytné pro chod obráběcího stroje. Úpravy postprocesorů SurfCamu se provádí v M-Postu, což je textový soubor, ve kterém jsou uloženy příkazy pro překlad CL dat do NC kódu. V tomto M-Postu bylo zapotřebí snížit počet desetinných míst generovaných pro obloukovou interpolaci. Původní 4 desetinná místa bylo zapotřebí snížit na tři, aby obráběcí stroj mohl tyto příkazy interpretovat. Dále bylo zapotřebí nastavit použití rádiusů při kruhové interpolaci a nastavit generování šroubovic jako lineární pohyby. Jinak řídicí systém obráběcího stroje hlásil neustále chyby. Ostatní úpravy jsem provedl ručně, přímým zásahem do NC kódu. Jednalo se například o odstranění funkcí G54, G21 a G28, tyto funkce patří k jinému řídicímu systému a pro tento experiment neměli žádný vliv.

## 5. Výsledky experimentu a jejich vyhodnocení

### 5.1 Řezné síly

Velikost výsledné řezné síly  $F$  a jejích vybraných složek byla měřena piezoelektrickým rotačním dynamometrem Kistler 9123C1111 (Obr. 22). Dynamometr je vybaven čtyřmi piezoelektrickými senzory, na kterých vlivem zatížení vzniká signál, který je veden kabelem do zesilovače a A/D převodníku. Tento signál je poté veden ke zpracování do notebooku s vyhodnocovacím softwarem DynoWare. Tento software vyhodnocuje složky sil ve třech osách -  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  dle souřadnicového systému dynamometru. Dále vyhodnocuje krouticí moment  $M_z$  a dle průměru použité frézy dokáže vypočítat radiální sílu  $F_r$  a tangenciální sílu  $F_t$ . [26, 27]. Důležité parametry použitého dynamometru jsou zaznamenány v tabulce 8.



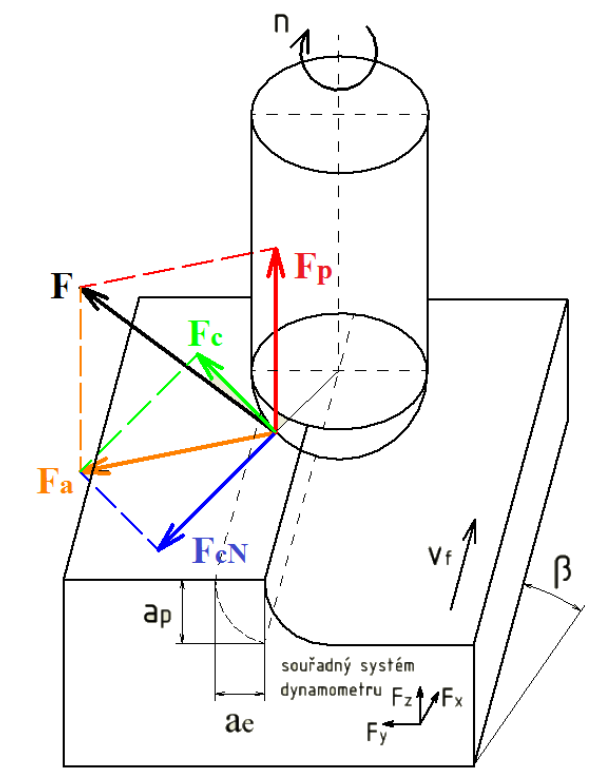
Obr. 22 Dynamometr Kistler 9123C1111[26]

Parametry dynamometru			
popis	veličina	jednotka	hodnoty
rozsah silového zatížení v jednotlivých osách	$F_x, F_y$	[kN]	-5 ... 5
	$F_z$	[kN]	-20 ... 20
	$M_z$	[Nm]	-200 ... 200
práh citlivosti	$F_x, F_y$	[mV/N]	$\approx 2$
	$F_z$	[mV/N]	$\approx 0,5$
	$M_z$	[mV/Nm]	$\approx 50$
hmotnost	M	[kg]	$\approx 3$

Tab. 8 Parametry dynamometru Kistler 9123C1111 [26]

Obr. 23 znázorňuje záběrové podmínky a rozklad celkové řezné síly  $F$  podle normy ČSN ISO 3002/4 [28]. Podle této normy je celková řezná síla  $F$  rozdělena do těchto složek: řezná síla  $F_c$ , řezná síla normálová  $F_{cN}$  a řezná síla pasivní  $F_p$ . Z obrázku je patrné, že celková řezná síla  $F$  je výslednicí řezné síly pasivní a řezné síly aktivní. Velikost pasivní síly  $F_p$  je přímo úměrná velikosti síly  $F_z$  změřené dynamometrem. Aktivní síla  $F_a$  je výslednice řezné síly  $F_c$  a řezné síly normálové  $F_{cN}$ . Jelikož byl pro experimentální měření řezných sil použit rotační dynamometr, lze tyto dvě síly zjistit z naměřených hodnot. Software Dynoware zaznamenává řeznou sílu  $F_c$  jako tangenciální sílu  $F_t$  a řeznou sílu normálovou  $F_{cN}$  jako radiální sílu  $F_r$ .





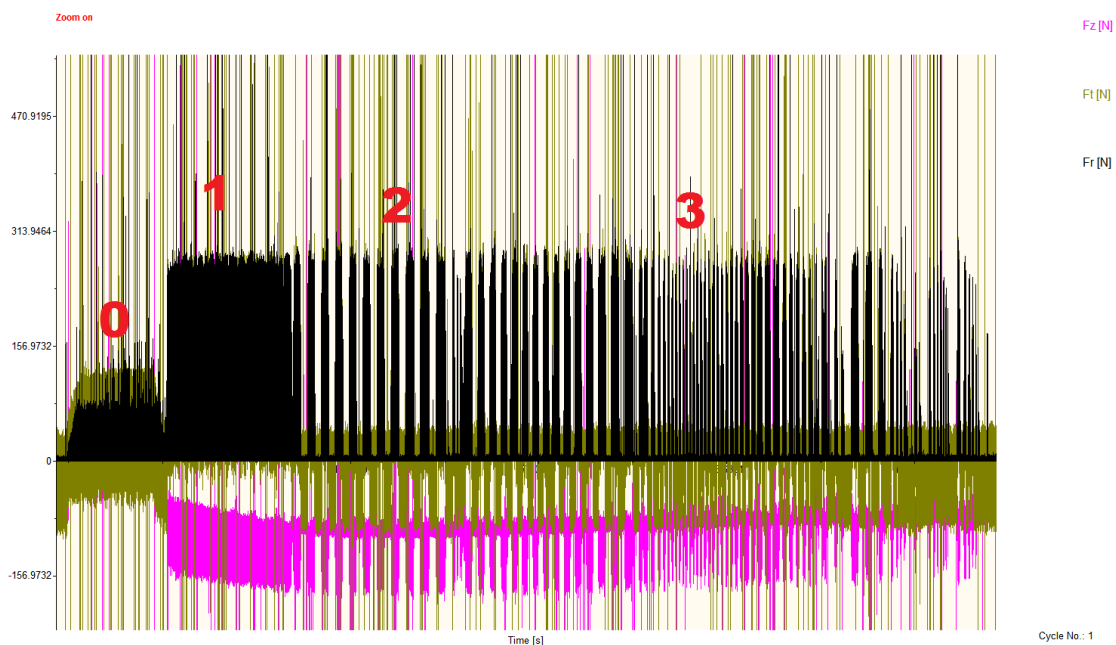
Obr. 23 Výsledné složky sil v experimentu [28]

Cílem experimentu nebylo ani tak zjištění přesných hodnot řezných sil, ale zaznamenat průběh řezných sil a průměrné a maximální hodnoty. Proto mimo vyhodnocení samotných hodnot bude v této kapitole provedeno i vizuální porovnání průběhu naměřených řezných sil. V prvním vyhodnocení popíši použitou strategii při vyhodnocování řezných sil. Tato strategie bude aplikována i na všechny ostatní vyhodnocení.

## 5.1.1 Hodnoty řezných sil

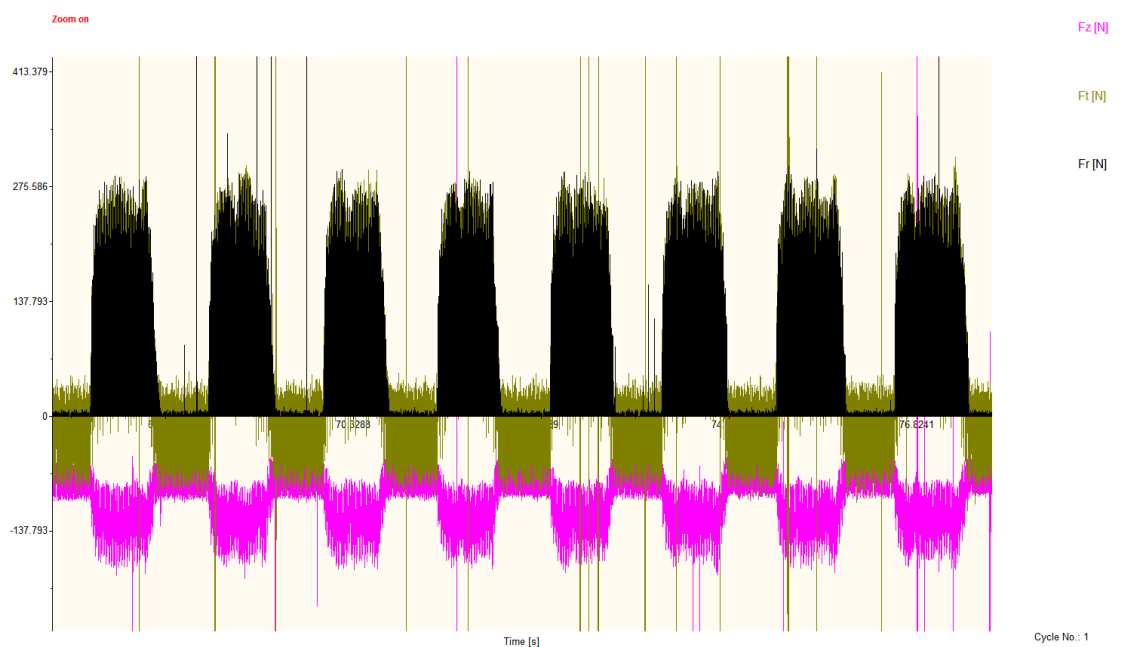
### HSMWorks

Na níže zobrazených obrázcích jsou záznamy naměřených sil ze softwaru DynoWare. Obráběcí dráha pro tento záznam vznikla v softwaru HSMWorks a jedná se o model s identickými kapsami. Svislá osa zobrazuje velikost řezných sil [N]. Vodorovná osa zobrazuje čas [s] v průběhu měření řezných sil. Na těchto obrázcích dále popíši použitou strategii při vyhodnocování řezných sil. Na obrázku 24 je zobrazeno obrábění první hladiny modelu s identickými kapsami. Dráha 0 zobrazuje rampování nástroje po šroubovici. Dráha 1 zobrazuje obrábění po spirále. Je zde vidět, že v průběhu takového obrábění je nástroj neustále v záběru a jeho opásání je konstantní. Jakmile dojde nástroji místo pro obrábění, začne HSMWorks generovat část 2 a 3. Tyto části jsou tvořeny střídáním řezných a neřezných pohybů, přičemž délka záběru nástroje do materiálu je ovlivněna obráběnou geometrií. Například v části 3 se obráběl ostrý roh, tudíž je délka záběru nástroje do materiálu nižší. Celý záznam je doprovázen šumem naměřených hodnot. Použití jakéhokoliv filtru či vyhlazení vedlo mimo odstranění šumu i ke snížení řezných sil. Proto jsem tyto filtry neaplikoval.

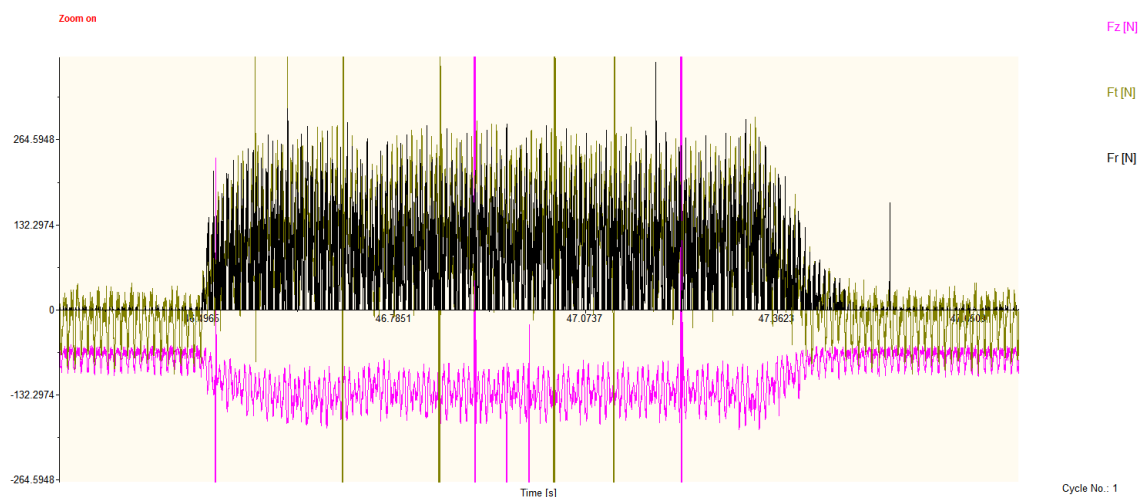


Obr. 24 Záznam řezných sil ze software DynoWare - HSMWorks

Obrázek 25 znázorňuje jednotlivé záběry řezného nástroje do materiálu. Průměrnou velikost jednotlivých složek řezných sil jsem získal pomocí nástroje softwaru Dynoware - mean value, kterou jsem aplikoval na 10 záběrů. Výsledné hodnoty jsem zprůměroval a tím získal přibližnou hodnotu dosahovaných řezných sil.



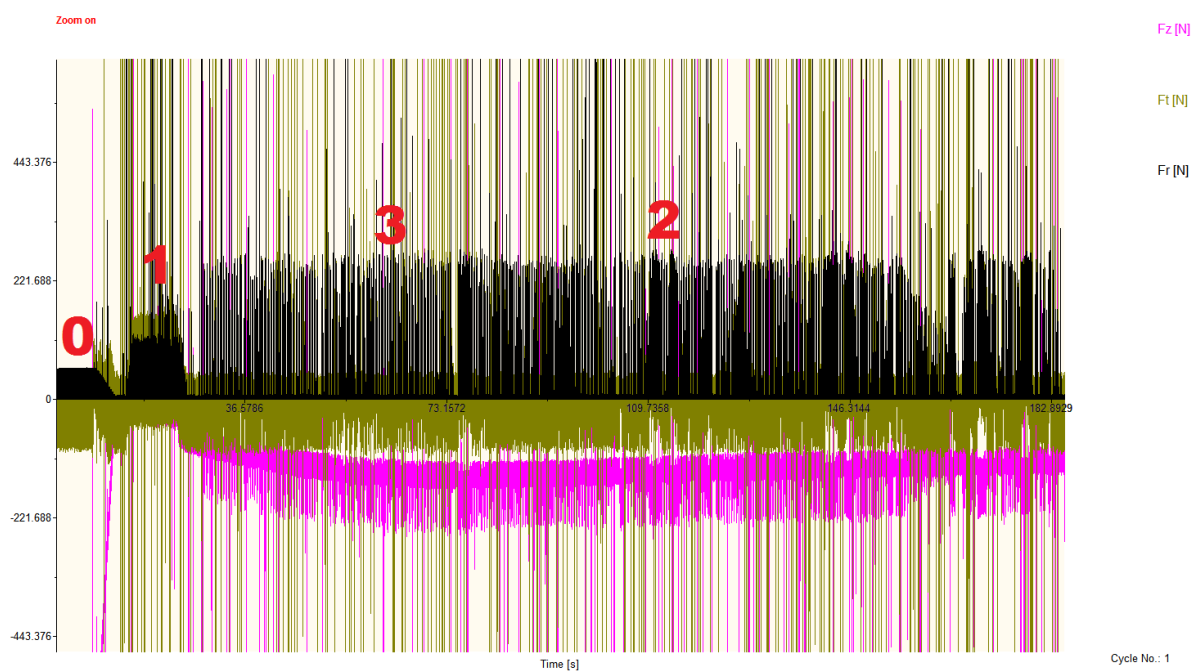
*Obr. 25 Jednotlivé záběry nástroje při obrábění - HSMWorks*



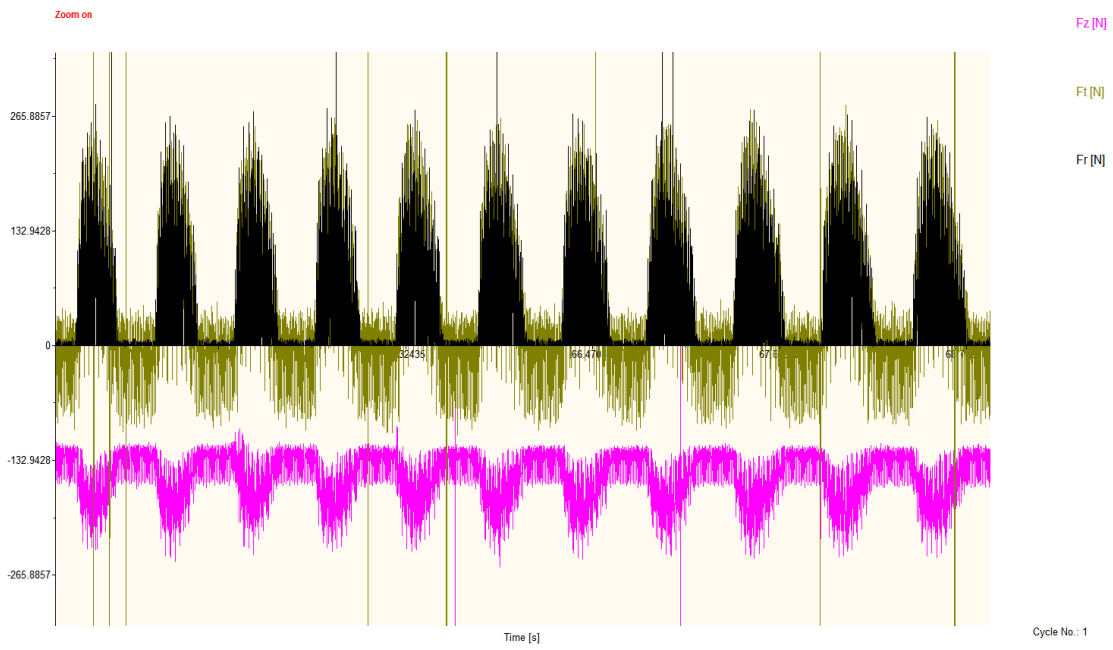
*Obr. 26 Detail jednoho záběru - HSMWorks*

## PowerMill

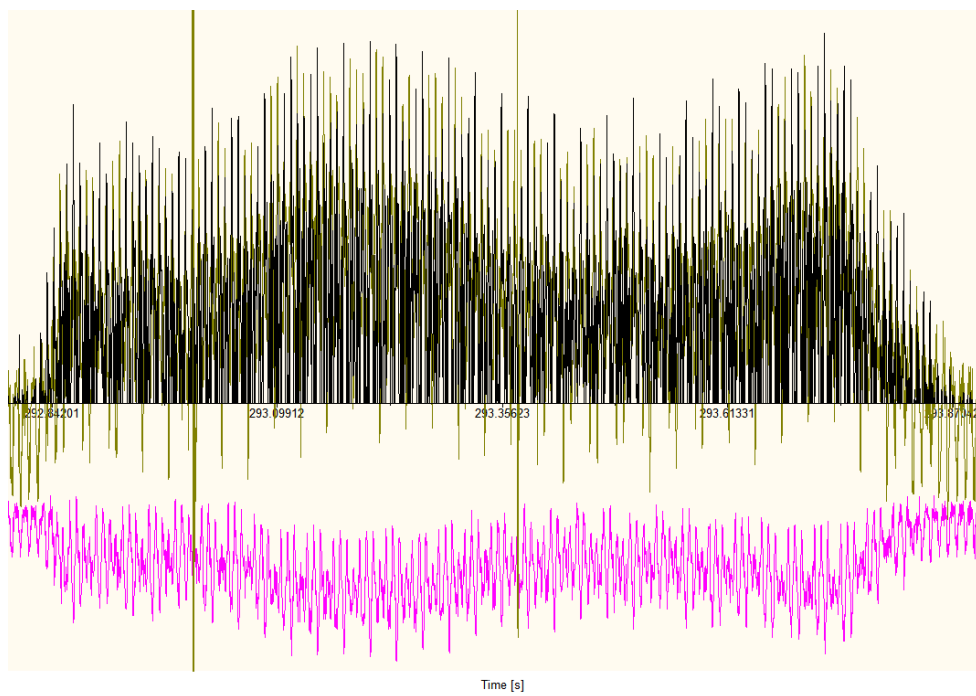
Na níže zobrazeném obrázku je záznam naměřených řezných sil pro software PowerMill. Opět jak u předchozího případu, část 0 zobrazuje rampování nástroje po šroubovici, část 1 rozfrézování prostoru pro následné obrábění po trochoidě a část 2 a 3 zobrazuje průběh obrábění. Na rozdíl od předchozího záznamu je zde vidět, že obrábění začíná krátkými záběry nástroje do materiálu. PowerMill totiž zahajuje své obrábění tak, že si vytvoří prostor pomocí drážky. A jelikož nástroj nesmí překročit zadanou hodnotu radiální hloubky řezu, jsou na začátku obrábění aplikovány tyto krátké záběry.



Obr. 27 Záznam řezných sil ze software DynoWare - PowerMill



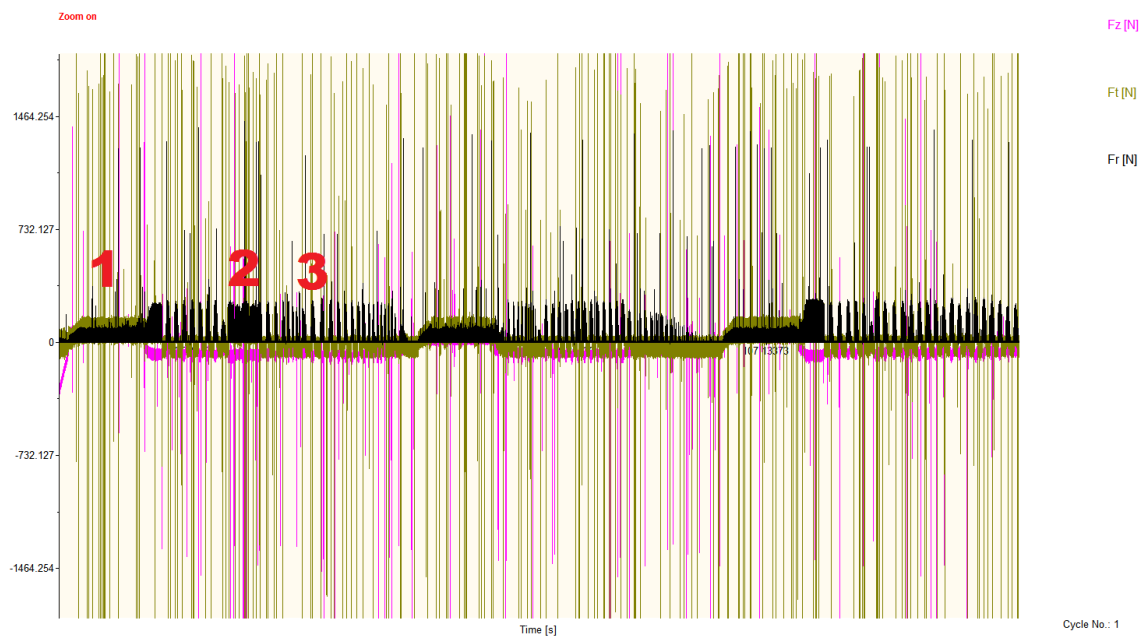
*Obr. 28 Jednotlivé záběry nástroje při obrábění – PowerMill*



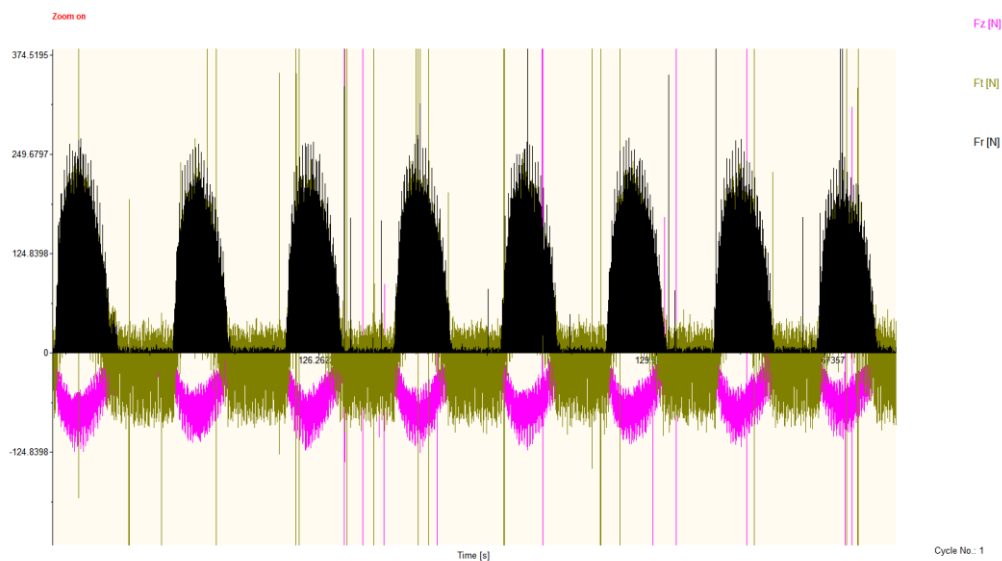
*Obr. 39 Detail jednoho záběru - PowerMill*

## SurfCam

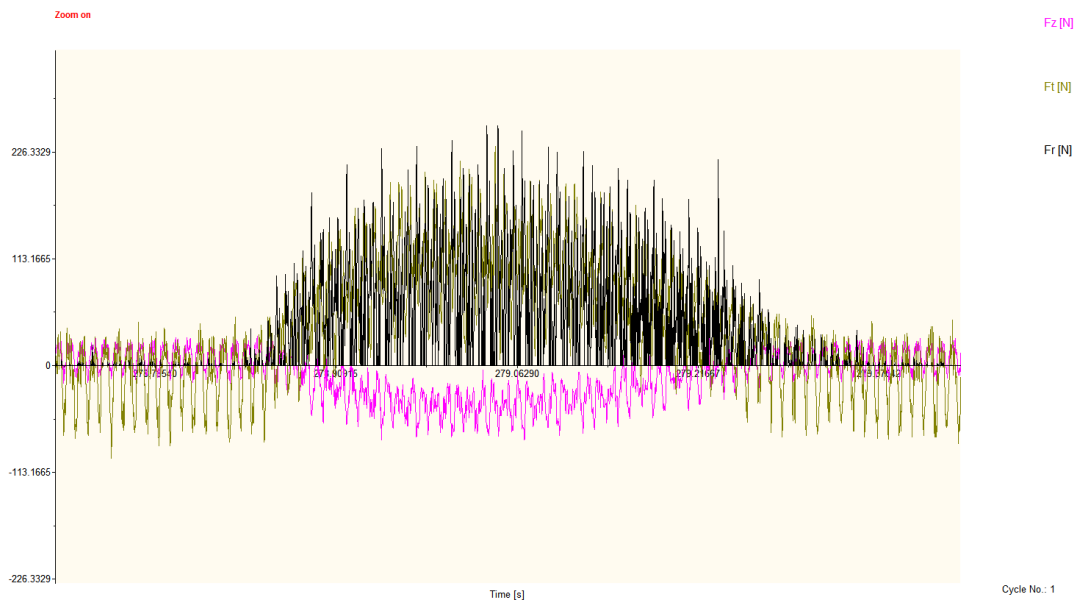
Na níže zobrazeném obrázku je záznam naměřených řezných sil pro software SurfCam. Opět jak u předchozích případů, část **1** zobrazuje rampování po šroubovici do materiálu a část **2** a **3** zobrazuje průběh obrábění, kdy délka záběru nástroje do materiálu je opět ovlivněna obráběnou geometrií a výpočtovým algoritmem strategie.



Obr. 30 Záznam řezných sil ze software DynoWare - SurfCam



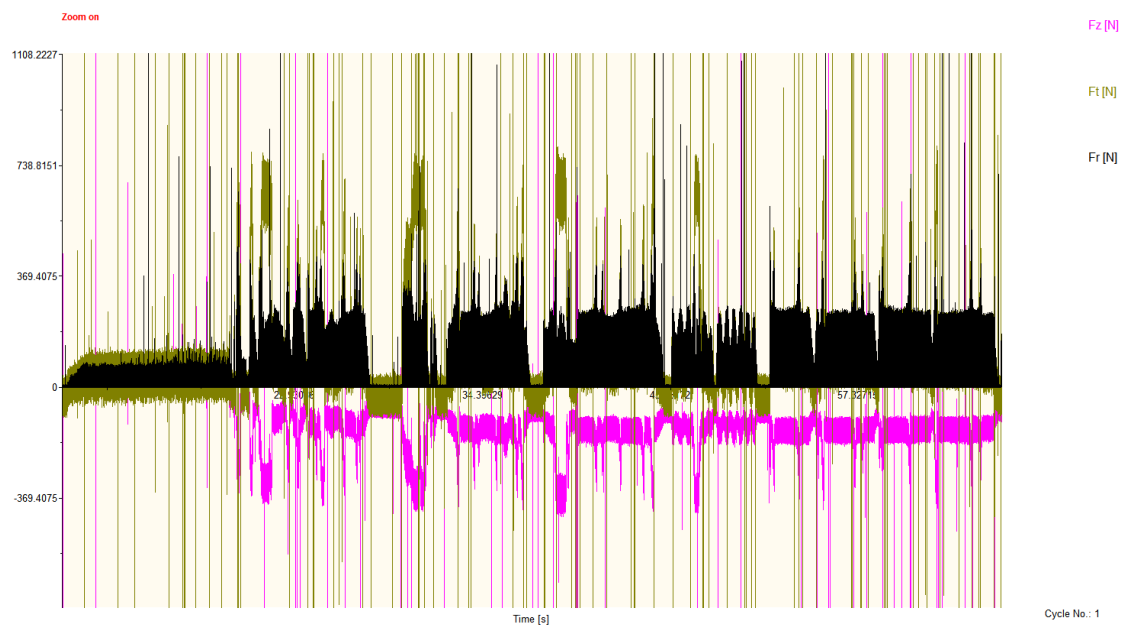
Obr. 31 Jednotlivé záběry nástroje při obrábění – SurfCam



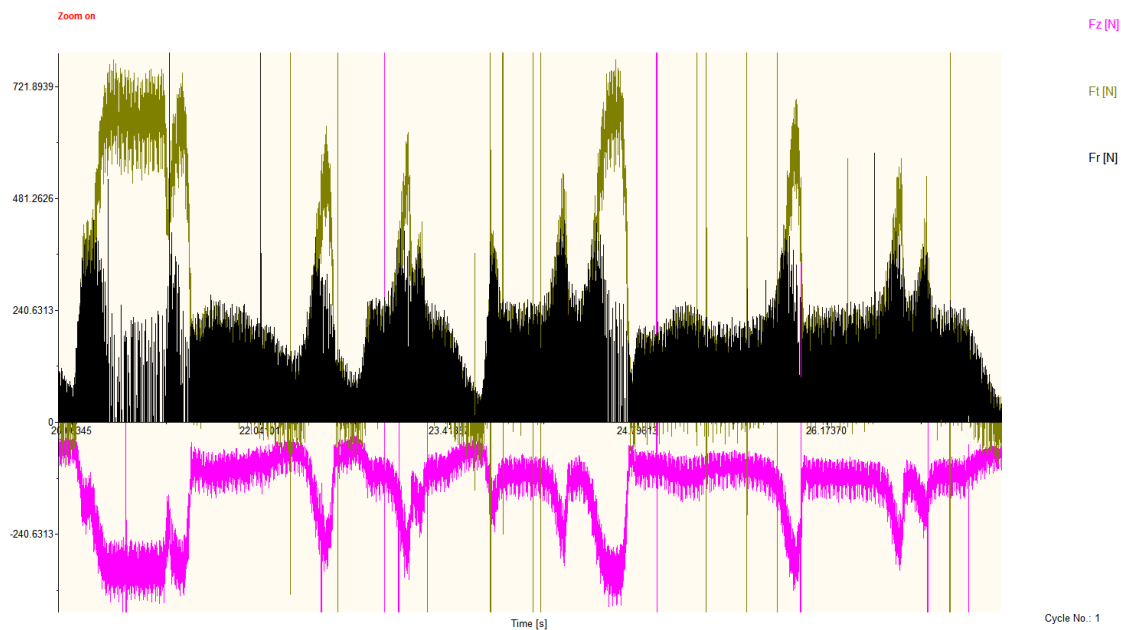
*Obr. 32 Detail jednoho záběru - SurfCam*

### **Tradiční hrubování**

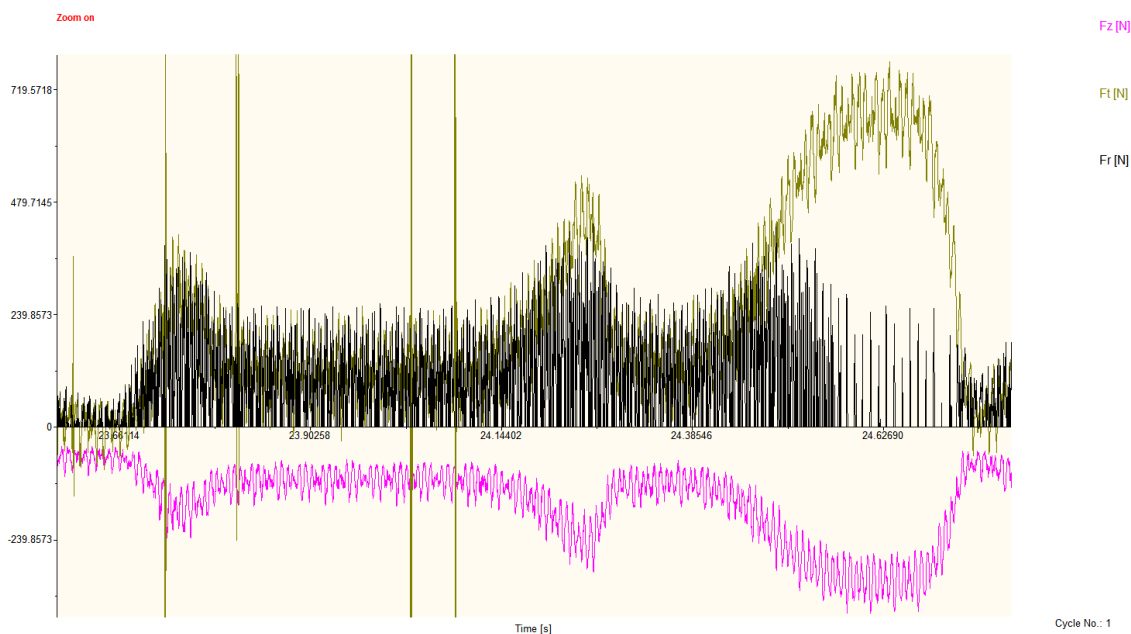
Na níže zobrazeném obrázku je záznam naměřených řezných sil pro tradiční hrubování bez optimalizace. Z obrázku lze vidět, že v průběhu obrábění řezné síly více kolísají. Tento jev je způsoben přetěžováním nástroje při přechodu na další obráběnou vrstvu nebo při obrábění úzkých míst na modelu.



*Obr. 33 Záznam řezných sil – Tradiční hrubování*



*Obr. 34 Jednotlivé záběry nástroje při obrábění – Tradiční hrubování*



*Obr. 35 Detail jednoho záběru – Tradiční hrubování*



Průměrné hodnoty naměřených řezných sil v průběhu frézování jsou zaznamenány v tab. 9. Tyto hodnoty jsou dále zpracovány do grafů 1 až 4.

*Tab. 9 Průměrné hodnoty naměřených řezných sil*

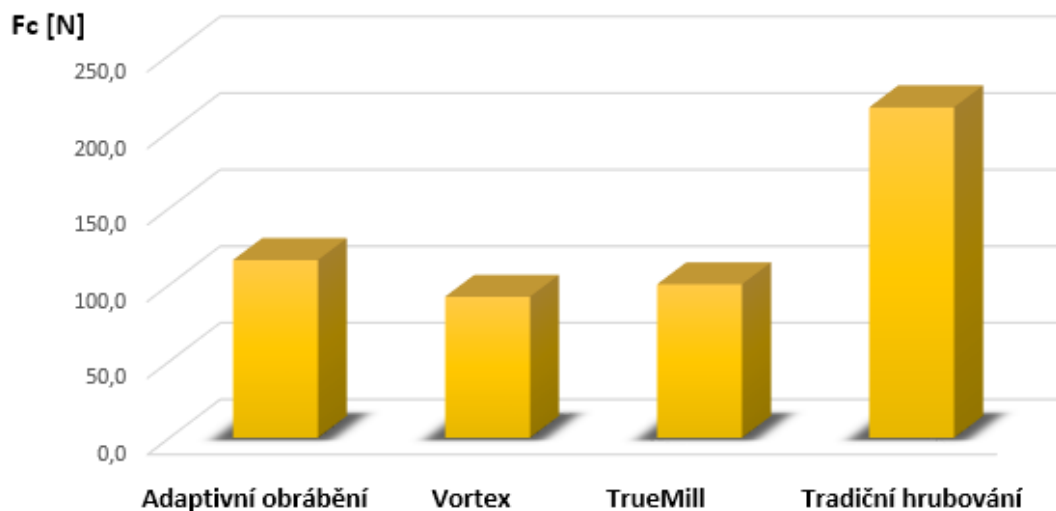
Složka řezné síly	Adaptivní hrubování	Vortex	TrueMill	Tradiční hrubování
$F_c$ [N]	116,1	92,1	100,3	215,8
$F_{cN}$ [N]	76,8	66,4	77,6	100,6
$F_p$ [N]	92,6	139,9	48,8	166,6
$F$ [N]	167,2	179,7	135,9	290,6

### **Řezná síla $F_c$**

Řezná síla  $F_c$  působí ve směru vektoru řezné rychlosti. Průměrná velikost této síly se pro Adaptivní hrubování pohybovala v hodnotách od 98N do 134N, pro Vortex od 82N do 114N, pro TrueMill od 82N do 140N a pro tradiční hrubování od 98N do 396N.

Nejnižší naměřená a zprůměrovaná řezná síla  $F_c$  je u strategie Vortex. Nejvyšší u tradičního hrubování.

## Řezná síla $F_c$ [N]

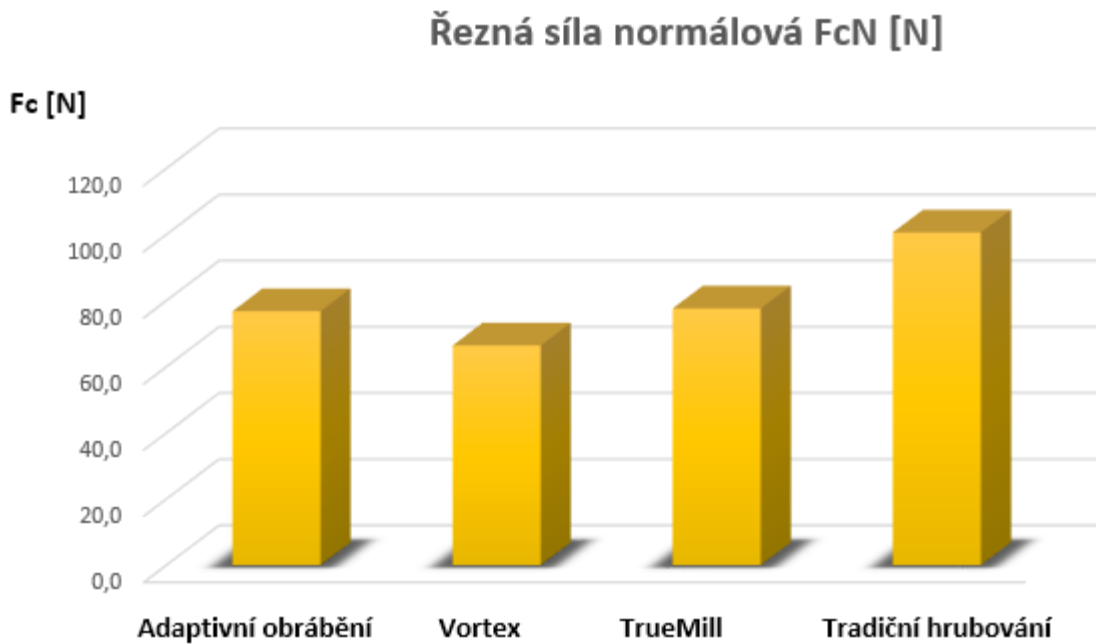


*Graf 1 Průměrné hodnoty řezné síly  $F_c$*

### Řezná síla normálová $F_{cN}$

Řezná síla normálová  $F_{cN}$  je síla, která působí ve směru posuvu. Průměrná velikost této síly se pro Adaptivní hrubování pohybovala v hodnotách od 70N do 84N, pro Vortex od 60N do 75N, pro TrueMill od 69N do 96N a pro tradiční hrubování od 75N do 128N.

Nejnižší naměřená a zprůměrovaná řezná síla normálová  $F_{cN}$  je u strategie Vortex. Nejvyšší u tradičního hrubování.

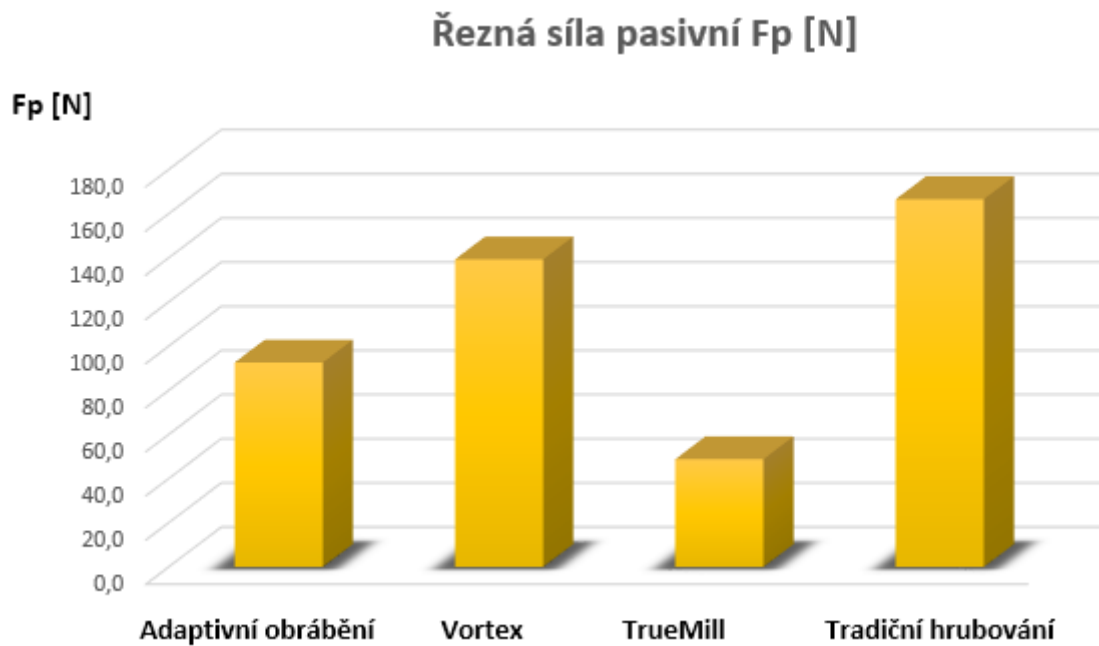


*Graf 2 Průměrné hodnoty řezné síly normálové  $F_{cN}$*

### **Řezná síla pasivní $F_p$**

Řezná síla pasivní  $F_p$  působí ve směru nejmenší tuhosti obráběcí soustavy. Průměrná velikost této síly se pro Adaptivní hrubování pohybovala v hodnotách od 72N do 119N, pro Vortex od 117N do 177N, pro TrueMill od 28N do 64N a pro tradiční hrubování od 114N do 232N.

Nejnižší naměřená a zprůměrovaná řezná síla pasivní  $F_p$  je u strategie TrueMill. Nejvyšší u tradičního hrubování.



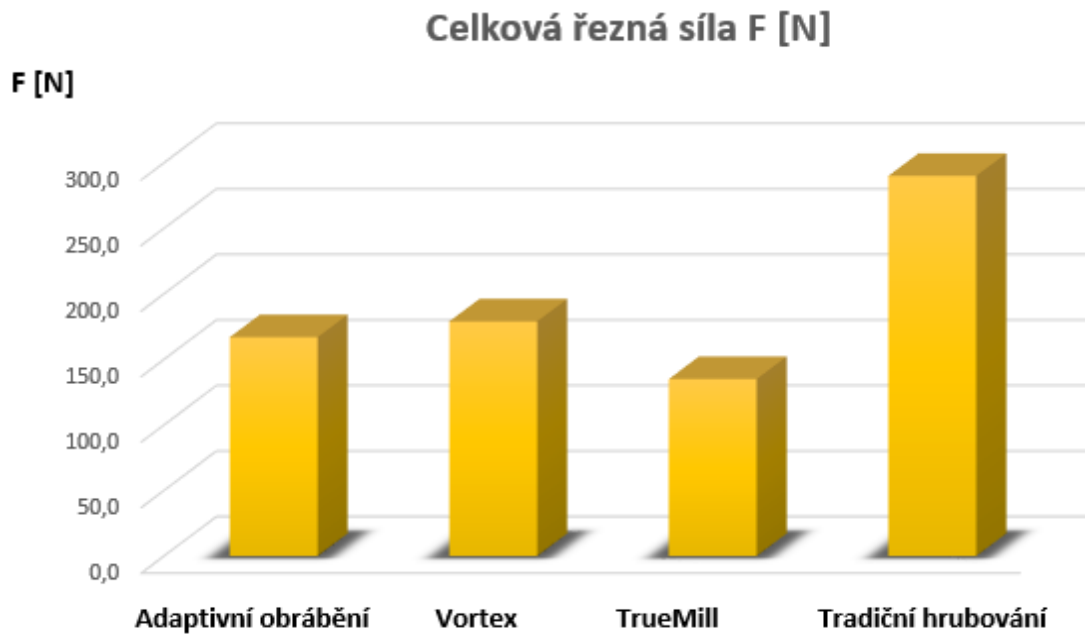
*Graf 3 Průměrné hodnoty řezné síly pasivní  $F_p$*

### **Celková řezná síla $F$**

Průměrná velikost celkové řezné síly  $F$  je výslednicí složek  $F_c$ ,  $F_{cN}$  a  $F_p$ . Tato síla udává celkové zatížení břitu řezného nástroje v průběhu jednoho záběru [27].

Průměrná velikost této síly po výpočtu vyšla pro Adaptivní hrubování na 167 N, pro Vortex na 179N, pro TrueMill na 135N a pro tradiční hrubování na 290N.

Nejnižší vypočtená celková řezná síla je u strategie TrueMill. Nejvyšší u tradičního hrubování.



*Graf 4 Průměrné hodnoty celkové řezné síly F*

Nejvyšších hodnot naměřených řezných sil v průběhu obrábění dosahovalo tradiční hrubování. Toto je způsobeno neustálým přetěžováním řezného nástroje v průběhu obrábění. V praxi to znamená, že by bylo zapotřebí snížit hodnoty vypočtených řezných podmínek na hraničních hodnotách, jinak by navyšování řezných sil vedlo k přetížení nástroje ústící do destrukce nástroje.

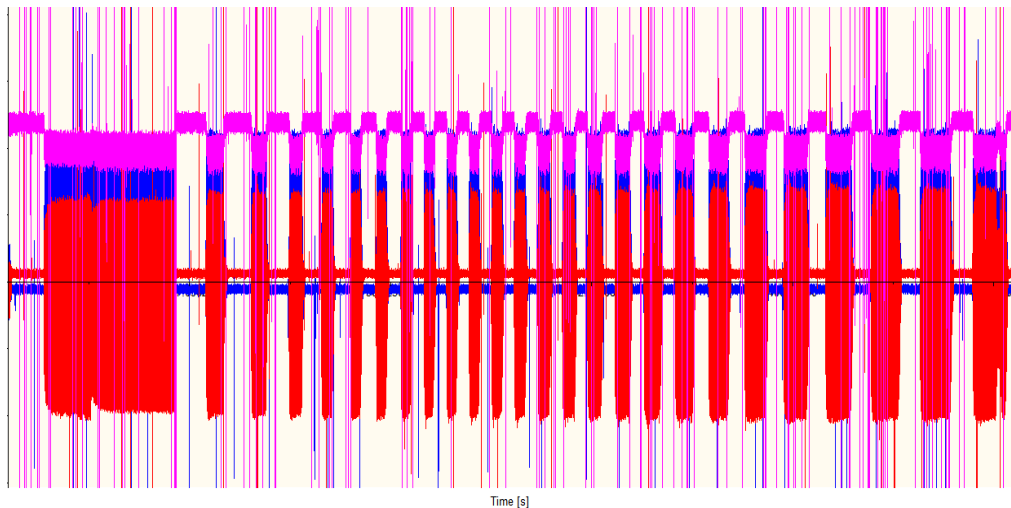
Nejmenších naměřených a zprůměrovaných řezných sil dosáhl software SurfCam se strategií TrueMill.

### 5.1.2 Vizuální porovnání řezných sil

Kromě naměřených hodnot řezných sil je důležitý i samotný průběh řezných sil. Konkrétně jde zejména o to, jak je velikost řezných sil při záběru konstantní, silové zatížení nástroje při zajetí nástroje do materiálu či vyjetí nástroje z materiálu. Dalším důležitým faktorem náhlé změny v zatížení nástroje při záběru. Pro toto porovnání jsem použil záznamy z komplexnějšího modelu, jelikož vzhledem k obráběným geometriím bude záznam řezných sil zajímavější.

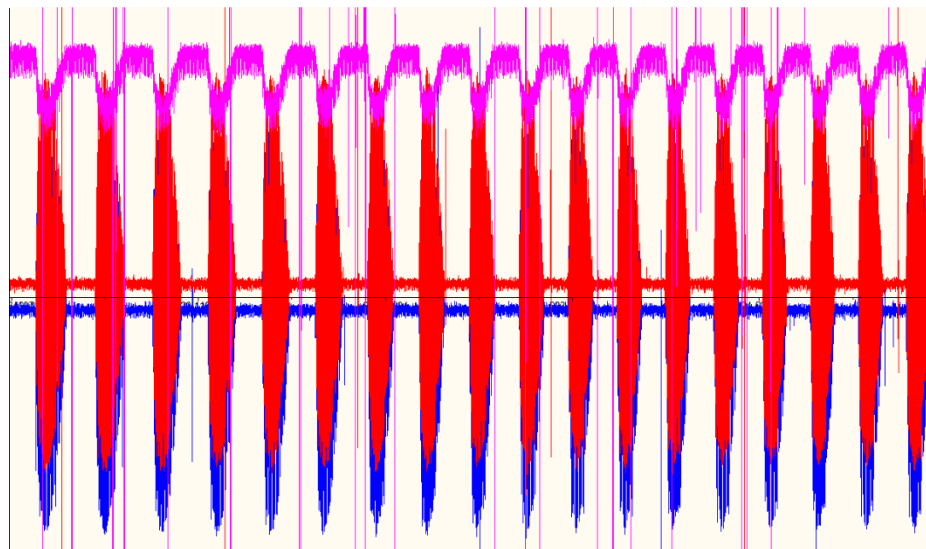
Na níže uvedených obrázcích jsou zobrazeny záznamy řezných sil z jednotlivých strategií. V software Dynoware byl proveden zoom tak, aby bylo názorně vidět více záběrů za sebou.

Z prvního záznamu, který vznikl při obrábění strategií Adaptivní obrábění lze vidět, že dosažené řezné síly v průběhu obrábění jsou konstantní. Šířka záběru se liší vzhledem k obráběné geometrii, přičemž pro HSMWorks je typické vytvoření prostoru nástrojem ve spirále. Proto je první záběr tak široký.



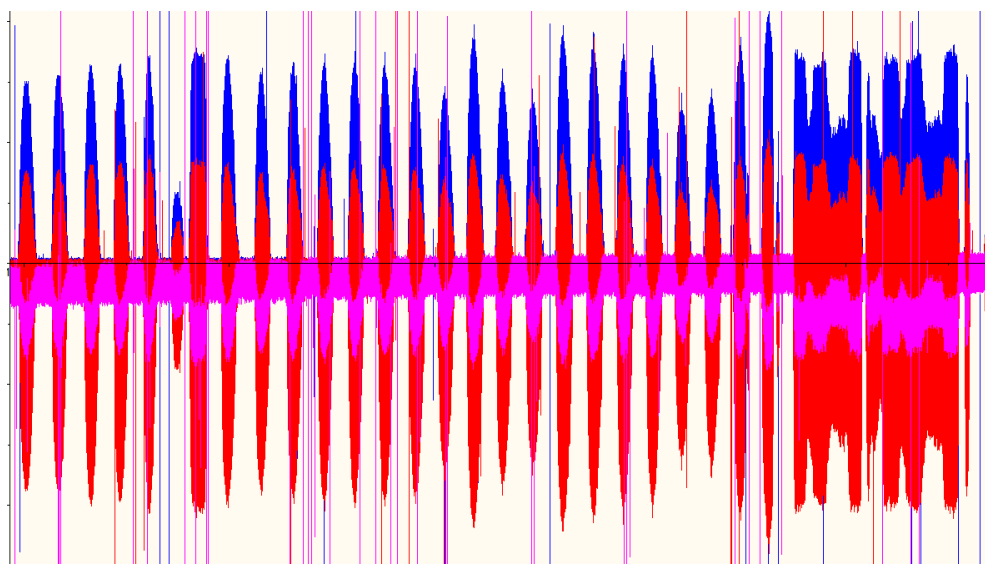
*Obr. 36 Konstantní velikost řezných sil – HSMWorks*

Z druhého záznamu, který vznikl při obrábění strategií Vortex lze vidět, že dosažené řezné síly že dosažené řezné síly v průběhu obrábění jsou konstantní. Na rozdíl od prvního záznamu je zde vidět, že tvar záběrů je více zaoblený.



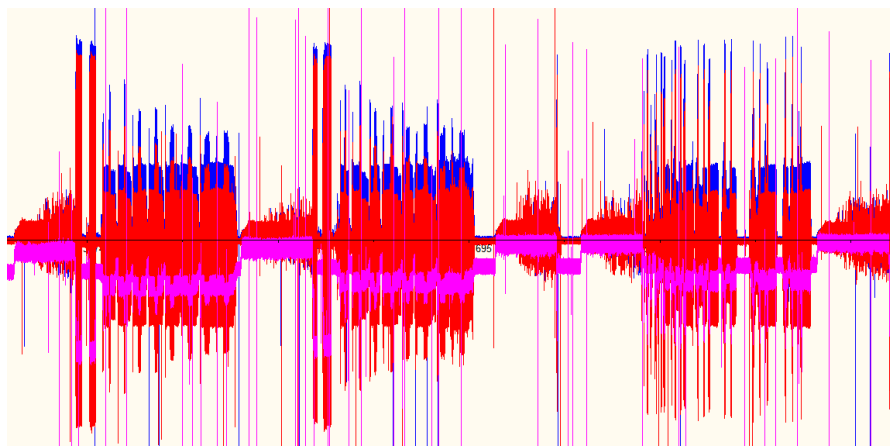
*Obr. 37 Konstantní velikost řezných sil – PowerMill*

Z třetího záznamu, který vznikl při obrábění strategií TrueMill lze vidět, že dosažené řezné síly že dosažené řezné síly v průběhu obrábění nejsou příliš konstantní. Obdobně vypadaly řezné síly v průběhu celého záznamu.



*Obr. 38 Nekonstantní velikost řezných sil – SurfCam*

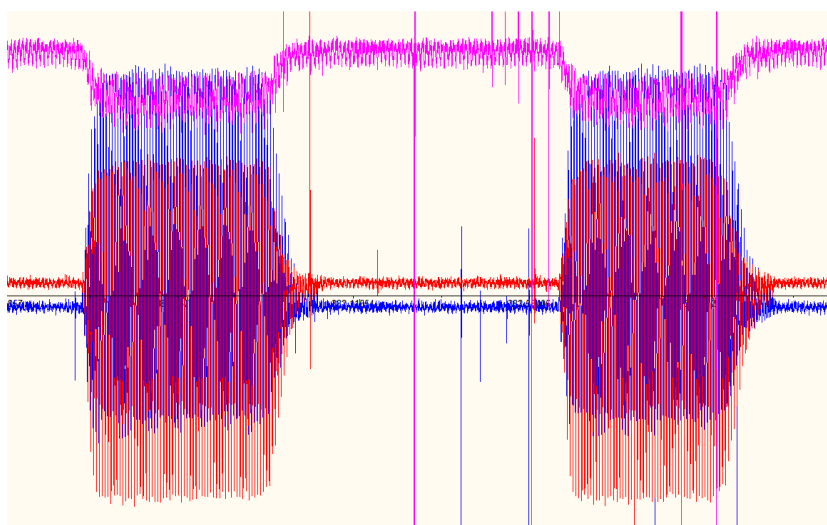
Čtvrtý záznam, který vznikl při obrábění tradičním hrubováním lze vidět, že takové obrábění je doprovázeno neustálým přetěžováním řezného nástroje. Pokud nástroj najíždí do další obráběné vrstvy nebo obrábí v rozích či drážkách, překročí hodnotu zadaného stranového kroku a řezné síly rapidně vzrostou. V našem experiment dosáhly řezné síly v těchto případech zhruba dvojnásobné hodnoty.



*Obr. 39 Výkyvy ve velikosti řezných sil – Tradiční hrubování*

Na níže uvedených obrázcích jsou zobrazeny detailnější záznamy řezných sil z jednotlivých strategií.

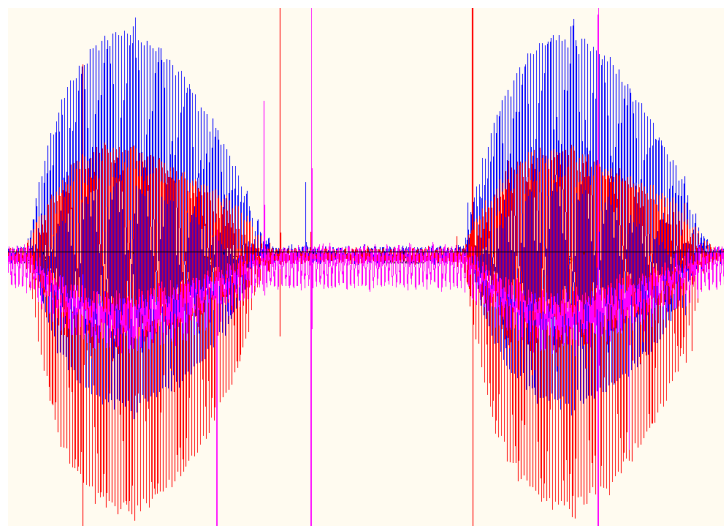
První obrázek pořízený ze záznamu při obrábění strategií Adaptivní obrábění ukazuje typicky obdélníkový tvar řezných sil. Nástroj po zasetí do materiálu dosáhne téměř okamžitě maximálních hodnot řezných sil, které si poté udrží na konstantní hodnotě.



*Obr. 40 Detail záběrů řezných sil – HSMWorks*

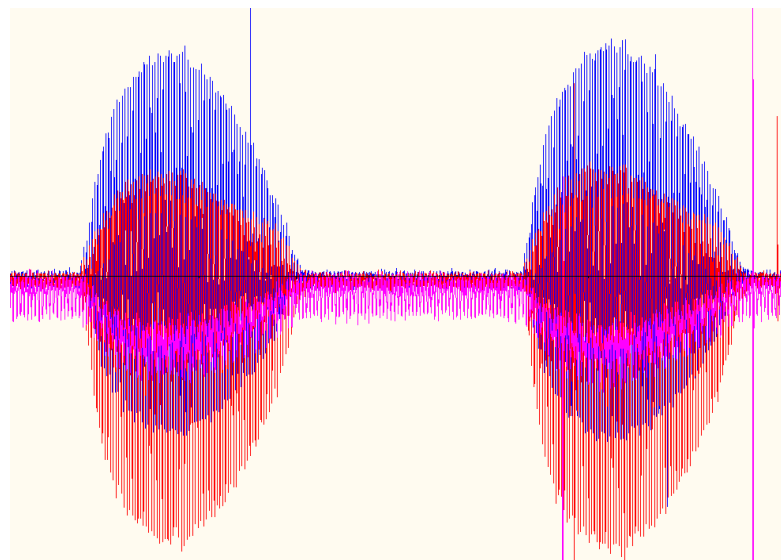


Druhý obrázek pořízený ze záznamu při obrábění strategií Vortex ukazuje typický kapkovitý tvar řezných sil. Nástroj se při najíždění do materiálu plynule zanořuje, dosáhne svého maxima a poté z materiálu plynule vyjíždí. Jednotlivé záběry mají stejný tvar v průběhu celého obrábění a dosahují přibližně stejných hodnot maximálních řezných sil.



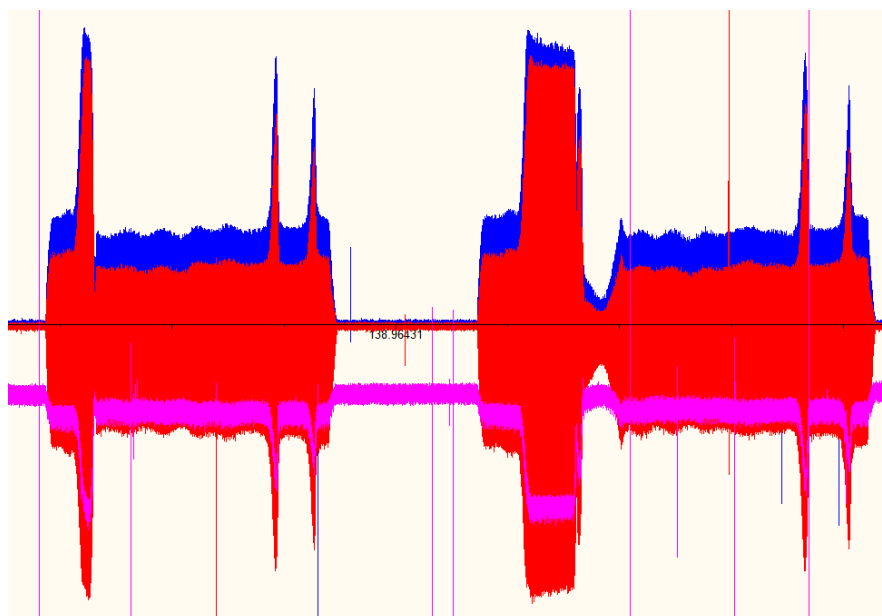
*Obr. 41 Detail záběrů řezných sil – PowerMill*

Třetí obrázek pořízený ze záznamu při obrábění strategií TrueMill ukazuje typický kapkovitý tvar řezných sil. Průběh je tedy obdobný jako u strategie Vortex s tím rozdílem, že jednotlivé záběry mají sice stejný tvar v průběhu celého obrábění, ale nedosahují přibližně stejných hodnot maximálních řezných sil.



*Obr. 42 Detail záběrů řezných sil – SurfCam*

Čtvrtý obrázek pořízený ze záznamu při obrábění tradiční hrubovací strategií zobrazuje detailněji přetěžování řezného nástroje. Podobné tvary naměřených řezných sil lze nalézt v průběhu celého obrábění. Jak již bylo zmíněno, pokud nástroj najíždí do další obráběné vrstvy nebo obrábí v rozích či drážkách, překročí hodnotu zadaného stranového kroku a řezné síly rapidně vzrostou.



*Obr. 43 Detail záběrů řezných sil – Tradiční hrubování*

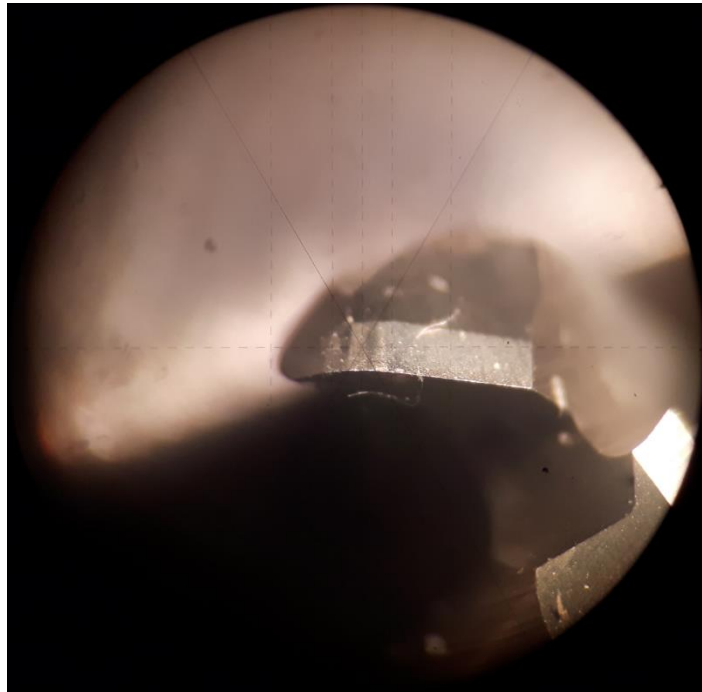
Nejhorší vizuální zobrazení řezných sil bylo pozorováno při tradičním hrubování. Naměřené řezné síly vzrůstají v průběhu celého obrábění a velký počet záběrů nástroje do materiálu není konstantní, ale začíná prudkým nárůstem řezných sil. Jak již bylo zmíněno v závěrečném hodnocení naměřených hodnot řezných sil, řešením by bylo snížení použitých řezných podmínek, jinak by mohlo docházet k rychlému opotřebenosti nástroje či k rozechvění soustavy stroj-nástroj-obrobek.

Nejlepší vizuální zobrazení řezných sil bylo pozorováno při Adaptivním obrábění a při strategii Vortex. Hodnoty naměřených řezných sil jsou konstantní v průběhu celého obrábění, na rozdíl od TrueMillu, který vykazoval v rámci jednotlivých záběrů rozdílné hodnoty naměřených řezných sil.

Z hlediska záběru nástroje do materiálu se pro nástroj může zdát vhodnější algoritmus Vortexu, jelikož nástroj najíždí a vyjíždí z materiálu pozvolna. Na druhou stranu není dobré, když se nástroj jenom tře o materiál a může dojít k vibracím. Algoritmus HSMWorksu funguje tak, že nástroj okamžitě zabere, patřičně se vůči materiálu „vypne“ a k vibracím nedochází.

## 5.2 Opotřebení řezných nástrojů

Opotřebení řezných nástrojů bylo měřeno pod mikroskopem. Na níže zobrazeném obrázku je zobrazen nástroj, který byl použit pro frézování tradičním hrubováním. I přesto, že na tento nástroj působili nejvyšší řezné síly v průběhu obrábění, nepodařilo se mi na nástroji identifikovat jakoukoliv formu opotřebení. Povlak byl pouze nepatrně poškozený a na nástrojích bylo možné vidět původní nabroušenou geometrii.



*Obr. 44 Břit nástroje po obrábění*

Experimentem jsem zjistil, že řezné nástroje jsou kvalitní a navrženy pro obrábění hliníkových slitin. Opotřebení řezného nástroje tedy nebylo nakonec vyhodnoceno a toto kritérium tedy bylo vyřazeno ze závěrečného hodnocení.

Pro další experimenty v této oblasti by bylo vhodné, použít pro obrábění materiál s horší obrobiteľností. Materiál EN-AW 7075 byl v tomto experimentu použit, protože byl na skladu a nebylo tudíž nutné shánět finanční prostředky na jiný materiál.

### 5.3 Vyhodnocení času obrábění

Jak již bylo zmíněno, nejzákladnějším požadavkem na hrubování je odebrání co možná největšího objemu přebytečného materiálu v co možná nejkratším čase. Čas obrábění lze zjistit přímými výpočty, které jsou obsaženy v CAM softwarech. Velice často jsou uvedeny časy řezných i neřezných pohybů a vzdálenosti, které nástroj při těchto pohybech vykoná.

Tento vypočtený čas obrábění v CAM softwarech však nebere v potaz dynamiku obráběcích strojů, čili jejich potřebu zrychlení a brždění posuvů či roztáčení vřetene. Proto je skutečný čas obrábění vzhledem k vypočtenému vyšší, zpravidla se jedná přibližně o 10%. V níže uvedených tabulkách jsou uvedeny vypočtené časy obrábění, včetně délky drah nástroje. Hodnoty tedy byly vypočteny CAM softwary. Je zde uveden i skutečný čas obrábění, který byl změřen řídicím systémem obráběcího stroje.

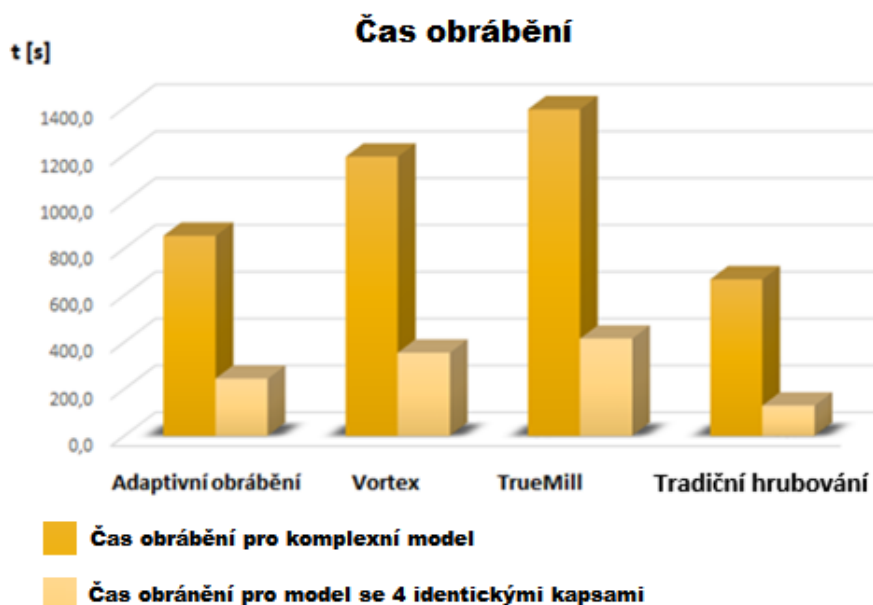
Tab. 10 Čas obrábění a délky posuvů pro komplexní model

Model a CAM software	Vzdálenost posuvů [m]	Vzdálenost rychloposuvů [m]	Čas posuvu [min]	Čas rychloposuvu [min]	Čas obrábění [min]	Čas obrábění (ŘS) [min]
HSMWorks	19,5	5,7	13:19	0:33	13:52	14:14
PowerMill	23,5	10,3	16:11	1:53	18:04	19:52
SurfCam	41,6 - včetně rychloposuvů	-	Neuvedeno	Neuvedeno	22:43	23:14
Tradiční hrubování	13,3	4,3	10:03	0:27	10:30	11:08

Tab. 11 Čas obrábění a délky posuvů pro model se 4 identickými kapsami

Model a CAM software	Vzdálenost posuvů [m]	Vzdálenost rychloposuvů [m]	Čas posuvu [min]	Čas rychloposuvu [min]	Čas obrábění [min]	Čas obrábění (ŘS) [min]
HSMWorks	5,2	0,9	3:49	0:05	3:55	4:04
PowerMill	7,4	1,2	5:07	0:15	5:22	5:55
SurfCam	9,8 - včetně rychloposuvů	-	Neuvedeno	Neuvedeno	6:40	6:55
Tradiční hrubování	2,5	0,05	1:52	0:01	1:53	2:09

Níže uvedený graf zobrazuje dosažený čas obrábění z jednotlivých softwarů pro oba obráběné modely.



Graf 5 Čas obrábění pro jednotlivé strategie

Nejkratší čas obrábění díky nejkratším drahám strategie má tradiční hrubování, jelikož obráběcí dráhy takové strategie se příliš zaměřují pouze na obráběnou geometrii, Takže jsou vypočteny tak, aby byly nejkratší, jak je možné. Výpočetní algoritmy tak hledají způsob, jak nejrychlejším způsobem při daném nastavení obrobit danou geometrii.

Z hlediska strategií, které generují dráhy s řízeným úhlem opásání, dopadl nejlépe CAD/CAM software HSMWorks, jehož algoritmus je schopen vytvořit dráhu tak, že na rozdíl od PowerMillu a SurfCamu netvoří tolik drah v drážkových a tedy úzkých útvarech.

Čas obrábění se výrazně promítá do ekonomiky celého obráběcího procesu. Jelikož nebylo na nástrojích pozorováno žádné opotřebení, nebylo možné provést věrohodnou nákladovou analýzu. Tato práce se tedy nezabývá ekonomickým hodnocením.

Ekonomickým hodnocením se zabývá například bakalářská práce Adama Hrabovského: Porovnání výkonných hrubovacích operací v CAM softwarech [29].

## 6. Závěr

Cílem experimentu bylo porovnání tří progresivní hrubovacích strategií ze tří softwarů – HSMWorks, PowerMill a Surfcam. Pro úplnost experimentu byla zařazená čtvrtá strategie, která je založena na tradičním hrubování.

Nejnižších průměrných hodnot řezných sil bylo dosaženo strategií TrueMill ze softwaru SurfCam. I přes fakt, že řezné síly nebyly v průběhu obrábění zcela konstantní, což by se dalo při konstantním úhlu opásání řezného nástroje předpokládat. Naměřené řezné síly při obrábění strategiemi Vortex a Adaptivní obrábění ze softwarů PowerMill a HSMWorks vykazovaly v průběhu celého záznamu konstantní hodnoty. Nejvyšších průměrných hodnot řezných sil bylo dosaženo při obrábění tradiční hrubovací strategií bez optimalizačních nástrojů pro řízení úhlu opásání řezného nástroje.

Na řezných nástrojích nebylo pozorováno žádné opotřebení. Zejména proto, že vzhledem k dostupnému obráběcímu stroji nemohly být použity doporučené řezné podmínky, ale nižší. Zejména řezná rychlost a posuvy. Dále by byl pro experiment vhodný hůře obrobitelný materiál nebo několikanásobně delší čas nástroje v řezu. V tomto ohledu jsem však byl limitován množstvím a materiálem dostupných polotovarů.

Nejkratšího času obrábění dosáhla strategie Adaptivní obrábění, která byla přibližně o 30% rychlejší než strategie Vortex a o 40% rychlejší než strategie TrueMill. Tradiční hrubování je na první pohled rychlejší, nicméně v praxi je zapotřebí korigovat neustálé přetěžování nástroje snížením řezných podmínek.

Souhrnným hodnocením při podmínkách daným experimentem bylo zjištěno, že nejvhodnější progresivní strategii obsahuje CAD/CAM software HSMWorks, jelikož generuje dráhy s nejkratším časem obrábění a řezné síly dosahované při obrábění tímto softwarem nejsou nejvyšší.

Dále bylo zjištěno, že klasická hrubovací strategie vykazovala v naměřených řezných silách veliké výkyvy, které dosahovaly zhruba dvojnásobných hodnot než při optimalizované dráze. Z tohoto důvodu si technolog nemůže dovolit maximální řezné podmínky doporučené výrobcem nástrojů, jinak by mohlo docházet k rychlému opotřebenosti řezných nástrojů z důvodu jejich neustálého přetěžování.



Naopak progresivní hrubovací strategie s optimalizovanými drahami bych doporučil používat v kombinaci s maximálními řeznými podmínkami, jinak tyto strategie poztrácí na významu.

Experimentem bylo ověřeno, že progresivní strategie odstraňují špičková zatížení v řezných silách při obráběcím procesu. Díky tomu je možné nástroje provozovat při vyšších řezných podmínkách, bez rizika jejich přetěžování. Vyšší řezné podmínky povedou ke snížení potřebného obráběcího času a výrazně se promítnou do ekonomiky obráběcího procesu.

## Použitá literatura

- [1] KOCMAN, Karel a Jan PROKOP. *Speciální technologie obrábění*, Řešené příklady, sylabus <http://www.fme.vutbr.cz/opory/>
- [2] VLACH, Bohumil. *Technologie obrábění a montáží*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990, 464 s.
- [3] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008, 1 CD-ROM [cit. 2015-11-15]. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] MÁDL, Jan. *Teorie a metodika obrábění*. Praha: ČVUT, 1996.
- [5] HUMÁR, A. *Technologie obrábění – 1. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie". Brno: VUT Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s.
- [6] MAREK, Jiří a Petr BLECHA. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010, 420 s. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [7] *Výkon a kroutící moment* [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting\\_started/machines\\_for\\_milling/pages/power-and-torque.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/machines_for_milling/pages/power-and-torque.aspx)
- [8] *Nástrojové materiály*. [online]. [cit. 2013-06-11]. Dostupné z: [http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/ON/2013\\_1\\_Nastrojove\\_materialy.pdf](http://u12134.fsid.cvut.cz/podklady/ON/2013_1_Nastrojove_materialy.pdf)
- [9] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Vyd. 2., přeprac. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [10] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007c1999, 3 sv. (80, 84, 88 s.). ISBN 978-80-01-03752-2.
- [11] Kvasnička, I. - Slavík, V. - Štajnochr, L.: *Obráběcí nástroje*. Skripta ČVUT, 1998, 98 s.

- [12] *Příručka pro technology: Proces obrábění kovů- vliv geometrie*. [online]. [cit. 2013-06-11]. Dostupné z: [http://www.secotools.com/CorpWeb/Slovakia/Aktuality/Patrick%20De%20Vos%20-%20cyklus/8/Seco\\_09.pdf](http://www.secotools.com/CorpWeb/Slovakia/Aktuality/Patrick%20De%20Vos%20-%20cyklus/8/Seco_09.pdf)
- [13] BORO VAN, Petr. *Řezné nástroje (6)*. [online]. [cit. 2013-06-11]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-6\\_8518.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-6_8518.html)
- [14] STANĚK, Vlastimil. *CAD/CAM historie a současnost (2)* [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <https://www.t-support.cz/kat/cad-cam-historie-a-soucasnost-2>
- [15] ALBERT, Mark. *Steering Clear Of Corner Concerns* [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <http://www.mmsonline.com/articles/steering-clear-of-corner-concerns>
- [16] DE VOS, Patrick. Dynamické frézování - využití kompenzačního přístupu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-dynamicke-frezovani-vyuziti-kompenzacniho-pristupu.html>
- [17] DE VOS, Patrick. Jak dosáhnout vysoké produktivity při frézování? *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: [https://www.secotools.com/CorpWeb/Czech%20Republic/Aktuality/Patrick%20-%20s%C3%A9rie%20Milling%202013/6-R-09\\_2013\\_jak%20dos%C3%A1hnout%20vysok%C3%A9%20produktivity%20p%C5%99i%20fr%C3%A9zov%C3%A1n%C3%AD.pdf](https://www.secotools.com/CorpWeb/Czech%20Republic/Aktuality/Patrick%20-%20s%C3%A9rie%20Milling%202013/6-R-09_2013_jak%20dos%C3%A1hnout%20vysok%C3%A9%20produktivity%20p%C5%99i%20fr%C3%A9zov%C3%A1n%C3%AD.pdf)
- [18] MARŠÍČEK, Roman. *Pramet - Seminář odborník*.
- [19] *HSMWorks / Inventor HSM - Adaptivní obrábění* [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: [http://www.lcpro.cz/hsmworks\\_adaptivni\\_obrazeni.php](http://www.lcpro.cz/hsmworks_adaptivni_obrazeni.php)
- [20] *PowerMill* [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <http://www.delcam.cz/produkty/powermill/>
- [21] *Delcam to Unveil Vortex at MACH 2012 in UK* [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: [http://www.tenlinks.com/news/PR/DELCAM/031912\\_vortex.htm](http://www.tenlinks.com/news/PR/DELCAM/031912_vortex.htm)

- [22] *Technologie TrueMill* [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <http://www.3epraha.cz/surfcam/profesni-cleneni-surfcam/technologie-truemill>
- [23] *Hliník AlZn6Mg2Cu - ČSN 424222* [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424222.htm>
- [24] *EN AW 7075* [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <http://gleich.de/cz/produkty/vlcovan-desky/vlcovan-desky-en-aw-/en-aw-7075#data>
- [25] *Elektronický katalog řezných nástrojů* [online]. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <http://www.schnittdaten.eu/inovatoools/#technologie>
- [26] *Technická specifikace dynamometru firmy Kistler*. Dostupné z: <http://www.kistler.com/ca/en/product/torque/9123C1011>
- [27] MALÝ, J. a ZEMAN, P. *Vliv řezných prostředí a řezných podmínek na velikost sil a integritu povrchu při frézování slitiny Ti6Al4V*. [výzkumná zpráva V-07-090]. Praha: VCSVTT, 2007, 84s.
- [28] ČSN ISO 3002-4. *Základní veličiny při razání a brúsení. Část 2: Geometria aktivnej časti rezných nástrojov: Všeobecné prevodové vzorce vzťahujúce sa k nástrojovým a pracovným uhlom*. 1994.
- [29] HRABOVSKÝ, A. *Porovnání výkonných hrubovacích operací v CAM softwarech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 55 s. 11 příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Řezné síly při nesousledném a sousledném frézování .....	12
Obrázek 2: Piezoelektrické Dynamometry KISTLER pro měření složek řezné síly.....	14
Obrázek 3: Hlavní části číslicově řízeného stroje .....	15
Obrázek 4: Kapsovací cyklus s 10% radiální hloubkou řezu .....	25
Obrázek 5: Kapsovací cyklus s 10% radiální hloubkou řezu – ostrý roh .....	25
Obrázek 6: Porovnání Adaptivní dráhy a tradičního hrubování .....	28
Obrázek 7: Dráhy nástroje při použití technologie Vortex .....	29
Obrázek 8: Porovnání TrueMill dráhy a tradičního hrubování .....	30
Obrázek 9: Komplexní model pro 2D hrubování .....	32
Obrázek 10: Model se 4 identickými kapsami .....	32
Obrázek 11: Aplikace řezného nástroje č. 245.....	34
Obrázek 12: Frézovací centrum VMC 500.....	36
Obrázek 13: Upnutí polotovaru .....	37
Obrázek 14: Výsledné opásání nástroje při použitím $a_e$ .....	39
Obrázek 15: Adaptivní obrábění v HSMWorksu .....	41
Obrázek 16: Adaptivní obrábění – detail dráhy druhého modelu .....	41
Obrázek 17: Kapsovací obrábění – detail dráhy druhého modelu.....	42
Obrázek 18: Vortex obrábění v PowerMillu .....	43
Obrázek 19: Vortex - detail dráhy druhého modelu .....	44
Obrázek 20: TrueMill hrubování v SurfCamu .....	45
Obrázek 21: TrueMill - detail dráhy druhého modelu.....	46
Obrázek 22: Dynamometr Kistler 9123C1111.....	47
Obrázek 23: Výsledné složky sil v experiment.....	49
Obrázek 24: Záznam řezných sil ze software DynoWare – HSMWorks.....	50
Obrázek 25: Jednotlivé záběry nástroje při obrábění - HSMWorks .....	51

Obrázek 26: Detail jednoho záběru - HSMWorks .....	51
Obrázek 27: Záznam řezných sil ze software DynoWare - PowerMill .....	52
Obrázek 28: Jednotlivé záběry nástroje při obrábění – PowerMill.....	53
Obrázek 29: Detail jednoho záběru – PowerMill.....	53
Obrázek 30: Záznam řezných sil ze software DynoWare – SurfCam.....	54
Obrázek 31: Jednotlivé záběry nástroje při obrábění – SurfCam .....	54
Obrázek 32: Detail jednoho záběru - SurfCam .....	55
Obrázek 33: Záznam řezných sil – Tradiční hrubování.....	55
Obrázek 34: Jednotlivé záběry nástroje při obrábění – Tradiční hrubování .....	56
Obrázek 35: Detail jednoho záběru – Tradiční hrubování .....	56
Obrázek 36: Konstantní velikost řezných sil – HSMWorks.....	62
Obrázek 37: Konstantní velikost řezných sil – PowerMill .....	63
Obrázek 38: Nekonstantní velikost řezných sil – SurfCam.....	63
Obrázek 39: Výkyvy ve velikosti řezných sil – Tradiční hrubování .....	64
Obrázek 40: Detail záběrů řezných sil – HSMWorks .....	64
Obrázek 41: Detail záběrů řezných sil – PowerMill .....	65
Obrázek 42: Detail záběrů řezných sil – SurfCam.....	66
Obrázek 43: Detail záběrů řezných sil – Tradiční hrubování .....	66
Obrázek 44: Břit nástroje po obrábění.....	68

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení nástrojů ze slinutých karbidů do skupin .....	20
Tabulka 2: Mechanické vlastnosti EN-AW 7075 .....	33
Tabulka 3: Chemické složení EN-AW 7075 .....	33
Tabulka 4: <i>Rozměry frézy 245</i> .....	35
Tabulka 5: Technické parametry frézovacího centra VMC 500.....	36
Tabulka 6: Řezné podmínky při experimentu .....	38
Tabulka 7: Ostatní řezné podmínky při experimentu .....	39
Tabulka 8: Parametry dynamometru Kistler 9123C1111 .....	48
Tabulka 9 Průměrné hodnoty naměřených řezných sil .....	57
Tabulka 10: Čas obrábění a délky posuvů pro komplexní model.....	69
Tabulka 11: Čas obrábění a délky posuvů pro model se 4 identickými kapsami.....	70

## Seznam grafů

Graf 1: Průměrné hodnoty řezné síly $F_c$ .....	58
Graf 2: Průměrné hodnoty řezné síly normálové $F_{cN}$ .....	59
Graf 3: Průměrné hodnoty řezné síly pasivní $F_p$ .....	60
Graf 4: Průměrné hodnoty celkové řezné síly $F$ .....	61
Graf 5: Čas obrábění pro jednotlivé strategie .....	70

## Seznam zkratek

CAD – Computer aided design (počítačem podporované programování)

CAM – Computer aided manufacturing (počítačem podporované obrábění)

CNC – Computer numerical control (počítačem řízený stroj)

Ra – Průměrná aritmetická úchylka profilu

TEA – Tool engagement angle (úhel opásání nástroje)

$f_z$  – Posuv na zub

f – Posuv

s – Otáčky vřetene

$v_c$  – Řezná rychlost

$a_p$  – Axiální hloubka řezu

$a_e$  – Radiální hloubka řezu

$M_z$  – Krouticí moment

$F_x$  – Síla osy x

$F_y$  – Síla osy y

$F_z$  – Síla osy z

F – Celková řezná síla

$F_c$  – Řezná síla

$F_{cN}$  – Řezná síla normálová

$F_p$  – Řezná síla pasivní

$F_a$  – Aktivní síla

HSM – High speed machining (obrábění vysokými rychlostmi)

HPM – High power machining (vysoce výkonné frézování)

HFM – High feed machining (obrábění vysokým posuvem)

HSC – High speed cutting (vysokorychlostní obrábění)



## Seznam příloh:

[A] Třísky z obrábění	tištěná
[B] Fotky obrobků	tištěná
[C] Partprogramy z HSMWorks, PowerMill, SurfCam	elektronická
[D] Modely z Inventoru	elektronická
[E] Záznamy naměřených sil software Dynoware	elektronická

- Přílohy A a B jsou součástí tištěné diplomové práce práce
- Přílohy C, D a E jsou obsaženy na přiloženém CD

## **Příloha A – Třísky z obrábění**

Na níže zobrazeném obrázku jsou třísky, které vznikali při obrábění. Jedná se o velice tenké a drobné vrtulky, s konstantní tloušťkou třísky.



## Příloha B – Fotky obrobků

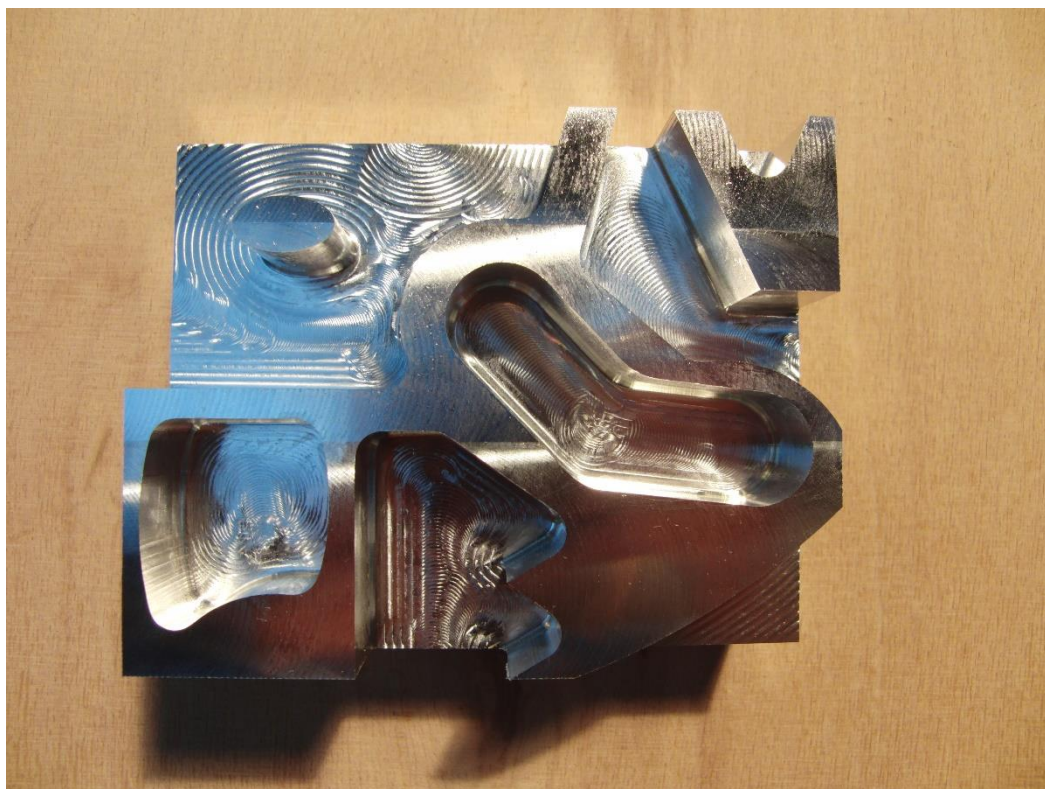
Na níže zobrazeném obrázku se nachází obrobek se 4 identickými kapsami. Levou horní kapsu obráběl software HSMWorks pomocí Adaptivního obrábění, pravou horní kapsu obráběl software PowerMill pomocí strategie Vortex, levou spodní kapsu obráběl software SurfCam pomocí strategie TrueMill a pravou spodní kapsu obráběl software HSMWorks pomocí strategie Kapsa.



HSMWorks – Adaptivní obrábění



PowerMill – Vortex



SurfCam – TrueMill

