



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta strojní**

**Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

**Popis technologie frézování a možnosti programování  
CNC strojů**

**Description of milling technology and CNC machine  
programming**

*Bakalářská práce*

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Autor práce: Jitka Hejhalová

Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

PRAHA 2018

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hejhalová** Jméno: **Jitka** Osobní číslo: **457546**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Popis technologie frézování a možnosti programování CNC strojů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Description of milling technology and CNC machine programming**

Pokyny pro vypracování:

1. Technologie frézování, kinematika řezného pohybu a používané nástroje
2. Možnosti programování CNC strojů (frézek)
3. Technologické možnosti CNC frézek (3 a 5ti osých)
4. Tvorba CNC programu pro zvolenou součást a realizace výroby

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_



Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce



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



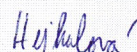
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

**30.4.2018**

Datum převzetí zadání



Přdpis studentky

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně s využitím zdrojů uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze dne ..... 27.7.2018 .....

..... Hejhalová J. Alsa .....

Podpis

**Poděkování:**

Děkuji panu Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá třískovou technologií obrábění, konkrétně frézováním. Technologie frézování má v dnešní době široké možnosti využití, je však důležité znát, jak ji správně použít. Právě proto se práce zaměřuje hlavně na samotnou realizaci řídicího programu pro CNC stroje (frézky), které můžeme rozdělovat podle počtu ovládaných os. Cílem této práce je vytvořit základní charakteristiku frézování, možnosti programování v dnešní době a rozdělení CNC frézek podle počtu ovládaných os. Toto vše formou rešerše v teoretické části práce. Poslední kapitolou bakalářské práce je praktická část, která obsahuje návrh součástky, vytvoření výrobního programu a určení způsobu reálné výroby.

**Klíčová slova:** frézování, programování, CNC stroje

## **Annotation**

This bachelor thesis deals with chip technology of machining, specifically milling. Milling technology has nowadays a wide range of uses, but it is important to know how to properly use it. This is precisely why the thesis focuses on the actual implementation of the control program for CNC machines (milling machines), which we can divide according to the number of controlled axes. The aim of this work is to create a basic characteristic of a milling, programming options in today's time and the distribution of CNC milling machines according to number of controlled axes. All of this in the form of research in the theoretical part of the thesis. The last chapter of the bachelor thesis is the practical part, which contains the design of a component, the creation of the production program and the determination of the way of real production.

**Keywords:** milling, programming CNC machines

# Obsah

Anotace .....	- 5 -
Úvod.....	- 7 -
1 Rozdělení technologií obrábění .....	- 8 -
1.1 Charakteristika frézování .....	- 8 -
1.2 Základní značení a vztahy pro frézování .....	- 9 -
1.3 Kinematika řezného pohybu při frézování.....	- 10 -
1.4 Nástroje pro frézování.....	- 11 -
1.4.1 Rozdělení nástrojů .....	- 11 -
1.5 Řezné podmínky pro frézování .....	- 16 -
2 Možnosti programování CNC strojů (frézek).....	- 17 -
2.1 Ruční programování.....	- 18 -
2.2 Dílenské programování .....	- 21 -
2.3 Strojní programování .....	- 21 -
3 Technologické možnosti CNC frézek.....	- 23 -
3.1 Obrábění 1D – nastavení polohy.....	- 23 -
3.2 Obrábění 2D – pravoúhlé řízení.....	- 23 -
3.3 Obrábění 2D – souvislé řízení.....	- 23 -
3.4 Obrábění 2,5D.....	- 24 -
3.5 Obrábění 3D.....	- 24 -
3.6 Obrábění 3+2D.....	- 25 -
3.7 Obrábění 4D.....	- 25 -
3.8 Obrábění 5D.....	- 26 -
4 Tvorba CNC programu pro zvolenou součást a realizace výroby .....	- 27 -
4.1 CAD .....	- 27 -
4.2 CAM.....	- 30 -
4.2.1 Zadní strana hodin .....	- 30 -
4.2.2 Přední strana hodin .....	- 37 -
4.3 Realizace výroby a dokončení hodin .....	- 44 -
Závěr .....	- 50 -
Seznam použité literatury a zdrojů .....	- 51 -
Seznam obrázků, tabulek a příloh.....	- 53 -

# Úvod

Třískové obrábění stále ukazuje, že je jednou ze základních výrobních metod. Frézování patří v dnešní době společně se soustružením k nejrozšířenějším způsobům obrábění kovů. Frézování je výrobní technologie, kde hlavní rotační pohyb koná nástroj – fréza, vedlejší pohyb vykonává obrobek. [1, 2]

Základními kritérii pro výrobu jsou vysoká produktivita práce a minimální náklady na výrobu. U výrobku musí být zachována jeho funkčnost a spolehlivost. K dosažení těchto požadavků je zapotřebí vhodného výběru stroje, nástroje, metody a podmínek obrábění. Pro dosažení co možná nejlepší opakovatelnosti, flexibility a dodržování rezných podmínek při obráběcích operacích je nahrazován lidský element výpočetní technikou – řídicím systémem.

Obráběcí stroje vybavené CNC řídicími systémy jsou schopné opakovaně dosáhnout tvarové i rozměrové přesnosti i u složitých výrobků. Pro složité součásti obráběné ve více osách je dnes standardním řešením použití CAM systémů. [19]

Cílem této práce je vytvořit rešerši technologie frézování, vyzkoušet si práci s CAM programy a tím získat zajímavé poznatky a zkušenosti, které bych ráda využila v dalším studiu.

# 1 Rozdělení technologií obrábění

Technologie obrábění je vědní obor a zároveň i technologický proces, při kterém vytváříme z obrobků žádané geometrické tvary, jež budou odpovídat předepsaným rozměrům. [1, 2]

Základní rozdělení obrábění [1]:

## **Třískové**

- Řezání
- Soustružení
- Frézování
- Vrtání, vyhrubování, vystružování a zahlubování
- Vyvrtávání
- Hoblování a obrážení
- Protahování a protlačování
- Broušení
- Pilování
- Hlazení
- Superfinašování
- Lapování
- Honování

## **Beztrískové a nekonvenční**

- Elektroerozivní
- Paprskem plazmy
- Paprskem laseru
- Paprskem elektronů
- Vodním paprskem
- Elektrochemické
- Chemické
- Ultrazvukové
- Válečkování
- Kuličkování
- Vyhlazování povrchu diamantem

## 1.1 Charakteristika frézování

Frézování je výrobní proces, jehož podstatou je odebrání materiálu obvykle dvou a vícebřitým nástrojem. Nástroje jsou rotační tělesa. Jedná se o jednu z nejrozšířenějších výrobních metod obrábění, zejména pro zhotovení rovinných a tvarových ploch, ozubení atd. Tloušťka třísky je proměnlivá kvůli přerušovanému řezu. [1, 2]

Frézování se z technologického hlediska rozdělujeme podle polohy osy nástroje k obráběné ploše na dva základní způsoby:

### **Frézování čelní (frézování čelem) (Obrázek 1)**

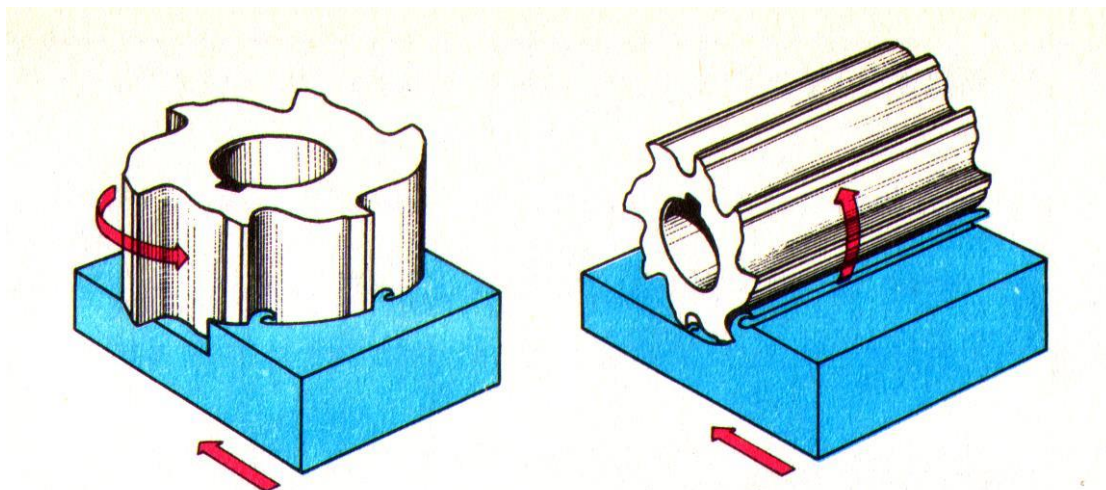
Metoda pro nástroje se zuby na čele i na obvodu. Osa otáčení nástroje je kolmá s obroubenou plochou. [3]



### Frézování válcové (frézování obvodem) (Obrázek 1)

Metoda pro nástroje, jenž mají zuby rozmístěny po obvodu. Osa otáčení nástroje je rovnoběžná s obrobenou plochou. [3]

Velmi často se v praxi využívá jejich kombinace, tzv. **válcové čelní frézování**. Zuby jsou rozmístěny po obvodu i na čele frézy.



Obrázek 1: Ukázka čelního a válcového frézování [7]

## 1.2 Základní značení a vztahy pro frézování

### Otáčky vřetene $n$ [ot/min]

Udávají se v otáčkách za minutu. Rozsah otáček vřetene je jeden ze základních parametrů stroje. [3]

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad [\text{ot/min}] \quad (1.1)$$

Kde  $D$  je průměr frézy.

### Řezná rychlost $v_c$ [m/min]

Určuje obvodovou rychlost, kterou je obrobek opracováván břitem nástroje. [3]

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m/min}] \quad (1.2)$$

### Posuv na zub $f_z$ [mm]

Rovná se dráze, kterou nástroj urazí během záběru jednoho zubu. [3]

### Posuv na otáčku $f_n$ [mm/ot]

Určuje délku dráhy, jakou urazí nástroj za jednu otáčku. [3]

$$f_n = f_z \cdot z \quad [\text{mm/ot}] \quad (1.3)$$

Kde  $z$  označuje počet zubů nástroje.

**Posuv za minutu  $f_{min}$ , popřípadě rychlost posuvu  $v_f$  [mm/min]**

Jedná se o relativní rychlost mezi osou nástroje a obrobkem. Udává dráhu, kterou urazí nástroj za jednu minutu. [3]

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad [mm/min] \quad (1.4)$$

**Axiální hloubka řezu  $a_p$  [mm] a radiální hloubka řezu  $a_e$  [mm]**

Ovlivňují objem odebraného materiálu. [3]

**Úběr materiálu (objem odebraného materiálu)  $V$  [mm<sup>3</sup>/min]**

Udává se vždy za jednotku času. [3]

$$V = a_p \cdot a_e \cdot v_f \quad [mm^3/min] \quad (1.5)$$

### 1.3 Kinematika řezného pohybu při frézování

Hlavním pohybem při frézování je rotace nástroje (frézy). Pohyb vedlejší vykonává obrobek umístěný obvykle na stole frézky, jedná se obvykle o přímočarý pohyb. [1]

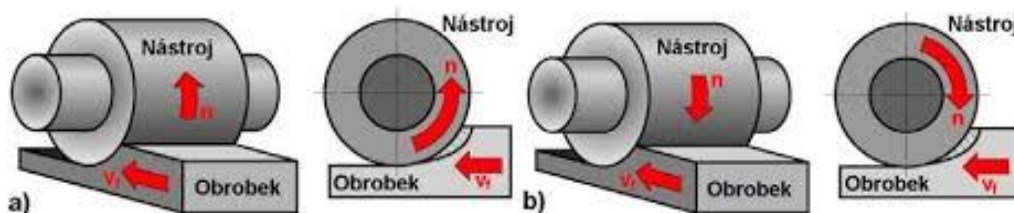
Frézování se rozděluje podle smyslu otáčení frézy vůči směru pohybu obrobku na:

**Nesousledné (Obrázek 2 a))**

Při nesousledném frézování se obrobek posouvá opačným směrem, než jakým se otáčí osa nástroje. Tloušťka třísky se od nulové hodnoty zvyšuje až ke svému maximu, který je na konci záběru daného zubu. Při nesousledném frézování vznikají velké řezné síly, které působí směrem vzhůru a mají tendenci trhat obráběný materiál z upnutí. Na začátku řezu nástroj prokluzuje. Jakost povrchu hotových ploch je horší a trvanlivost nástrojů je nižší, než u sousledného frézování. [3, 4]

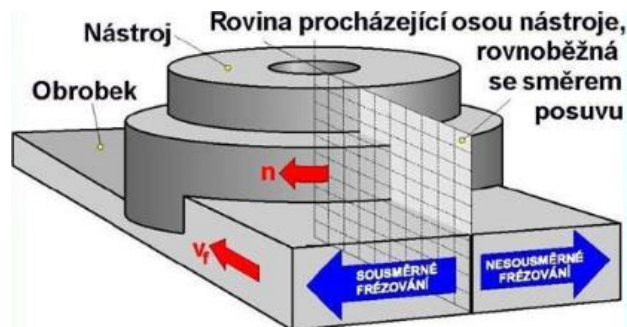
**Sousledné (Obrázek 2 b))**

Sousledné frézování má vlastnost, že se osa frézy otáčí stejným směrem, jakým se posouvá obrobek. Na začátku záběru je tloušťka třísky maximální a postupně se snižuje až k nule. To má za následek, že řezné síly přitlačují obrobek ke stolu frézky. Nedochozí ke kluznému efektu, avšak je způsobeno rázové namáhání bříty. Přínosem je menší sklon ke kmitání a tvoření nárůstků. Při sousledném frézování se dosahuje menších drsností obrobekových ploch. [1, 3]



Obrázek 2: Válcové frézování a) nesousledné b) sousledné [7]

Při čelním frézování dochází k tomu, že nesousledné i sousledné frézování nastává současně. Dochází k tomu, když nástroj obrábí celou plochou na jedno přejetí. [3, 4]



Obrázek 3: Čelní frézování [7]

## 1.4 Nástroje pro frézování

Nástroj pro frézování je oproti soustružnickým nožům obvykle daleko složitější a následkem toho i značně nákladnější. Kvalitní fréza je ovšem základem pro mnoho technologických operací (např. frézování tvarových součástí odvalovacím způsobem). [6]

Konstrukce fréz musí respektovat specifické otázky, které přímo souvisí s procesem frézování. Pro představu: otázka mechaniky tvoření třísky, problematika sousledného/nesousledného frézování apod. To samé platí i při volbě geometrie břitu frézy. [6]

Důsledně se řeší problematika chvění při frézování, které ovlivňuje nástroj hlavně v otázce trvanlivosti. Pozornost je proto věnována rozměrům frézy, počtu zubů, jejich rozteč, upnutí nástroje apod. [6]

### 1.4.1 Rozdělení nástrojů

Frézy se rozdělují podle mnoha hledisek.

1) Podle umístění zubů na těle frézy:

- a) Válcové frézy (Obrázek 4 a)) – zuby jsou rozloženy na válcové ploše. Určeny k frézování rovinných ploch rovnoběžných s osou frézy. [6]
- b) Válcové frézy čelní (Obrázek 4 b)) – zuby jsou rozloženy na ploše válcové a na ploše čelní. Využívají se při frézování dvou rovin na sebe kolmých zároveň. [6]
- c) Čelní frézy (Obrázek 4 c)) – zuby jsou rozloženy na čelní rovině kolmé k ose frézy. Určeny k frézování rovinných ploch. Čelní frézy, které mají průměr větší než 125 mm se nazývají frézovací hlavy. [6]

- d) Kotoučové frézy (Obrázek 4 d)) – zuby jsou rozloženy na ploše válcové a na obou rovinách čelních. Hodí se k frézování drážek a pro čelní frézování bočních rovin. [6]
- e) Frézy úhlové – jsou určeny k frézování zubových drážek v řezných nástrojích, dále k frézování nakloněných rovin a srážení hran. [6]
- i) Jednostranné – zuby jsou rozloženy na jedné ploše kuželové
  - ii) Oboustranné – zuby jsou rozloženy na dvou plochách kuželových.
    - (1) *Souměrné*
    - (2) *Nesouměrné*
- f) Frézy tvarové



Obrázek 4: Typy fréz a) Válcová b) Válcová čelní c) Čelní d) Kotoučová [8, 9, 10, 11]

2) Podle tvaru zubů:

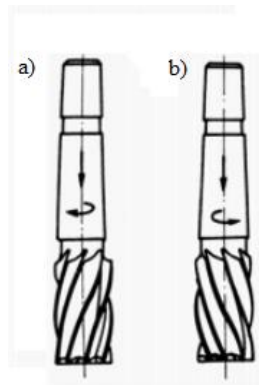
- a) S frézovanými zuby (ostrobřité frézy)
- b) S podtáčenými zuby – hřbet zubů je vytvořen Archimédovou spirálou, kterou lze nahradit kružnicí. Podtáčením se vyrábí všechny druhy tvarových fréz. [6]
- c) S litými zuby

- 3) Podle průběhu ostří vzhledem k ose rotace:
- S přímými zuby
  - S šikmými zuby (Obrázek 4 a), b)) – snižují rázy. [6]
  - Se zuby ve šroubovici – snižují rázy. [6]
    - Pravotočivá
    - Levotočivá
- 4) Podle způsobu upnutí nástroje:
- Nástrčné frézy (Obrázek 4) – upínají se pomocí upínacích trnů. [6]
  - Stopkové frézy (Obrázek 5)
    - Válcové
    - Kuželové



Obrázek 5: Příklad stopkových fréz [12]

- 5) Podle smyslu otáčení:
- Pravořezné (Obrázek 6 a)) – při pohledu od vřeteníku ve směru osy frézy se otáčí nástroj po směru hodinových ručiček. [6]
  - Levořezné (Obrázek 6 b)) – při pohledu od vřeteníku ve směru osy frézy se otáčí nástroj proti směru hodinových ručiček. [6]



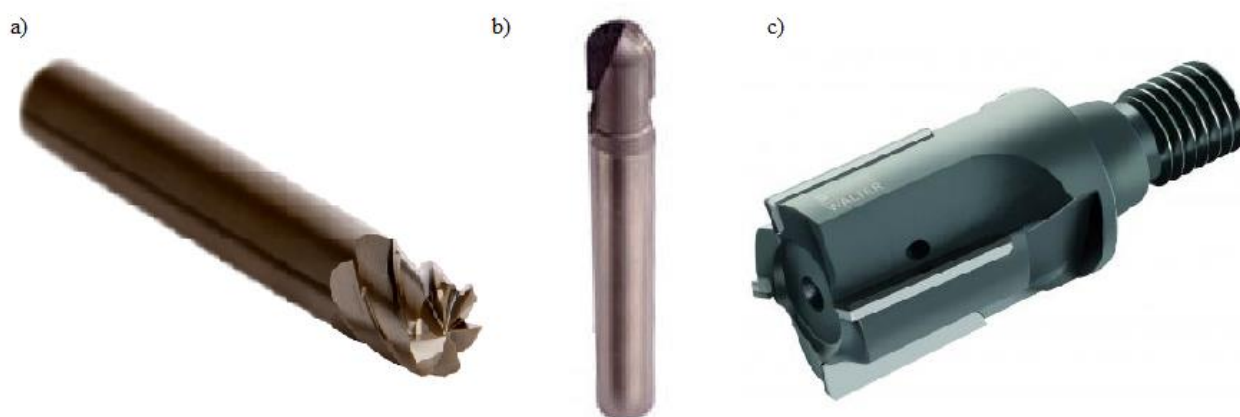
Obrázek 6: Fréza a) pravořezná b) levořezná [13]

- 6) Podle konstrukčního uspořádání:
- Celistvé (monolitní) frézy (Obrázek 4 a), b), d)) – tělo i zuby jsou vyrobeny z jednoho materiálu.
  - Dělené frézy
  - Složené frézy – složeny z několika fréz. Jsou upnuty na společném trnu. [6]
  - Frézy s vkládanými břity (Obrázek 4 c)) – břity jsou buď k tělu frézy připájené, nebo jako výměnné břitové destičky mechanicky upnuté. [6]
- 7) Podle počtu zubů vzhledem k průměru frézy:
- Jemnozubé frézy
  - Polohrubozubé frézy
  - Hrubozubé frézy
- 8) Podle materiálu, ze kterého jsou vytvořené zuby:
- Rychlořezná ocel (RO) (Obrázek 4 a)) – jedná se o materiál s dobrou houževnatostí a odolností proti adheznímu opotřebení. Lze s ní obrábět do teplot blízkých 600 °C, poté již ztrácí svou pevnost. Jejím omezením je nízká pracovní rychlost, která bývá pod 60 m/min. Povlaky na rychlořezné oceli zvyšují řezivost. [14]
  - Slinutý karbid (SK) (Obrázek 4 c)) – jedná se o karbidové částice v kovové vazbě (např. WC, TiC). Vyrábí se práškovou metalurgií. Především se z něho zhotovují výměnné břitové destičky, které mají často povlaky např. nitrid titanu (TiN), povlak má zlatou barvu a je nanášen ve více vrstvách. Oproti rychlořezným ocelím jsou zuby ze slinutých karbidů tvrdší a ošetrivější. Disponují i větší pevností v tlaku. Nevýhodou je jejich menší houževnatost oproti rychlořezným ocelím. [14]
  - Cermet – tento název je kombinací slov keramika (ceramic) a kov (metal). Jedná se o tvrdé keramické částice (např. TiN, TiC) v kovovém pojivu (např. Co, Ni). Vyrábí se práškovou metalurgií. Jsou chemicky stabilní. Hodí se pro jemné obrábění a dokončovací operace ocelí i ocelolitin. V porovnání se slinutými karbidy mají menší houževnatost, ale vyšší pevnost za tepla. Odolnost proti opotřebení je velmi dobrá. Využívá se u nich i povlakování. [14]
  - Řezná keramika (Obrázek 7 a)) – je název pro soubor několika řezných materiálů s odlišným složením. Disponuje vysokou tvrdostí, pevností v tlaku, chemickou stabilitou a vysokou pevností i za tepla. Jejich nevýhodou je křehkost. Používá



se při obrábění šedých litin, žárupevných a žáruvzdorných slitin, kalených ocelí a tak dále. Občas jsou výměnné břitové destičky opatřeny povlaky. Řezná rychlost pro tento materiál se dnes obvykle pohybuje mezi 400 až 600 m/min. [14]

- e) Polykrystalický kubický nitrid bóru (KNB) (Obrázek 7 b)) – je synteticky vyrobený. Jeho výhodou je vysoká tvrdost, extrémně vysoká pevnost za tepla, chemická stabilita a vysoká odolnost proti opotřebení. Výhoda je i chemická stabilita k železným kovům. Nástroje z KNB jsou monolitní nebo dvouvrstvé. Vytváří za vhodných řezných podmínek povrch, který svou kvalitou mnohdy nepotřebuje broušení. [14]
- f) Polykrystalický diamant (Obrázek 7 c)) – svou tvrdostí se blíží monokrystalickému diamantu, který je nejtvrdší známý přírodní materiál. Má vysokou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, dobrou tepelnou vodivost a nízký koeficient tření. Vyznačuje se křehkostí a jeho nevýhoda je afinita k železným kovům a slitinám niklu. Lze s ním obrábět do teplot blízkých 700°C. Používá pro obrábění neželezných kovů a nekovových materiálů. [14]



Obrázek 7: Fréza a) keramická b) s KNB c) s polykrystalickým diamantem [15, 16, 17]

Slinuté karbidy se dle normy ISO 513 rozdělují do šesti skupin podle obráběného materiálu. Každá skupina představuje množinu materiálů, které při obrábění vyvolávají stejný druh zatížení břitu a způsobují podobný typ opotřebení. Každá ze šesti skupin má své označení písmenem a barvou. Viz Tabulka 1: Rozdělení slinutých karbidů dle ISO 513. [14]

Výrobci nástrojových materiálů mají ve firmách velmi často ještě vlastní označení. Zároveň ale své výrobky označují podle příslušné normy. [14]

Tabulka 1: Rozdělení slinutých karbidů dle ISO 513

Obráběný materiál	Označení
Ocel a ocelolitina	<b>P</b>
Korozivzdorná ocel	<b>M</b>
Litina	<b>K</b>
Neželezný kov	<b>N</b>
Žáruvzdorný a žárupevný materiál	<b>S</b>
Kalený a zušlechtěný materiál	<b>H</b>

## 1.5 Řezné podmínky pro frézování

Podle obráběného materiálu, vybraného frézovacího nástroje a požadované jakosti obrobených ploch se volí určité řezné podmínky. Řeznými podmínkami se rozumí řezná rychlost  $v_c$  [m/min], posuv na zub  $f_z$  [mm] a často se udává i posuvová rychlost  $v_f$  [mm/min]. Například při hrubování se snažíme volit co největší posuv s ohledem na hloubku odebírané vrstvy, materiálu obrobku, vybraného nástroje a výkonu na vřetenu frézky. Tabulka 2 uvádí pro představu běžně používané řezné podmínky pro určité typy materiálů obrobků a tři typy nástrojů z rychlořezné oceli a ze slinutých karbidů. [1]

Další důležitým parametrem při frézování je řezné prostředí. Má velký vliv na kvalitativní i kvantitativní parametry řezného procesu. Řezné prostředí může být vytvořeno médii ve formě: pasty, kapaliny, plynu, nebo mlhou. [18]

Základním účinkem média je chlazení, díky kterému můžeme zvýšit trvanlivost nástroje. Mazací účinek umožňuje redukci tření mezi nástrojem a obrobkem. To má za následek snížení řezných sil, snížení spotřeby energie a lepší jakost obrobeného povrchu. Čistící schopnost řezného média umožňuje odstranění třísek z místa řezu. Důležitým faktorem je zdravotní nezávadnost média a následně i náklady na ekologickou likvidaci. [14, 18]

Často voleným médiem je kapalina. Jedná se o minerální oleje, rostlinné oleje, olejové emulze, vodní roztoky chemických látek, syntetické a polysyntetické kapaliny. Výběr vhodné řezné kapaliny záleží na konkrétních přísadách dané tekutiny a řezných podmínkách, které jsou pro nastavenou situaci předem známy. [14, 18]



Tabulka 2: Informativní řezné podmínky pro frézování [1]

Materiál obrobku $R_m$ , HB	Mat. ná- stroje	Frézovací hlavy		Kotoučové a válčové frézy			Čelní válčové stopkové frézy	
		$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	$f_z$ [mm.z <sup>-1</sup> ]	hrubo- vání [m.min <sup>-1</sup> ]	$v_c$ na čisto [m.min <sup>-1</sup> ]	$f_z$ [mm.z <sup>-1</sup> ]	$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	$f_z$ [mm.z <sup>-1</sup> ]
Ocel $R_m$ 500 až 800 MPa	RO	45	0,1÷0,2	27	35	0,1÷0,3	30	0,1÷0,2
Ocel $R_m$ 800 až 1000 MPa	RO	30	0,1÷0,15	20	25	0,1÷0,2	25	0,1÷0,2
Ocel $R_m$ 500 až 800 MPa	SK (P25)	100	0,1÷0,2	175	195	0,15÷0,25	135	0,1÷0,25
Ocel $R_m$ 800 až 1000 MPa	SK (P25)	80	0,1÷0,15	145	160	0,15÷0,25	100	0,1÷0,15
Šedá litina HB 160	RO	35	0,1÷0,3	25	30	0,1÷0,2	35	0,1÷0,2
Šedá litina HB 200	RO	25	0,1÷0,3				25	0,1÷0,15
Šedá litina HB 160	SK (K10)	60	0,1÷0,35	75	100	0,1÷0,3	70	0,1÷0,3
Šedá litina HB 200	SK (K10)	50	0,1÷0,25				55	0,1÷0,2
Hliník střední	RO	250	0,1÷0,3	280	390	0,1÷0,2	110	0,1÷0,2
Hliník střední	SK (K10)	700	0,1÷0,25	550	650	0,1÷0,2	650	0,1÷0,2
Hliník tvrdý	SK (K10)	250	0,1÷0,25				250	0,1÷0,2

Kde  $R_m$  je mez pevnosti udávaná v [MPa] a HB je tvrdost podle pana Brinella.

## 2 Možnosti programování CNC strojů (frézek)

Číslicově řízené obráběcí stroje (Computer Numerical Control = CNC) jsou důležitým elementem při automatizaci výroby. Urychlují a zlepšují zhotovení obrobků, ať už se jedná o jakékoli vyráběné množství. [1]

Číslicově řízené výrobní stroje jsou ovládány řídicím systémem stroje prostřednictvím vytvořeného programu. Velkou výhodou je opakovatelnost již jednou udělaného programu. Program tvoří alfanumerické znaky, jejichž pomocí jsou zapsány požadované činnosti. Samotný program je rozdělený na sebe navazující skupiny znaků, které nazýváme bloky nebo věty. Při opakované výrobě je velmi jednoduché použít již vyzkoušený řídicí program. Samotný pohyb nástroje při řezném procesu je analogický jako na konvenčním obráběcím stroji. [1, 19, 20]

Údaje, které jsou uvedeny v programu, můžeme rozdělit na tři druhy:

**Geometrické údaje** – určují dráhy nástroje, podle požadovaných rozměrů konečné obrobene součásti a zvolené metody obrábění. Patří sem i příjezd a odjezd nástroje k součásti a od ní. Dráhy jsou popsány v kartézských souřadnicích. Konkrétně pro frézky obvykle v osách X, Y a Z. Pokud se jedná o vícesá obráběcí centra počet popsanych os se zvyšuje. [19]

**Technologické údaje** – určují postup obrábění, typ nástroje, řezná rychlost (otáčky), posuv, případně hloubka třísky. [19]

**Pomocné údaje** – určují specifické rozkazy pro obráběcí stroj. Může se jednat například o zapnutí čerpadla řezné kapaliny, výměna nástroje a podobně. [19]

Programování CNC strojů (frézek) lze rozdělit na tři základní skupiny:

**Ruční programování**

**Dílenské programování**

**Strojní programování**

Jednotlivé druhy jsou popsány podrobněji v následujících třech podkapitolách.

## 2.1 Ruční programování

Ruční programování se hlavně využívá pro výrobu jednoduchých součástí. Pro ruční programování je nutné znát základní funkce využívané v CNC programu a to, co znamenají a také pravidla struktury programu. NC program je buď psán v řídicích systémech na CNC strojích, nebo na počítači a do stroje se přenáší pomocí DNC sítě. Tento typ programování v mnoha firmách provádí přímo obsluha stroje.[19]

Kódy G a M jsou specifikované v normách ISO ČSN 6983-1 (184315) Číslicové řízení strojů. Formát programu a definice adres v ISO (DIN 66025) NC programování. Některé z kódů G této normy nejsou ustálené. Každý výrobce řídicího systému si volné kódy volí, nebo upravuje podle konkrétního stroje. Každý dodavatel řídicího systému stroje má manuál, ve kterých tyto specifické funkce lze najít. [19]

Tabulka 3: Složení programu (v bloku) [19]

Příklad				Název	Doporučené pořadí adres jednotlivých slov ve větě je: N G (M) X Y Z F S T D
N 40 G 00 X 100 Z-50				Blok (věta)	
N 40	G 00	X 100	Z-50	Příkaz (slovo)	
N	G	X	Z	Adresa	
40		0		Významová část	
100		-50		Rozměrová část	

Tabulka 4: Seznam přípravných funkcí – frézka Mikronex [22] uvádí G kódy jako příklad, co se objevuje v manuálech řídicích systémů. Tabulka 5: Seznam pomocných funkcí a význam adres – frézka Mikronex [22] pro představu uvádím i M kódy a významy adres, které Mikronex publikuje ve svém manuálu pro frézku.

Tabulka 4: Seznam přípravných funkcí – frézka Mikronex [22]

OZNAČENÍ	NÁZEV	MOŽNÉ ADRESY
G0	Rychlé polohování	X Y Z A
G1	Lineární interpolace	X Y Z A F
G2	Kruhová interpolace ve směru hodinových ručiček	X Y Z R I J K F
G3	Kruhová interpolace proti směru hodinových ručiček	X Y Z R I J K F
G4	Prodleva	E
G17	Volba roviny XY	
G18	Volba roviny XZ	
G19	Volba roviny YZ	
G23	Podmíněný skok	L O
G26	Skok do podprogramu	L H
G27	Programový skok	L
G28	Skok do jiného programu	L @
G29	Volání podprogramu s oscilací	X Y Z A L H F
G31	Najetí na sondu	X Y Z A
G36	Středění na válec	D W
G37	Středění na drážku	U V W
G38	Vyhledání vnějšího rohu	U V W
G39	Vyhledání vnitřního rohu	U V W
G40	Zrušení korekce	
G41	Korekce zprava	
G42	Korekce zleva	
G50	Zrušení lokálního souřadného systému	
G51	Nastavení lokálního souř. systému	
G71	Cyklus pro síťové obrábění	X Y U V L
G73	Cyklus pro obdélníkové vybrání	X Y Z W F
G74	Cyklus pro frézování drážky	X Y Z W F
G75	Cyklus pro kruhové vybrání	D Z W F
G76	Cyklus pro obrábění na kružnici	D H L B
G81	Vrtací cyklus	Z F
G83	Vrtací cyklus s výplachem	Z W F
G85	Vystružovací cyklus	Z F
G90	Absolutní rozměry	
G91	Rozměry v přírůstcích	
G92	Stanovení polohy	X Y Z A
G98	Najetí do referenčního bodu	

Tabulka 5: Seznam pomocných funkcí a význam adres – frézka Mikronex [22]

OZNAČENÍ	NÁZEV	MOŽNÉ ADRESY
M0	Programový stop	
M1	Podmíněný stop	O
M3	Start včetně doprava	S
M4	Start včetně doleva	S
M5	Zastavení včetně	
M6	Výměna nástroje	T
M8	Spuštění chlazení	
M9	Vypnutí chlazení	
M17	Konec podprogramu nebo cyklu	
M20	Výstupní signál	Q
M21	Konec výstupního signálu	Q
M25	Výstup souřadnic polohy	e
M26	Výstup parametru P90	e
M27	Načtení parametru P90	e
M29	Výstup textu	e
M30	Konec informace	
M40	Zapnutí kontinuálního navazování bloků	
M41	Vypnutí kontinuálního navazování bloků	
M99	Konec informace a návrat	

Význam adres a jejich přípustný rozsah		
Adresa	Význam	Rozsah
A	Pootočení rotační osy	± 360
D	Průměr díry, čepu, kružnice	0.01 - 320 *
E	Čas	0 - 30
F	Rychlost posuvu	0.1 - 3000 *
G	Přípravná funkce	viz tab.
H	Počet opakování, počet děr, pomocný par.	1 - 1000 INT
I	Interpolační parametr v ose X	± 600 *
J	Interpolační parametr v ose Y	± 320 *
K	Interpolační parametr v ose Z	± 400 *
L	Adresa bloku podprogramu	0 - 32000 INT
M	Pomocná funkce	viz tab.
N	Číslo bloku	0 - 32000 INT
O	Číslo podmínky	1 - 18 INT
P	Číslo parametru	0 - 99 INT
Q	Číslo výstupní linky	1 - 8 INT
R	Poloměr kruhového oblouku	0.01 - 320 *
S	Otáčky včetně	100 - 3000 *
T	Číslo nástroje	1 - 60 INT
U	Pomocný rozměr ve směru X	± 600 *
V	Pomocný rozměr ve směru Y	± 320 *
W	Pomocný rozměr ve směru Z	± 400 *
X	Délka přestavení v ose X	± 600 *
Y	Délka přestavení v ose Y	± 320 *
Z	Délka přestavení v ose Z	± 400 *

## 2.2 Dílenské programování

Dílenské programování spočívá v psaní NC programu přímo na CNC stroji pomocí přednastavených funkcí stroje a kódů ISO. Jedná se o tzv. dialogové programování. Programuje se interaktivně. Využívá se grafické podpory. Ve stroji jsou vytvořené pracovní činnosti jako například kapsa, nebo zarovnání čela. Programátor jen zadává konkrétní rozměry pro danou součást. U strojů sloužících k sériové výrobě složitějších součástí s opakujícími se elementy, jejichž rozměry se mění, jsou často v řídicích systémech předpřipraveny tyto pracovní činnosti již od dodavatele. [1, 19]

Lze zde vytvořit složitější součást než u ručního programování, ale nejedná se o vhodnou metodu pro součásti velmi složité. Nevýhodou je ovšem skutečnost, že během dílenského programování stroj často nepracuje. Pokud obsluha stroje je dostatečně kvalifikovaná, může během pasivního dozoru připravovat program pro další výrobu. Příkladem takového řídicího systému je FANUC Series 30i, viz *Obrázek 8*. [1, 19]

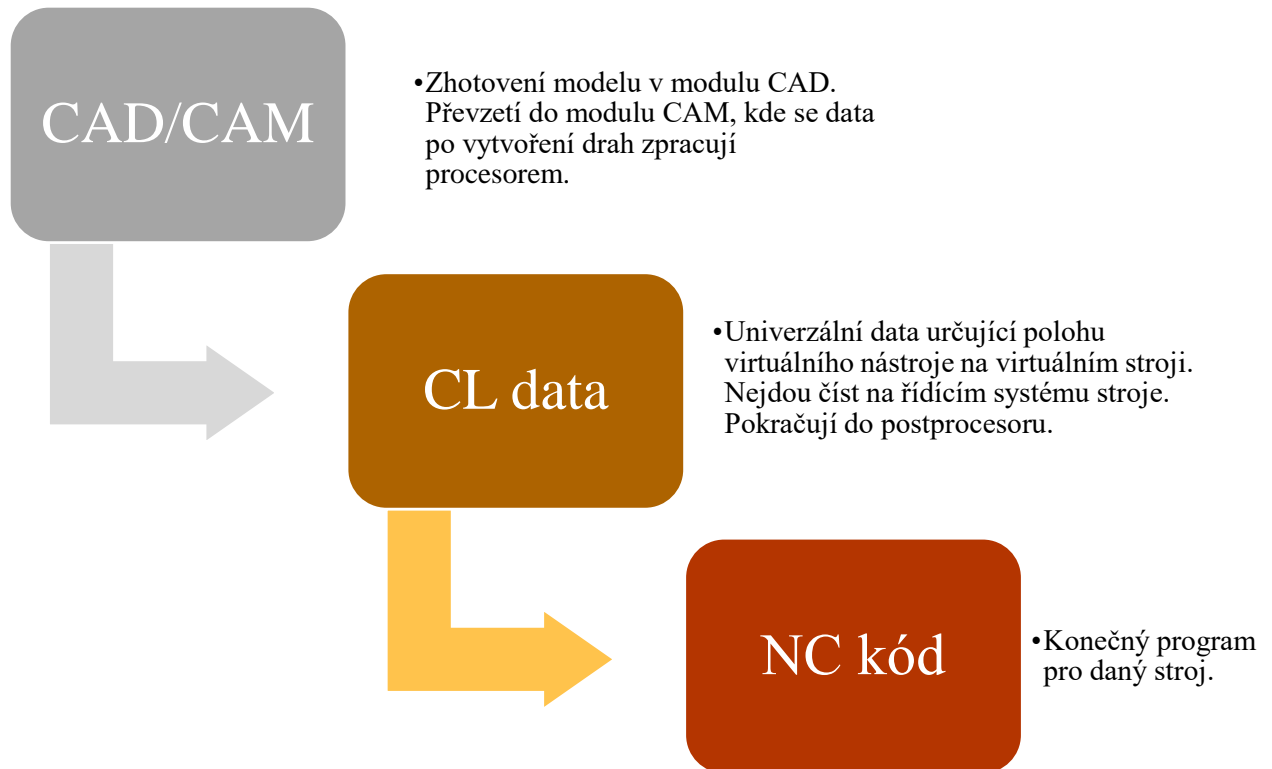


Obrázek 8: Příklad dílenského programování [23]

## 2.3 Strojní programování

Strojní programování se dnes v praxi uplatňuje stále více, hlavně kvůli rychlosti a možnosti vytvořit program i pro složité součástky. Programování v CAD/CAM (computer aided design/computer aided manufacturing) ale vyžaduje znalost softwaru a zkušenosti programátora. Výhoda je, že programátor připravuje kód mimo stroj a ten může mezitím obrábět. [19, 20]

Obrázek 9 znázorňuje proces přípravy řídicího programu. Postprocesor má každá technologie a každý řídicí systém stroje jiný. Proto se z CAM softwaru negeneruje rovnou NC kód, ale musí se jít přes univerzální mezičlánek CL dat. Může se tak stát, že pro stejné frézky ale s jinými řídicími systémy bude potřeba několik jiných postprocesorů. [19, 21]



Obrázek 9: Digram toku dat

Při vytváření programů se vždy kontroluje obráběcí proces v simulátoru, kde jeden z hlavních parametrů je čas výroby. Jedná se o důležitou složku výroby, od které se také odvíjí kalkulace výrobku a následně jeho konečná cena. Při zvolení správných rezných podmínek umí software určit na simulátoru výrobní čas, ale nejsou zde zahrnuty časy upnutí/odepnutí součásti, výměny nástroje a podobně. Tato zpoždění se kompenzují v praxi příslušnými koeficienty, které mají firmy odzkoušené pro daný typ technologie. [19]

Práce se softwarem CAM je hlavně o tom správně zvolit postup výroby, pořadí operačních úseků souvisejících s nástrojem a způsob obrábění konkrétního tvaru nástrojem. V simulátoru se hlavně zkontroluje dráha nástrojů a konečná geometrie obrobku. Málo kdy se vše povede na poprvé. Veškeré navrhování se musí podřizovat tomu, co má firma k dispozici ve výbavě. [19]

### 3 Technologické možnosti CNC frézek

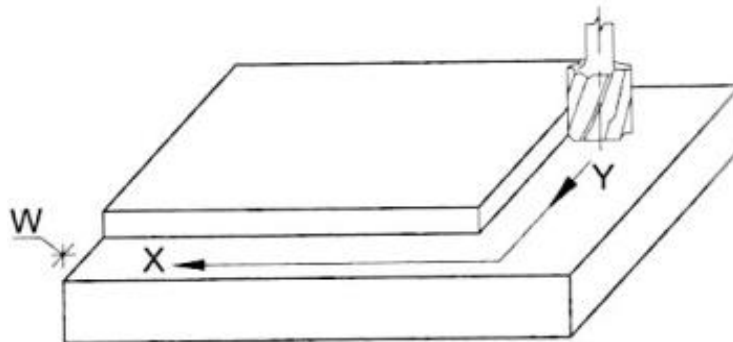
Typy obrábění můžeme rozdělit dle počtu ovládaných os například na 3D nebo 5D. Číslice s písmenem D označuje, v kolika osách se může nástroj automatizovaně pohybovat při obrábění součástky. [19]

#### 3.1 Obrábění 1D – nastavení polohy

Nastavení se provádí ve dvou osách, následně se uskutečňuje pohyb ve třetí ose. Je to nejstarší způsob řízení, který se využíval ještě před NC technikou. Tato metoda se využívala například pro souřadnicovou vrtačku zvanou „koordinka“. Zde je tento typ uveden jen pro úplnost přehledu. [19]

#### 3.2 Obrábění 2D – pravoúhlé řízení

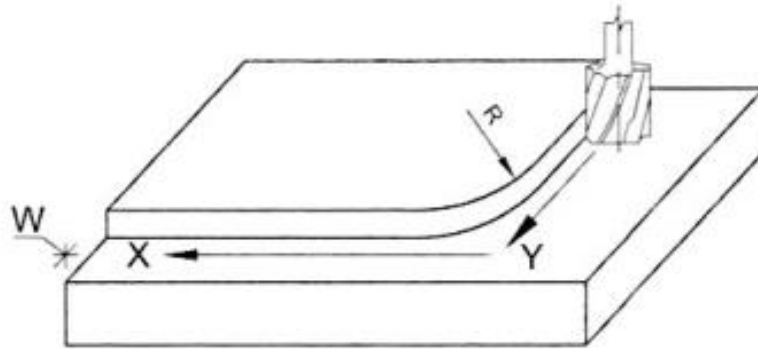
Nástroj uskutečňuje pohyb rovnoběžně se souřadnými osami podle udaných instrukcí pohybu i velikosti posuvu v jedné a následně v druhé ose, případně v obou současně, do cílového bodu. Stroj neumí interpolovat. Nájezd osy nástrojem do hloubky odebírané vrstvy není automatizovaný. Pro lepší představu je uveden příklad, viz *Obrázek 10*. [19]



Obrázek 10: Obrábění 2D - pravoúhlé řízení [19]

#### 3.3 Obrábění 2D – souvislé řízení

Obrábění je na stejném principu jako u předcházející podkapitoly, ale obráběcí stroj již zná interpolaci. Frézka dokáže interpolovat v osách X a Y. Velikosti drah si přizpůsobuje tak, aby došlo k vytvoření požadovaného tvaru. Nástroj se pohybuje ve dvou osách zároveň. Pohyb je ale realizován po jednotlivých osách v inkrementech (nejmenší možný přírůstek). Pro lepší představu je uveden příklad, viz *Obrázek 11*. [19]

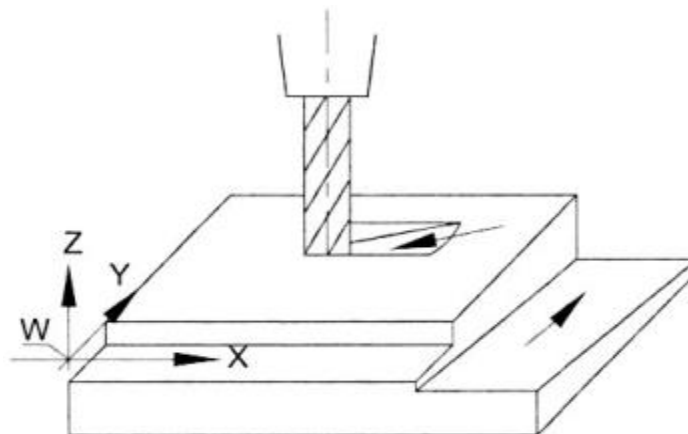


Obrázek 11: Obrábění 2D - souvislé řízení [19]

### 3.4 Obrábění 2,5D

Jedná se o řízení souvislé. Lineární interpolace se může realizovat nejenom v jedné rovině. Obráběcí stroje, které by pracovali jen v 2,5D neexistují. Jedná se o stroje, jenž zvládají pracovat i ve 3D. [19]

Obrázek 12 ukazuje pohyb stopkové frézy v rovině X, Z při zajíždění do obrobku. Dalším příkladem mohou být, když drážkovací fréza posuvem obrábí do hloubky materiálu v ose Z s následným obráběním v rovině X,Y. [19]

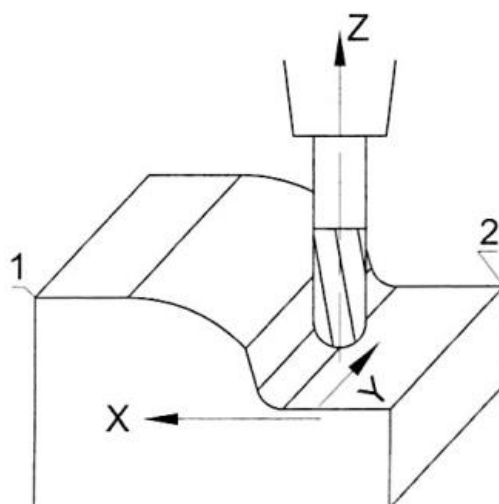


Obrázek 12: Obrábění 2,5D [19]

### 3.5 Obrábění 3D

Obrábění dokáže stroj uskutečňovat ve třech základních osách X, Y, Z současně. Lze tak vytvářet obecnou plochu, tvar, kde se mění zároveň všechny tři souřadnice. Příklad takového obrábění je například kulová fréza při dokončovací třísce, viz Obrázek 13. O 3D frézování se také bavíme při zahlubování frézy po spirále u obrábění kruhové kapsy. Zmíněné možnosti 3D obrábění umí každá dnes vyráběná frézka (mohou být výjimky u jednoúčelových strojů na zakázku). [19]

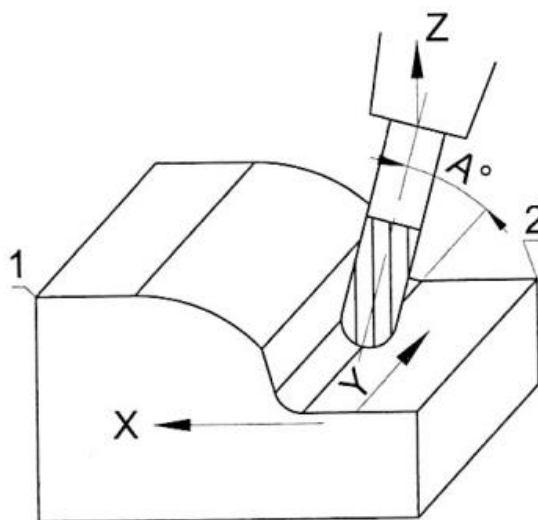




Obrázek 13: Obrábění 3D [19]

### 3.6 Obrábění 3+2D

Jedná se o typ obrábění 3D s tím rozdílem, že nástroj je oproti obrobku pevně nakloněný o žádaný úhel, který se během řezného procesu nemění. Naklonění může být v jednom nebo i ve dvou směrech. Nevýhoda této metody je vyšší riziko kolize nástroje a také nutnost měnit naklonění nástroje v průběhu obrábění, což nějakou dobu trvá. Pro lepší představu je uveden příklad, viz *Obrázek 14*. [19]



Obrázek 14: Obrábění 3+2D [19]

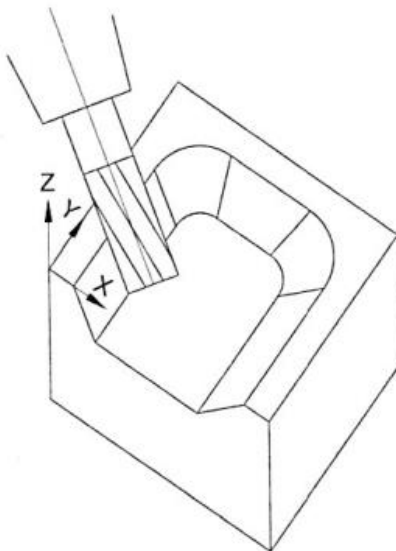
### 3.7 Obrábění 4D

Obráběcí stroje tohoto typu se vyskytují v menší míře. Jedná se o výjimky pro speciální aplikace. Často se používají frézky s 3D obráběním a tak zvaná čtvrtá osa je připevněna na stůl. Jedná se o digitální děličku. Může být připevněna třemi způsoby: ve směru osy X, pro rotační osu A, ve směru osy Y, pro rotační osu B, nebo jako otočný

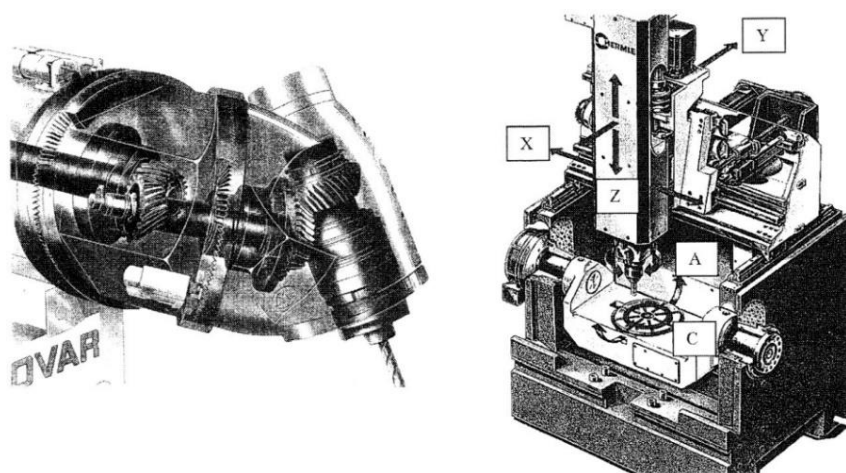
stůl ve směru osy Z, pro rotační osu C. Zajišťuje požadované otáčení o zadaný úhel. Důležité je zmínit, že se programování komplikuje. [19]

### 3.8 Obrábění 5D

O tomto typu obrábění mluvíme, když je umožněno plynulé naklápění nástroje nebo obrobku ve dvou rotačních osách. Díky tomu můžeme získat složitější výrobky. Typickou součástí z 5D obrábění jsou lopatky na kole turbíny. Díky naklápění můžeme i zefektivnit řezné podmínky. Pro lepší představu je uveden příklad, viz *Obrázek 15*, kde dokončuje fréza šikmé stěny kapsy. *Obrázek 16* ukazuje příklady realizací naklápění 5D obráběcích strojů. [19, 24]



*Obrázek 15: Obrábění 5D [19]*



*Obrázek 16: Obrázek 15: Příklady naklápění pro 5D obrábění [19]*

## **4 Tvorba CNC programu pro zvolenou součást a realizace výroby**

Zvolenou součástí jsou ručičkové hodiny vyrobené ze slitiny hliníku. Důvodem, proč jsem zvolila pro výrobu právě hodiny je, že jsou méně typickým objektem k výrobě na CNC frézce a nejsou technologicky složité na výrobu.

Na výrobu je použita hliníková slitina, konkrétně EN AW 5083 – AlMg4,5Mn. Jedná se o slitinu střední kvality. Polotovary jsou výhradně v podobě plechů a desek. [25] Slitina má pevnost v tahu kolem 270 MPa, tvrdost se pohybuje kolem 70 HB. Hliníková slitina je svařitelná, má dobrou korozní odolnost a je i dobře eloxovatelná. Vyrábí se také odřezáváním z litého ingotu. Vzniklá deska má minimální vnitřní pnutí. Tím se při obrábění snižuje riziko deformací. Desky jsou k dispozici i v o oboustranně frézovaném provedení. [25]

Pro soustružení je tato slitina poměrně nevhodná. Tříška se neochotně láme a lepí se na nástroj. Je nevhodná také z hlediska polotovarů, protože kulatiny se z toho materiálu v podstatě nevyrobí. Pro technologii frézování je naopak velmi výhodnou. Mazání se u této slitiny zpravidla volí až při větších tloušťkách odebírané vrstvy proti zalepování nástroje třískami. Získat lesklý povrch není úplně jednoduché. Důležité je používat ostré nástroje, mít tuhý stroj, zvolit vysoké otáčky, malý úběr a mazání obráběného povrchu. Vrtání slitiny probíhá také bezproblémově. Tříška poměrně dobře odchází po šroubovici z vrtáku ven. [25]

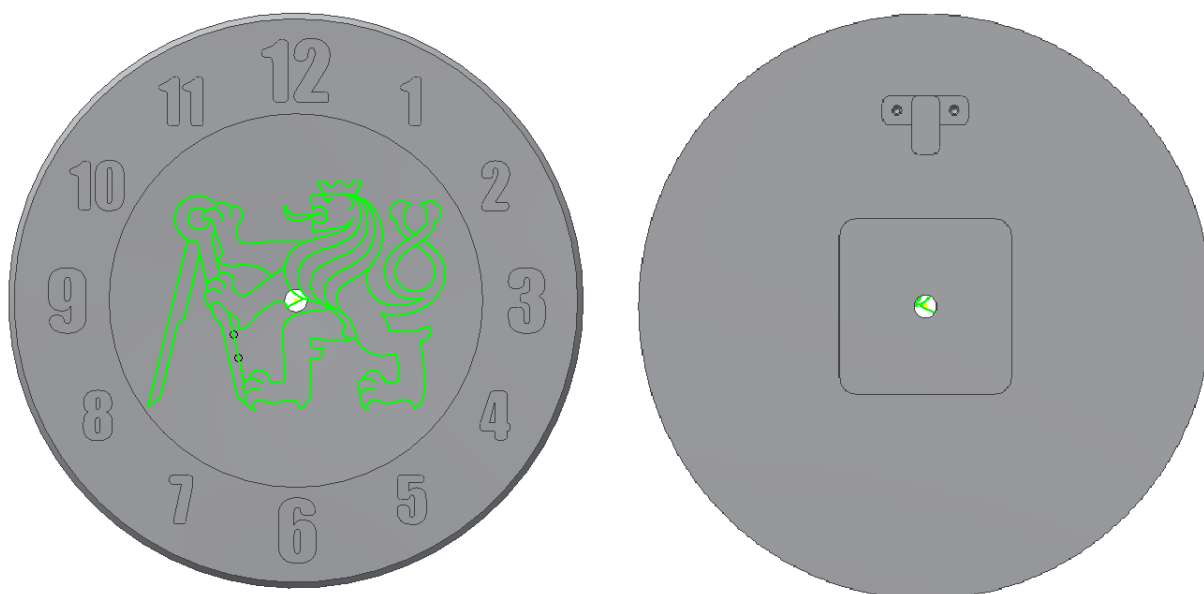
Byl vytvořen program k výrobě desky hodin. Hodinový mechanismus na baterii a samotné hodinové ručičky jsou zakoupené.

Pro vytvoření 3D modelu jsem zvolila CAD software Autodesk Inventor Professional 2016 s využitím studentské licence.

Pro vytvoření programu jsem využila CAM software Autodesk PowerMill Ultimate 2018 s licencí, kterou mi poskytl Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie.

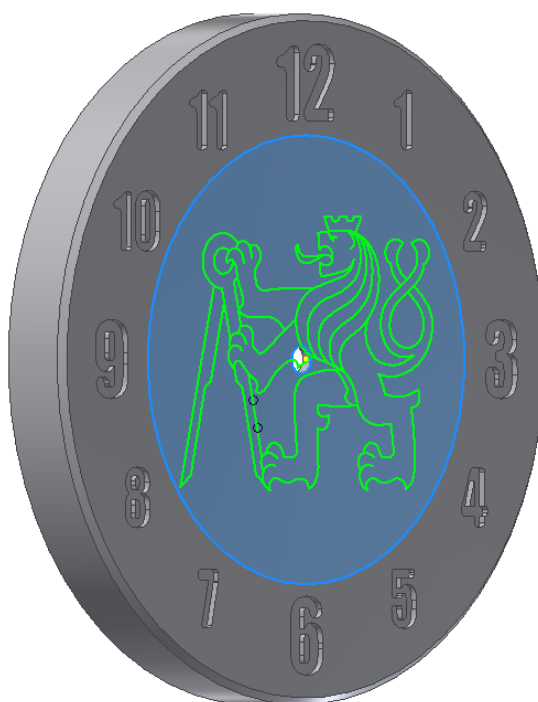
### **4.1 CAD**

Hodiny jsou myšleny jako nástěnné o průměru 200 mm a tloušťce 22 mm. Na přední straně hodin je ciferník s arabskými číslicemi. Model hodin je v Příloze 1. Výkres hodin je v Příloze 2.



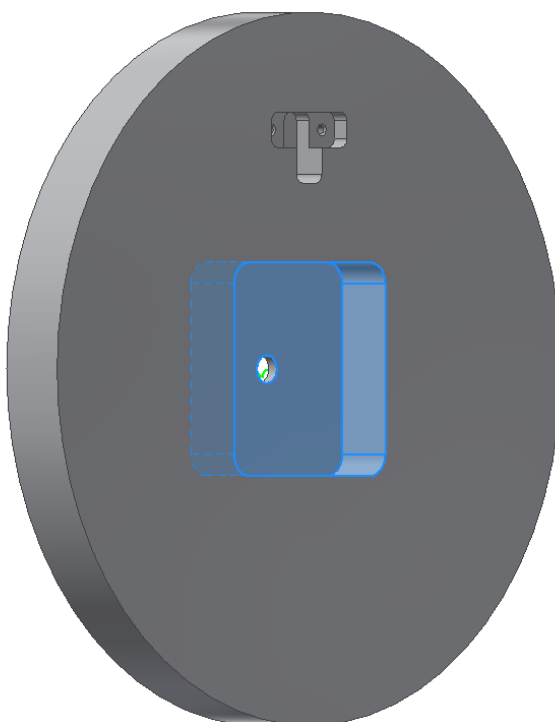
*Obrázek 17: Model hodin – přední a zadní strana*

Na přední straně hodin je vygravírované logo lva Českého vysokého učení technického v Praze (ČVUT). Tento obrazec je na kuželové ploše, která se svažuje směrem ke středu hodin, viz *Obrázek 18*. Arabské číslice na ciferníku jsou zafrézované do plochy 2 mm hluboko. Uprostřed hodin je díra o průměru 8 mm, kterou se prostrčila osa hodinového mechanismu. Na ní byla následně připevněna vteřinová, minutová a hodinová ručička.



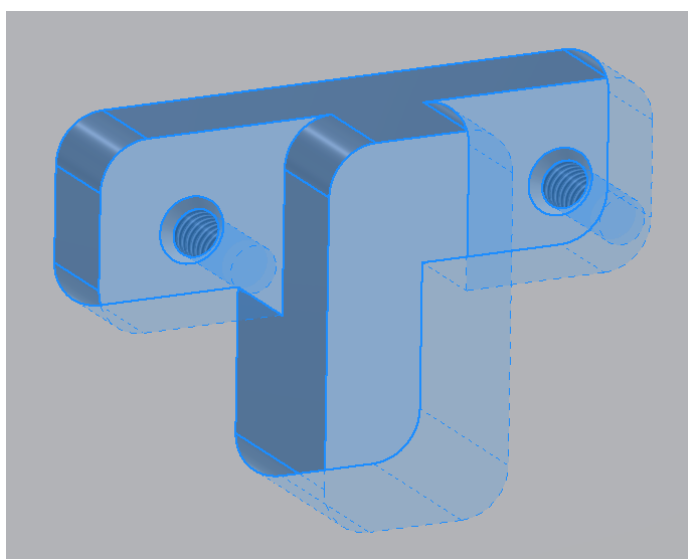
*Obrázek 18: Vyznačená kuželová plocha*

Na zadní části hodin nalezneme kapsu, kam byl umístěn hodinový mechanismus (Obrázek 19). Hodinový mechanismus má na ose závit a maticku, kterou je z druhé strany dotažen, tak aby bylo zajištěno jeho pevné uchycení.



Obrázek 19: Vyznačená kapsa pro hodinový mechanismus

Na zadní straně hodin nad výše popsanou kapsou je umístěný členitý otvor (Obrázek 20), který slouží k uchycení hodin na stěnu. Jsou zde připraveny dvě díry se závitem M3 hluboké 7 mm (samotný závit je do hloubky 6 mm). Malá destička je přišroubována a za ní se uchytí háček na stěně. Hodiny váží necelých 1,7 kg.



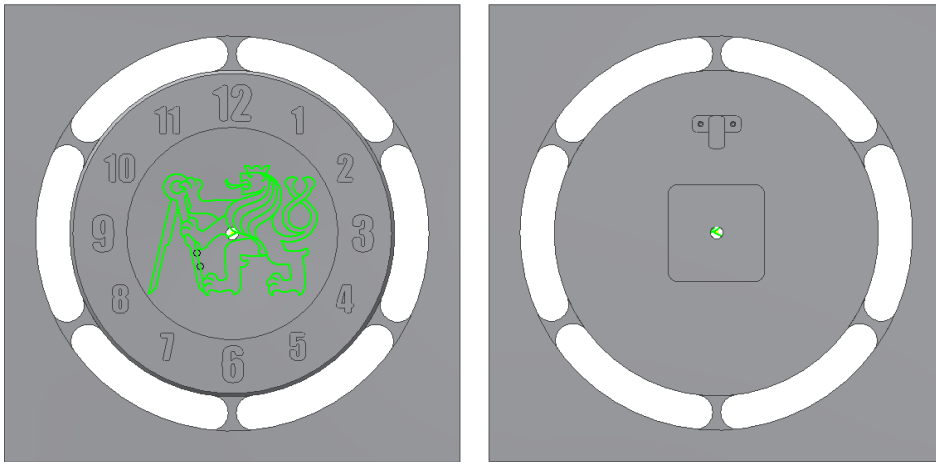
Obrázek 20: Otvor pro uchycení

V nejužším místě jsou hodiny 3 mm tlusté. Toto místo se nachází ve středu hodin mezi kapsou pro hodinový mechanismus a vrcholem kužele.

## 4.2 CAM

Výroba hodin byla rozdělena na dvě části. V první části byla obrobena zadní strana hodin a v druhé části přední strana. Jedná se tedy o dva NC programy.

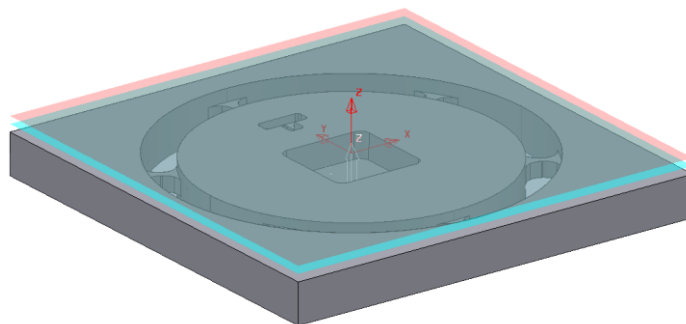
Pro vytvoření obráběcího programu jsem musela vytvořit nový model (*Obrázek 21*), který umožňuje upnutí polotovaru při obrábění. Upnutí ke stolu bylo realizováno v rozích pomocí upínek. Polotovary byly v podobě čtvercových desek o rozměrech 280x280x27 mm, které byly k dispozici. Průměr hodin by mohl být při rozměrech polotovaru větší, ale vzhledem k již pořízeným hodinovým ručičkám, byl rozměr hodin ponechán. Po obrobení do této podoby by byly uříznuty mosty na pásové pile. Poslední pozůstatky by byly odstraněny na pásové brusce.



*Obrázek 21: Model pro obrábění*

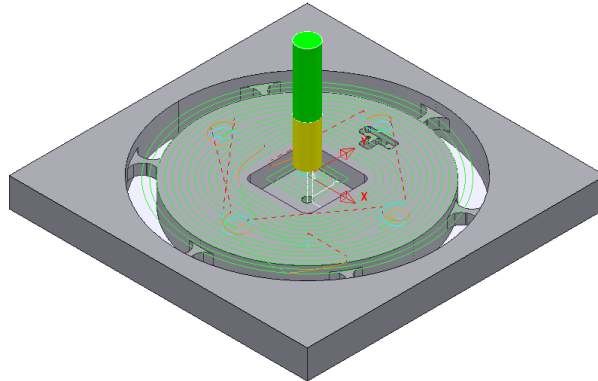
### 4.2.1 Zadní strana hodin

Program se skládá z 12 obráběcích úseků. Na začátku programu jsem vytvořila nulový bod nového souřadnicového systému (*Obrázek 22* - červeně vyznačený) v ose součástky v rovině 2,5 mm vyšší, než je rovina hodin. Tato rovina je totožná s vrchní rovinou polotovaru. Hned poté jsem určila rovinu pro rychloposuvy (červeně označena), která je 10 mm nad nulovým bodem a rovinu sjezdu (modře označena), která je 5 mm nad nulovým bodem.

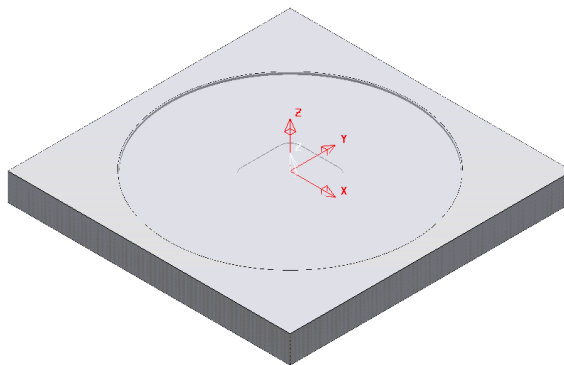


*Obrázek 22: Nový souřadnicový systém a bezpečná oblast*

Jako první úsek je hrubování plochy nad hodinami. Tento úsek je uskutečněn válcovou čelní frézou o průměru 20 mm se čtyřmi břity. Nechaný přírůstek na obrábění je 0,5 mm. Nájezd i výjezd jsou pod úhlem. *Obrázek 23* ukazuje spočtenou dráhu pro tento úsek. Zelené křivky jsou obráběcí dráhy, modré křivky jsou nájezdy/výjezdy a červené přerušované křivky jsou rychloposuvy. *Obrázek 24* znázorňuje stav po ukončení 1. úseku.

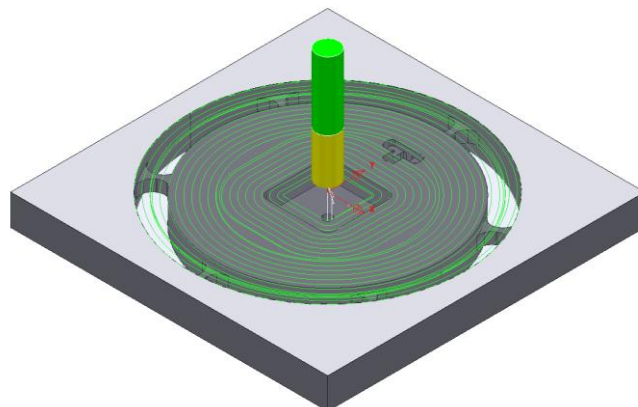


*Obrázek 23: Dráha 1. úseku*

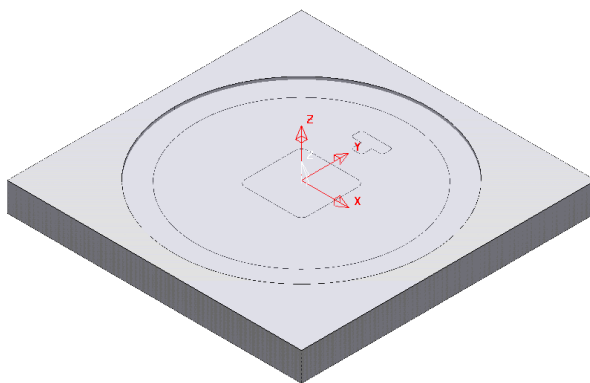


*Obrázek 24: Stav po 1. úseku*

Druhý úsek je dokončení plochy nad hodinami. Tento úsek má stejný nástroj jako úsek první. Nájezd i výjezd jsou také pod úhlem. *Obrázek 25* ukazuje spočtenou dráhu pro tento úsek. *Obrázek 26* znázorňuje stav po ukončení 2. úseku. Po tomto úseku jsou již vidět vrchní křivky konečného modelu.

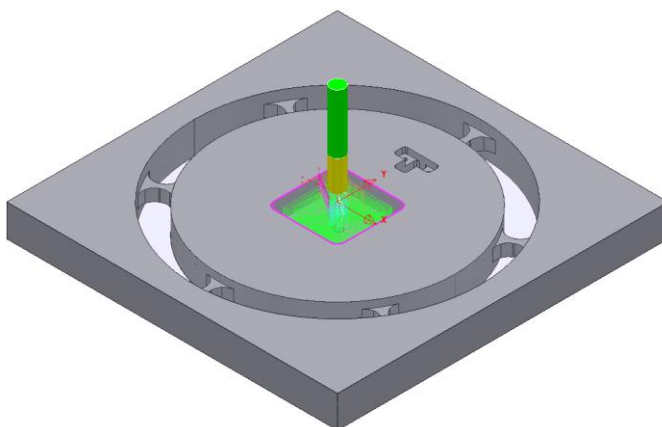


*Obrázek 25: Dráha 2. úseku*

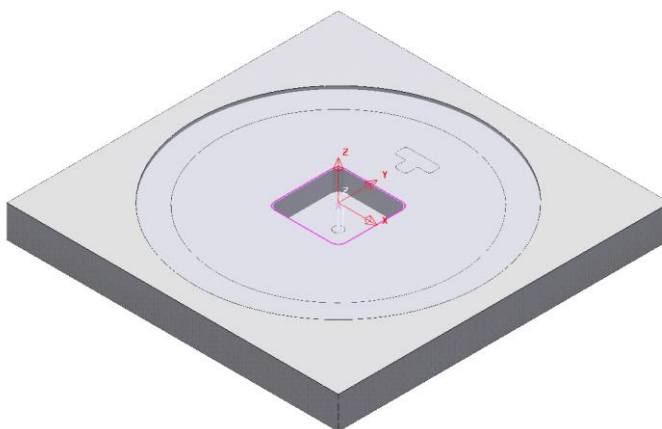


*Obrázek 26: Stav po 2. úseku*

Třetí úsek je hrubování kapsy pro hodinový mechanismus. Zvoleným nástrojem je válcová čelní fréza o průměru 12 mm se čtyřmi břity. Nechaný přírůstek na obrábění je 0,5 mm na stěnách kapsy. Nájezd i výjezd jsou pod úhlem. *Obrázek 27* ukazuje spočtenou dráhu pro tento úsek. Před vytvořením dráhy bylo třeba vybrat kapsu jako 2D prvek. *Obrázek 28* znázorňuje stav po ukončení 3. úseku.



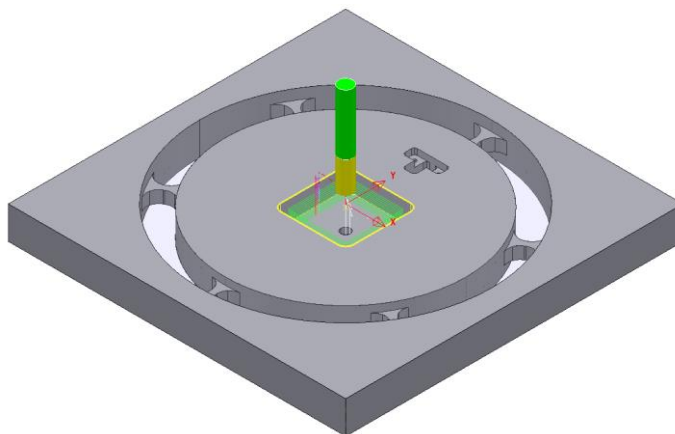
*Obrázek 27: Dráha 3. úseku*



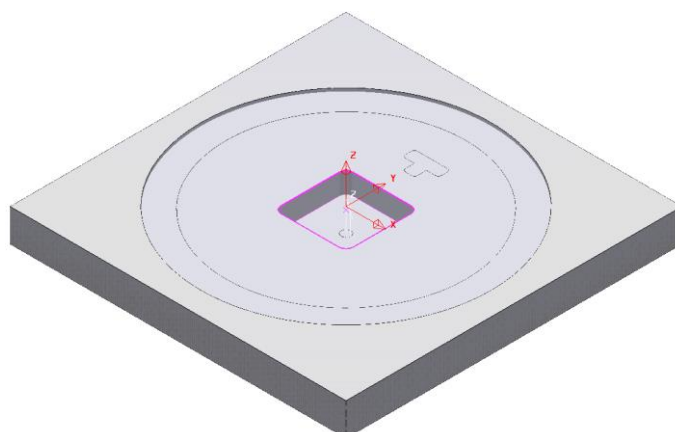
*Obrázek 28: Stav po 3. úseku*



Čtvrtý úsek je dokončení profilu kapsy. Tento úsek má stejný nástroj jako úsek třetí. Nájezd i výjezd jsou specifikovány jako horizontální oblouk pod úhlem  $10^\circ$  s rádiusem 6. Bylo zde nutné využít kompenzaci nástroje – CNC korekce plný rádius. *Obrázek 29* ukazuje spočtenou dráhu pro tento úsek. *Obrázek 30* znázorňuje stav po ukončení 4. úseku.

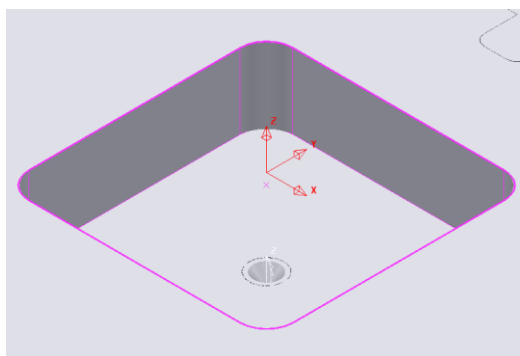


*Obrázek 29: Dráha 4. úseku*



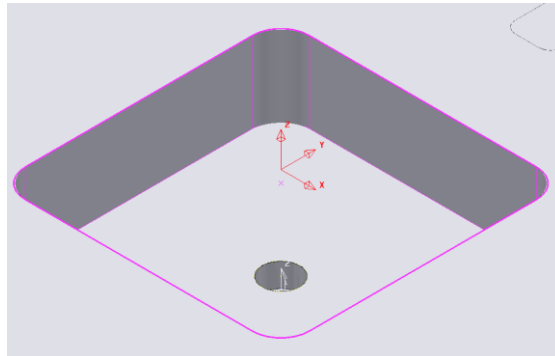
*Obrázek 30: Stav po 4. úseku*

Pátým úsekem je předvrtání osové díry v kapsě. Tento úsek je uskutečněn vrtákem o průměru 9 mm s vrcholovým úhlem  $90^\circ$ . *Obrázek 31* znázorňuje stav po ukončení 5. úseku.



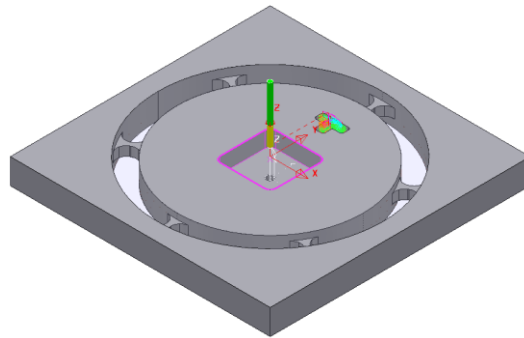
*Obrázek 31: Stav po 5. úseku*

Šestým úsekem je vrtání osové díry v kapse. Vybraným nástrojem je vrták o průměru 8 mm s vrcholovým úhlem  $120^\circ$ . *Obrázek 32* znázorňuje stav po ukončení 6. úseku. Tímto je oblast kapsy hotová.

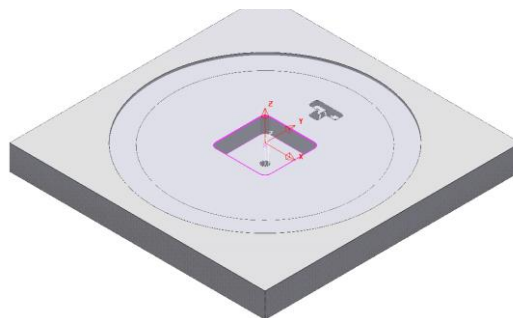


*Obrázek 32: Stav po 6. úseku*

Sedmým úsekem je vytvoření kapsy pro zavěšení. Vytvoření kapsy je v jednom úseku z důvodu, že zde nejsou funkční plochy. Jedná se o oblast, která nebude vidět, a proto zde kvalitní povrch není vyžadován. Zvolený nástroj je válcová čelní fréza o průměru 5 mm se čtyřmi břity. Nájezd i výjezd jsou pod úhlem. *Obrázek 33* ukazuje spočtenou dráhu pro tento úsek. Před vytvořením dráhy bylo třeba vytvořit hranici tak, aby se obrábění provádělo jen v zavěšení, protože program tuto složitější kapsu nebral jako 2D prvek. *Obrázek 34* znázorňuje stav po ukončení 7. úseku.



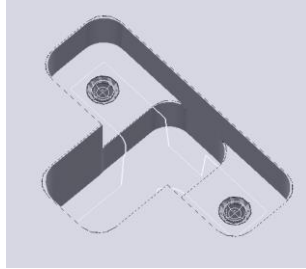
*Obrázek 33: Stav po 7. úseku*



*Obrázek 34: Stav po 7. úseku*

Osmým úsekem je předvrtání děr v zavěšení. Tento úsek je uskutečněna vrtákem o průměru 9 mm s vrcholovým úhlem  $90^\circ$ , stejným jako v pátém úseku.

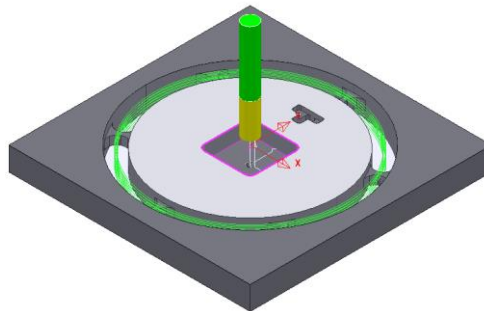
Devátým úsekem je vrtání děr v zavěšení. Vybraným nástrojem je vrták o průměru 2,5 mm s vrcholovým úhlem  $120^\circ$ . *Obrázek 35* znázorňuje stav po ukončení 9. úseku. Zde je i vidět hranice (bílá čára), o které jsem mluvila v sedmém úseku.



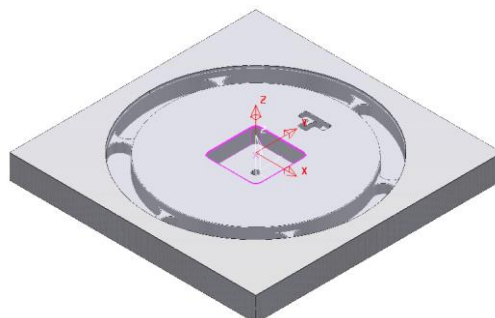
*Obrázek 35: Stav po 9. úseku*

Desátým úsekem je vytvoření závitu M3 se stoupáním 0,5 mm v dírách zmíněných v operacích 8 a 9. Zvoleným nástrojem je závitník o příslušných parametrech potřebných pro výše zmíněný závit.

Jedenáctým úsekem je hrubování obvodu hodin. Tento úsek je uskutečněn válcovou čelní frézou o průměru 18 mm se čtyřmi břity. Nechaný přírůstek na obrábění je 0,5 mm na stěnách. Frézujeme do hloubky 1 mm pod mosty (-18,6 mm dle souřadnicového systému). Nájezd i výjezd jsou pod úhlem. *Obrázek 36* ukazuje spočtenou dráhu. *Obrázek 37* znázorňuje stav po ukončení 11. úseku.

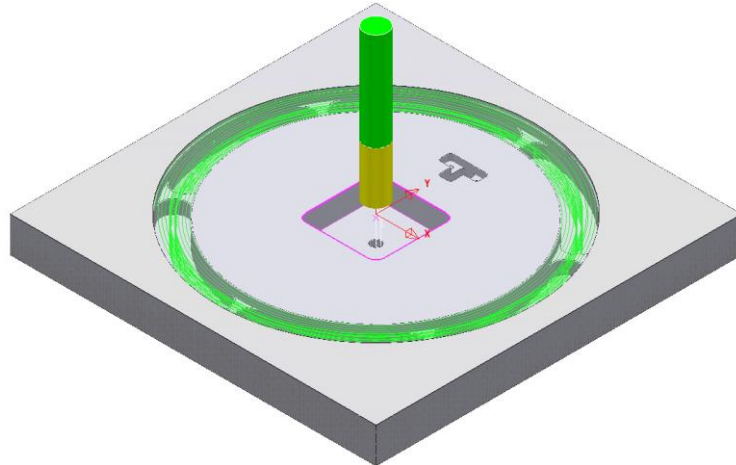


*Obrázek 36: Dráha 11. úseku*

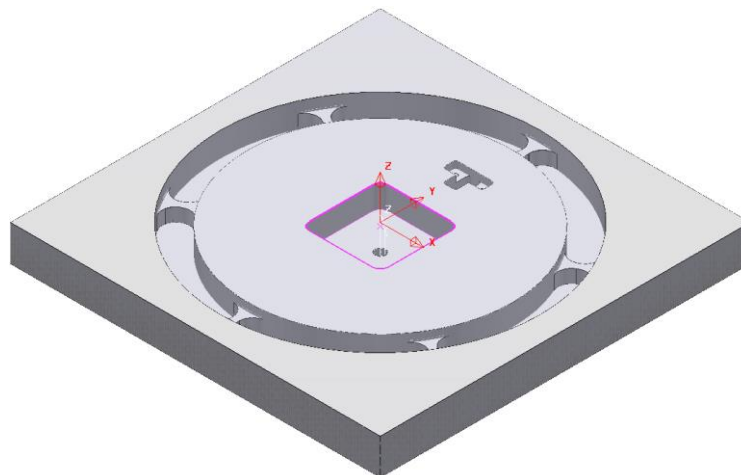


*Obrázek 37: Stav po 11. úseku*

Dvanáctým úsekem je dokončení obvodu hodin. Tento úsek má stejný nástroj jako úsek jedenáctý. Nájezd i výjezd jsou specifikovány jako horizontální oblouk pod úhlem  $10^\circ$  s rádiusem 6. *Obrázek 38* ukazuje spočtenou dráhu pro tento úsek. *Obrázek 39* znázorňuje stav po ukončení 12. úseku. Toto je konečný stav hodin po prvním NC programu.



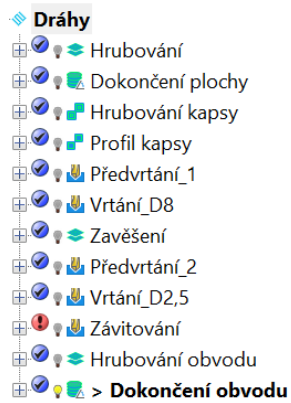
*Obrázek 38: Dráha 12. úseku*



*Obrázek 39: Stav po 12. úseku*

*Obrázek 40* ukazuje jednotlivé dráhy. Jedná se o část z Průzkumníku. Modré značky před jednotlivými dráhami znamenají, že byla provedena kontrola NC dráhy a nebyla v ní nalezena jakákoli kolize. U dráhy pro závitování je červená značka kvůli kolizi nástroje s modelem.

Tato kolize je způsobena tím, že Autodesk Inventor závit sice znázorní, ale v modelu ho reálně nevytvoří. Proto zde, když se závity reálně zhotovily, došlo ke kolizi. Nejedná se tudíž o chybu.

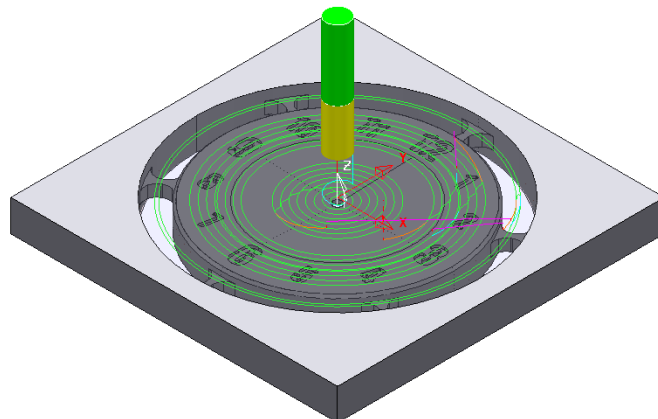


Obrázek 40: Dráhy

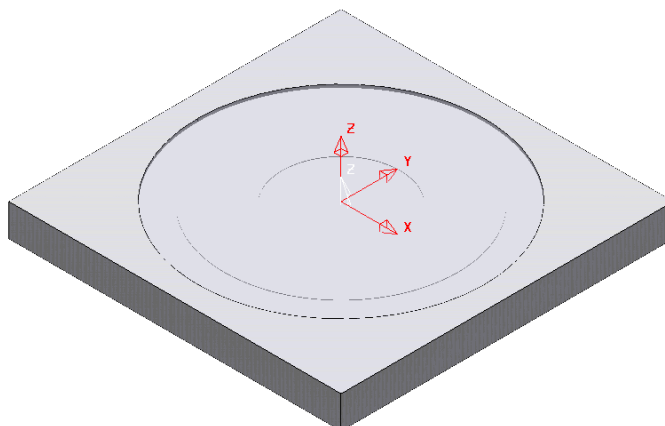
#### 4.2.2 Přední strana hodin

Program se skládá z 12 obráběcích úseků. První dva kroky byly totožné jako na začátku tvorby programu pro zadní stranu hodin.

První úsek je hrubování plochy nad hodinami. Úsek se v podstatě shoduje s prvním úsekem prvního programu. Tento úsek je uskutečněn válcovou čelní frézou o průměru 20 mm se čtyřmi břity. Nechaný přídavek na obrábění je 0,5 mm. Nájezd i výjezd jsou pod úhlem. *Obrázek 41* ukazuje spočtenou dráhu pro tento úsek. *Obrázek 42* znázorňuje stav po ukončení 1. úseku.

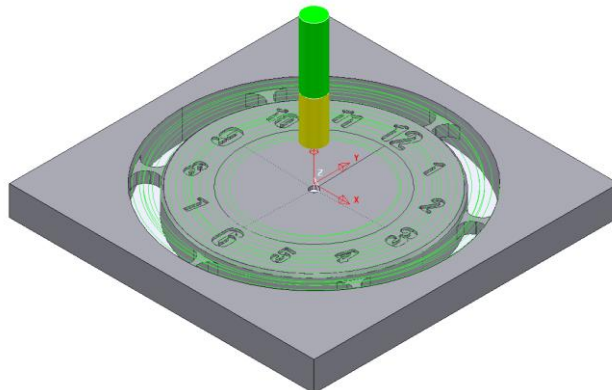


Obrázek 41: Dráha 1. úseku

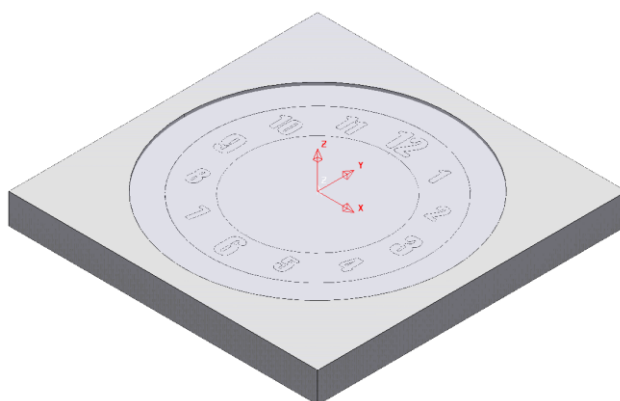


Obrázek 42: Stav po 1. úseku

Druhý úsek je dokončení plochy nad hodinami. Úsek se v podstatě shoduje s druhým úsekem prvního programu. Tento úsek má stejný nástroj jako úsek první. Nájezd i výjezd jsou také pod úhlem. *Obrázek 43* ukazuje spočtenou dráhu pro tento úsek. *Obrázek 44* znázorňuje stav po ukončení 2. úseku.

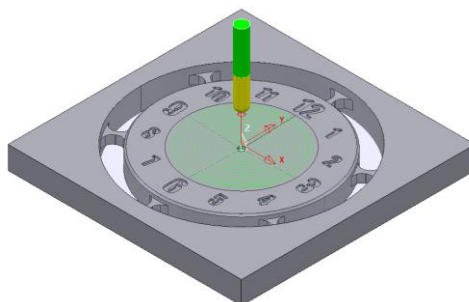


*Obrázek 43: Dráha 2. úseku*

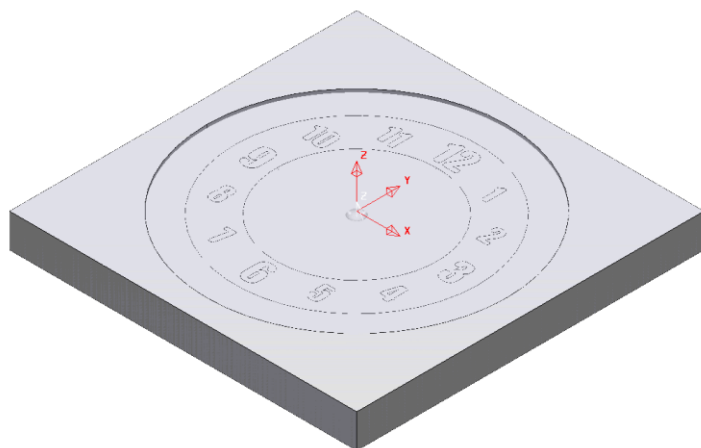


*Obrázek 44: Stav po 2. úseku*

Třetí úsek je hrubování kužele. Zvoleným nástrojem je kulová fréza o průměru 15 mm se čtyřmi břity. Nechaný přídavek na obrábění je 0,5 mm. Nájezd i výjezd jsou pod úhlem. *Obrázek 45* ukazuje spočtenou dráhu pro tuto operaci. *Obrázek 46* znázorňuje stav po ukončení 3. úseku. Zde je třeba upozornit na to, že po obrobení zadní části bude ve středu hodin již hotová díra. Konečný stav zde ukázaný nebude odpovídat realitě.

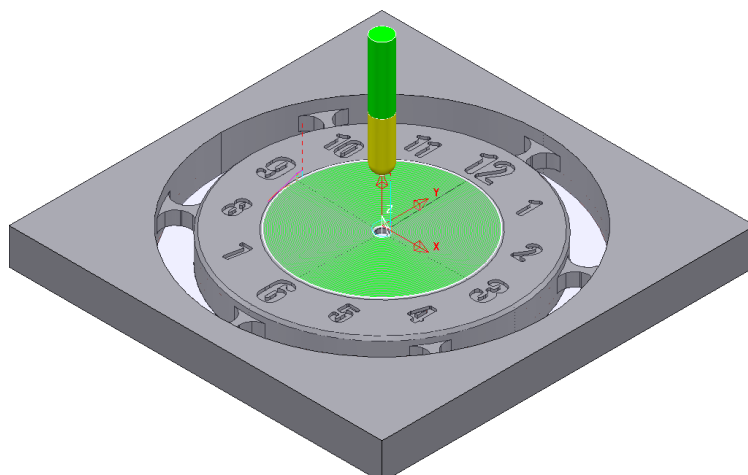


*Obrázek 45: Dráha 3. úseku*

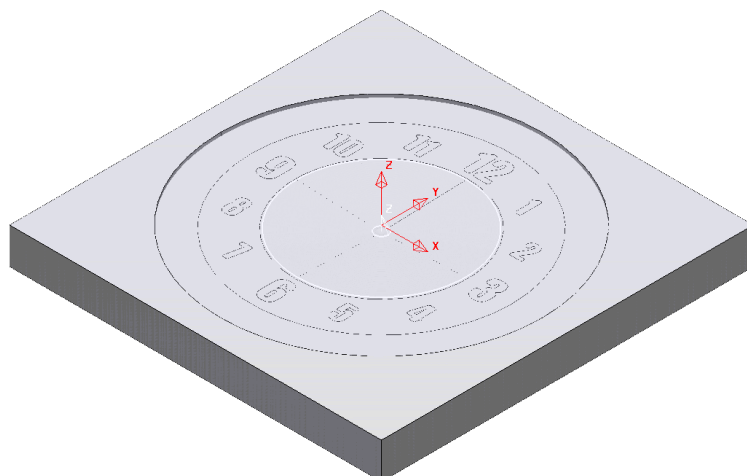


*Obrázek 46: Stav po 3. úseku*

Čtvrtý úsek je dokončení kužele. Tento úsek má stejný nástroj jako úsek třetí. Nájezd i výjezd jsou znovu pod úhlem. Úsek je časově náročnější. *Obrázek 47* ukazuje spočtenou dráhu pro tento úsek. *Obrázek 48* znázorňuje stav po ukončení 4. úseku.

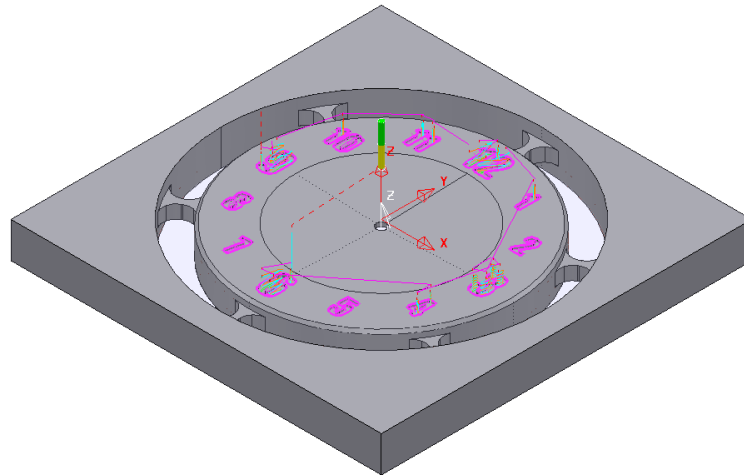


*Obrázek 47: Dráha 4. úsek*

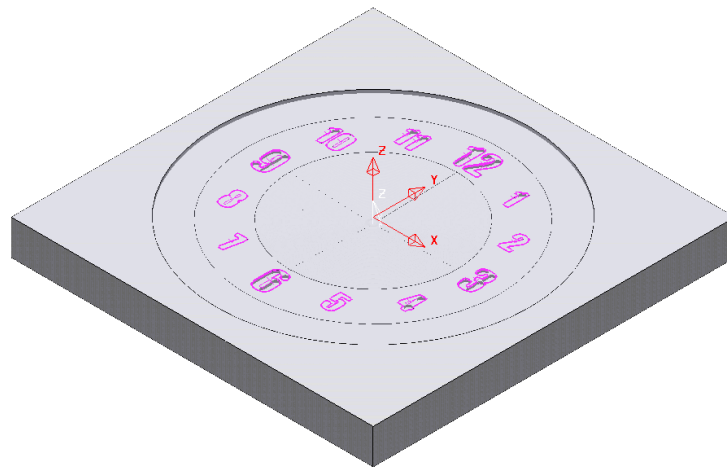


*Obrázek 48: Stav po 4. úseku*

Pátým úsekem je první hrubování číslic. Tento úsek je uskutečněn válcovou čelní frézou o průměru 4 mm se čtyřmi břity. Takto veliká fréza se nedostane do číslic 2, 5, 7 a 8. Proto následují další dvě hrubování číslic. Nechaný přídavek na obrábění je 0,2 mm. Nájezd i výjezd jsou pod úhlem. Pro tento úsek jsem číslice označila jako 2D prvky. *Obrázek 49* ukazuje spočtenou dráhu pro tento úsek. *Obrázek 50* znázorňuje stav po ukončení 5. úseku.



*Obrázek 49: Dráha 5. úseku*



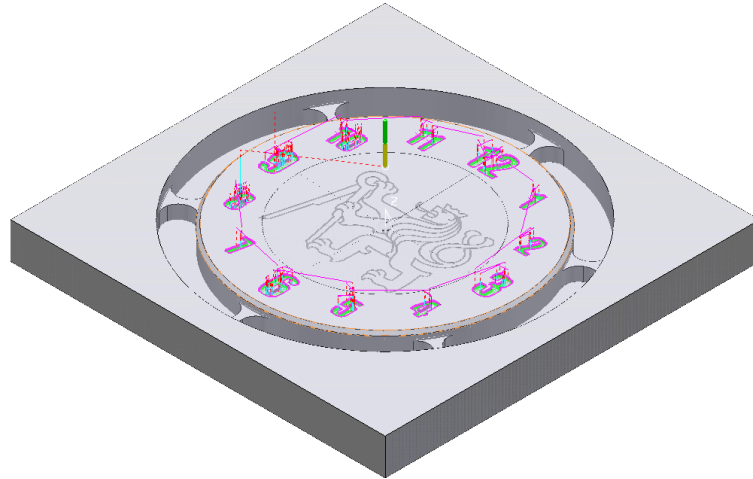
*Obrázek 50: Stav po 5. úseku*

Šestým úsekem je druhé hrubování číslic. Zvoleným nástrojem je válcová čelní fréza o průměru 3 mm se čtyřmi břity. Fréza o této velikosti se již dostane do všech čísel, ale ne do všech míst. Nechaný přídavek na obrábění je 0,15 mm. Nájezd i výjezd jsou pod úhlem.

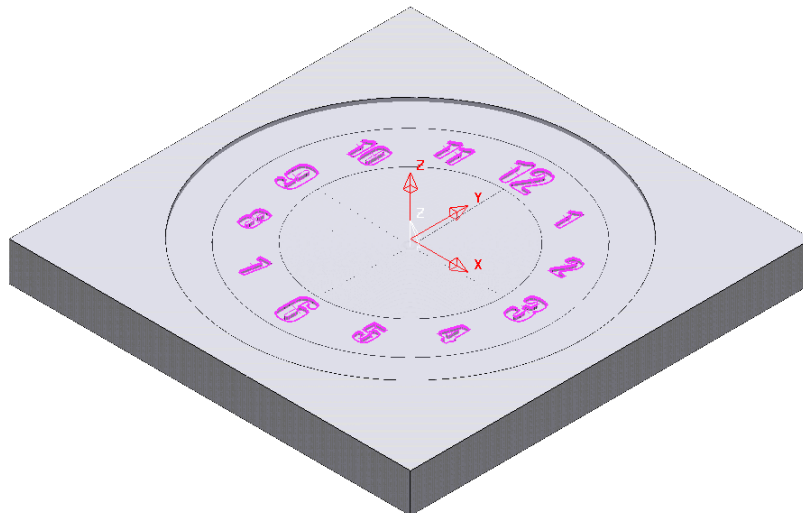
Sedmým úsekem je třetí a poslední hrubování číslic. Vybraným nástrojem je válcová čelní fréza o průměru 2 mm se čtyřmi břity. Fréza o této velikosti zvládne celé číslice. Nechaný přídavek na obrábění je 0,1 mm. Nájezd i výjezd jsou pod úhlem.



Osmým úsekem je dokončení číslic. Tento úsek má stejný nástroj jako úsek sedmý. Nájezd i výjezd jsou specifikovány jako horizontální oblouk pod úhlem  $10^\circ$  s rádiusem 2. Bylo zde nutné využít kompenzaci nástroje – CNC korekce plný rádius. Úsek je časově nejnáročnější z celého obrábění. *Obrázek 51* ukazuje spočtenou dráhu pro tento úsek. *Obrázek 52* znázorňuje stav po ukončení 8. úseku.



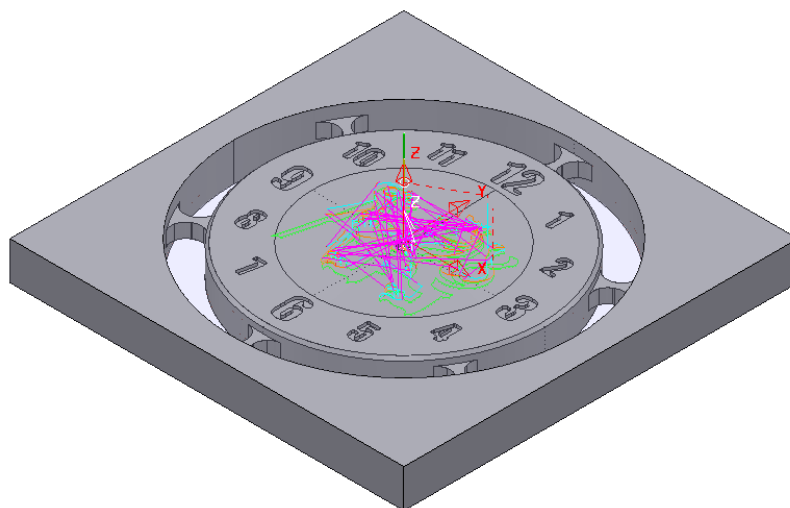
*Obrázek 51: Dráha 8. úseku*



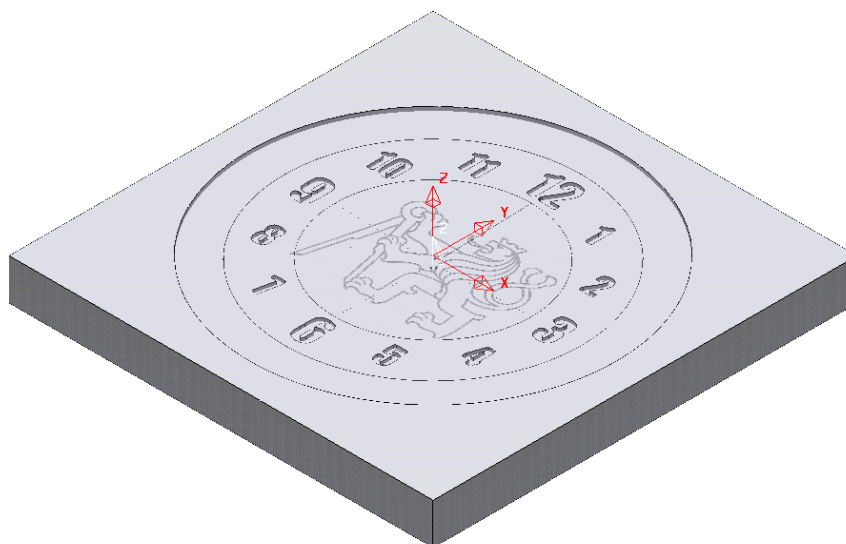
*Obrázek 52: Stav po 8. úseku*

Devátým úsekem je gravírování na kužel. Tento úsek je uskutečněn kulovou frézou o průměru 1 mm. Před spočtením dráhy bylo nutné vložit křivku (logo) a upravit ji na své místo. Posledním krokem bylo promítnutí křivky na plochu. Hloubka gravírování je 0,2 mm. Nájezd i výjezd jsou pod úhlem. *Obrázek 53* ukazuje spočtenou dráhu pro tento úsek. *Obrázek 54* znázorňuje stav po ukončení 9. úseku.

Tímto úsekem jsme dokončily všechny prvky na ploše hodin. Poslední tři obráběcí úseky jsou dokončením celého obrábění na frézce.



Obrázek 53: Dráha 9. úseku

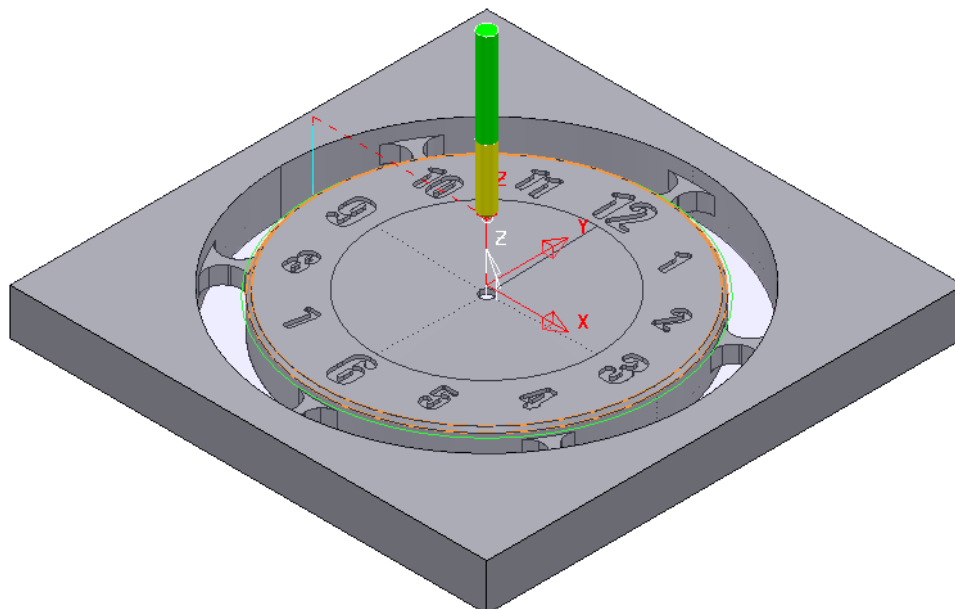


Obrázek 54: Stav po 9. úseku

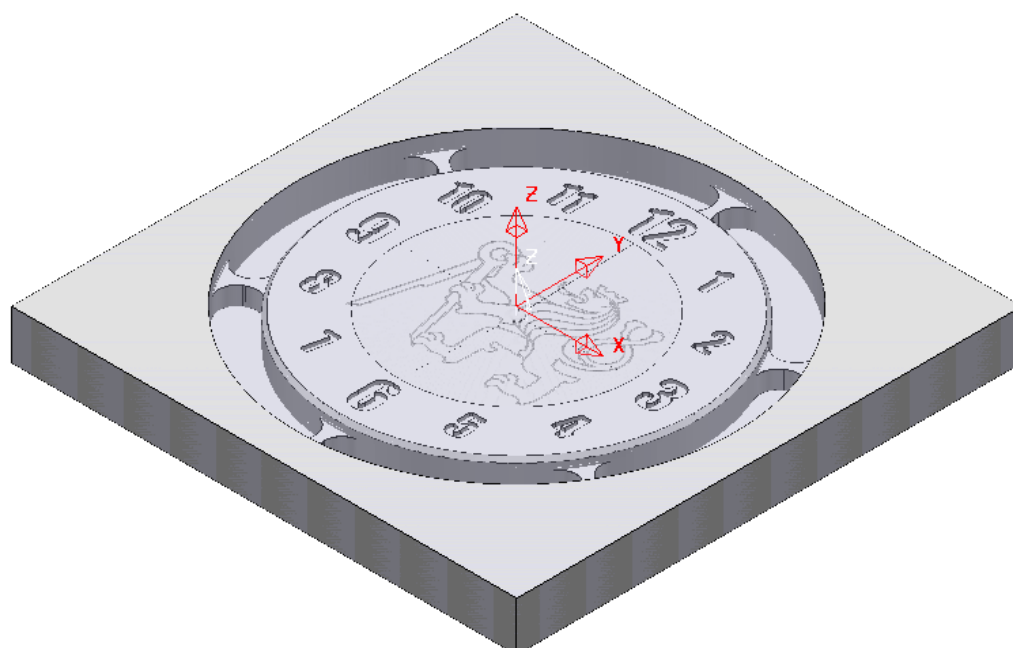
Desátým úsekem je hrubování obvodu hodin. Tento úsek je uskutečněn válcovou čelní frézou o průměru 18 mm se čtyřmi břity. Úsek se v podstatě shoduje s jedenáctým úsekem prvního programu. Nechaný přídavek na obrábění je 0,5 mm na stěnách. Frézujeme do hloubky 1 mm pod mosty (-18,6 mm dle souřadnicového systému). Nájezd i výjezd jsou pod úhlem.

Jedenáctým úsekem je dokončení obvodu hodin. Tento úsek má stejný nástroj jako úsek desátý. Úsek se v podstatě shoduje s dvanáctým úsekem prvního programu. Nájezd i výjezd jsou specifikovány jako horizontální oblouk pod úhlem  $10^\circ$  s rádiusem 6. Protože z předchozího úseku jsou mosty z druhé strany obrobene, budou přidržovat součást ke zbytku polotovaru jen oni.

Dvanáctým úsekem je sražení obvodu hodin. Zvoleným nástrojem je úhlová kulová fréza o průměru 10 mm, rádiusem břitu 2 mm a se čtyřmi břity. Nájezd i výjezd jsou pod úhlem. *Obrázek 55* ukazuje spočtenou dráhu pro tento úsek. *Obrázek 56* znázorňuje stav po ukončení 12. úseku. V modelu chybí výše zmíněná díra a obrobena část pod mosty oproti realitě.



*Obrázek 55: Dráha 12. úseku*



*Obrázek 56: Stav po 12. úseku*

Posledním krokem by bylo použití konkrétního postprocesoru ke zvolenému stroji a řídicímu systému na oba programy.

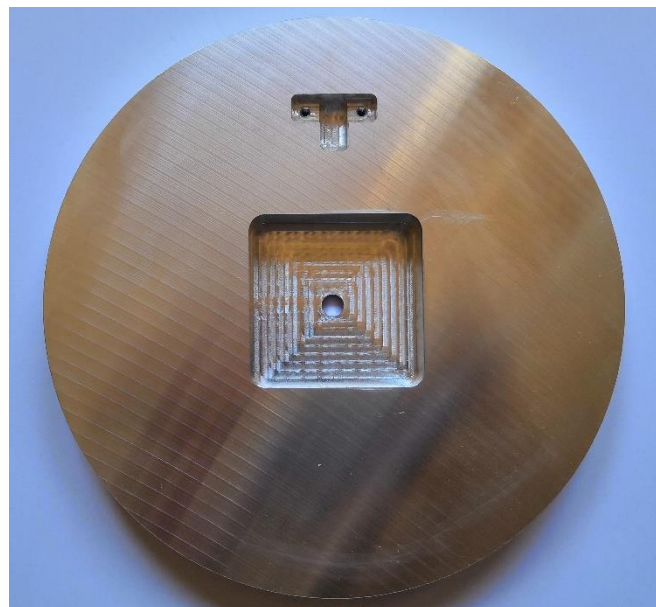
### 4.3 Realizace výroby a dokončení hodin

Samotná výroba dvou kusů hodin probíhala z časových důvodů v Lanžhotu na Moravě firmou Robots & CNC na 3 – osé CNC frézce. Technologem, který výrobu prováděl byl pan Ing. Libor Danda.

Materiál pro výrobu byl použit stejný jako při návrhu. Slitina hliníku (EN AW 5083) byla ve formě desky o tloušťce 25 mm. Deska byla válcovaná za tepla a následně oboustranně frézovaná již dodavatelem. Původní stav povrchu polotovaru je na zadní straně hodin.



Obrázek 57: Přední strana vyrobených hodin



Obrázek 58: Zadní strana vyrobených hodin



*Obrázek 59: Detail vygravírovaného lva ČVUT*

Zvolená metoda obrobení, kterou jsem zvolila já, je jedna z mnoha, jenž se daly využít. Výroba hodin byla realizována podle lehce odlišného postupu, který je uveden v seřizovacích listech (Příloha 3 a Příloha 4). Zde najdeme údaje o pořadí úseků, použitých nástrojích a o seřizovacích bodech. Důvodem pro užití jiného technologického postupu byla například aktuální skladová dostupnost polotovaru použitého pro výrobu a také dostupnost nástrojů v této firmě.

V seřizovacích listech jsou i údaje o časové náročnosti jednotlivých úseků. Při výpočtu se nebere v úvahu dynamika stroje, a tudíž jsou vypočtené časy přibližně o 30% menší než reálná doba úseku. Doba výroby jednoho kusu byla přibližně dvě hodiny strojního času. Další čas zabralo seřizování stroje a manipulace s polotvarem. Dohromady zabrala výroba obou kusů zhruba jeden den práce.

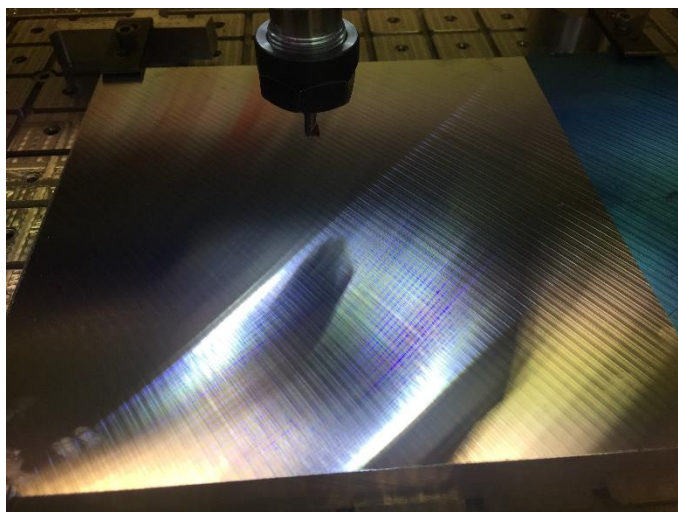
Hlavní změnou oproti navrženému postupu bylo obrácené pořadí obrábění. Nejprve se obráběla přední strana hodin, následně pak zadní strana.

Obrábění přední strany hodin je velmi podobné mému navrhovanému postupu, zadní strana však byla obráběna odlišně. Vzhledem k polotovaru, který byl již frézovaný, nebylo potřebné celou zadní plochu hodin znovu obrábět. Proto se na zadní straně vytvořila jen kapsa pro hodinový mechanismus a kapsa pro zavěšení.

Pro uchycení polotovaru se využily upínky a později vakuové upínání, které umožnilo výrobcí doobrobit hodiny bez použití mostů.

Na následujících obrázcích je zachycena část výroby.

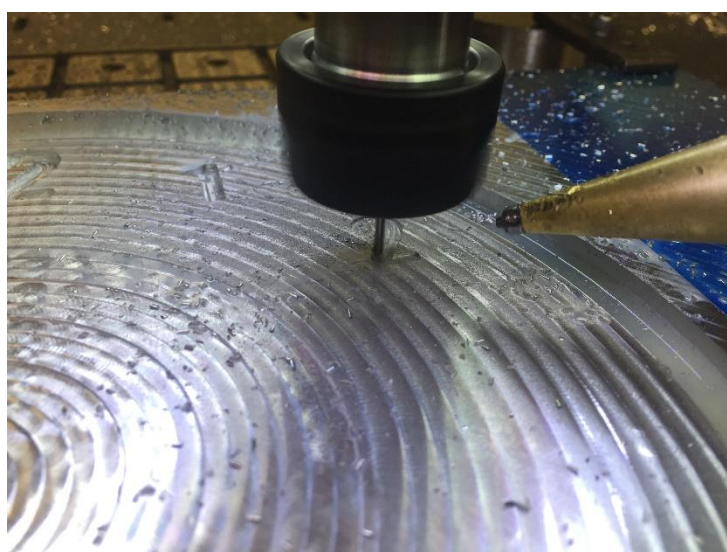




*Obrázek 60: Začátek výroby – polotovar*



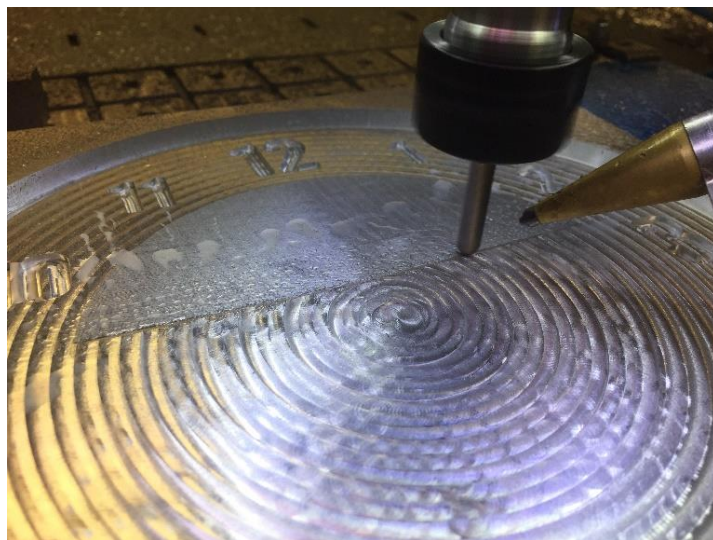
*Obrázek 61: Obrábění číslic*



*Obrázek 62: Detail obrábění číslic*



*Obrázek 63: Dokončené číslice*



*Obrázek 64: Obrábění kuželu*



*Obrázek 65: Gravírování lva ČVUT*





*Obrázek 66: Dokončená přední strana hodin*

Dokončené hodiny jsou opatřeny hodinovým mechanismem, hodinovými ručičkami a kouskem hliníkového plechu o tloušťce 2 mm, který byl ručně obroběn, pro zavěšení. Přichycený je nerezovými šrouby M3 se zápusťnou hlavou.



*Obrázek 67: Uchycení hodinového mechanismu*



*Obrázek 68: Hodinový mechanismus v kapse*





*Obrázek 69: Dokončená kapsa pro zavěšení*



*Obrázek 70: Dokončené hodiny*

## Závěr

Prvním cílem této práce bylo vytvořit rešerši o technologii frézování se zaměřením na CNC frézky a jejich programování. Této problematice jsem se věnovala v prvních třech kapitolách.

První kapitola obsahuje základní pojmy a seznámení se s technologií frézování, její kinematikou a nástroji. Je zde i krátký úvod do problematiky volby rezných podmínek pro technologii frézování.

Druhá kapitola se zabývá programováním CNC strojů (frézek). Rozděluje je na tři základní způsoby: ruční, dílenské a strojní programování. Ruční programování se nejvíce využívá u jednoduchých, snadno představitelných obrábění. Dílenské programování je častou náplní pro kvalifikovanější obsluhu CNC strojů. Strojní programování vykonává odborně vzdělaný programátor. Využívá se nejčastěji pro složité součástky.

Třetí kapitola čtenáře seznámí s rozdělením CNC frézek podle počtu ovládaných os, které úzce souvisí s technologickými možnostmi daného stroje. Každý typ je následně popsán.

Druhým cílem bylo vymodelovat součást dle vlastního návrhu, vytvořit výrobní program a zrealizovat výrobu. Tímto se zabývá poslední čtvrtá kapitola.

Čtvrtá kapitola začíná seznámením s materiálem vybraným pro součást. Dále je součást popsána. Předposlední podkapitola je věnována samotnému popisu vypracovaných programů, které jsem vytvářela v CAM softwaru Autodesk PowerMill Ultimate 2018. Následuje popis samotné výroby hodin a jejich kompletace, kterou jsem provedla doma.

Díky této práci jsem měla možnost se seznámit s praktickým využitím CAM softwaru, což mi bylo velkým přínosem. Vyzkoušela jsem si i zadat výrobu mnou navrženého dílu.

## Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [2] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. 3. díl. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [3] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [4] BYRNE, Patrick. *Turning, milling and grinding processes*. London: Arnold, 1996. ISBN 0340625031.
- [6] CHLADIL, Josef. *Přípravky a nástroje: část II - obrábění*. Praha: SNTL, 1992. ISBN 80-214-0408-6.
- [7] ING. KAVKOVÁ, D. Frézování: Základní charakteristika frézování. In: [Http://www.docplayer.cz](http://www.docplayer.cz) [online]. 2016 [cit. 2018-06-16]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/45994764-Zakladni-charakteristika-frezovani-frezovani-triskove-obrabeni-rovinnych-i-vnitnich-a-vnejsich-tvarovych-ploch-stroje-frezky-nastroje-frezy.html>
- [8] Fréza válcová 80x63mm na horizontální frézku. In: *NAKO Pardubice s.r.o.* [online]. Pardubice, 2018 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: <https://www.nako.cz/8603-freza-valcova-80x63mm-na-horizontalni-frezku-hss-csn-222128-92128.html>
- [9] Fréza válcová čelní nástrčná. In: *BO-IMPORT s.r.o.* [online]. Pardubice, 2015 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: <https://www.bo-import.cz/frezy-hss/frezy-nastrcne-hss/freza-valcova-celni-nastrcna-jemnozuba-690275v-030030-30x30-hss-co5-typ-h-16079.html>
- [10] Čelní fréza od MMC HITACHI. In: *TGS* [online]. Holoubkov [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: <http://www.tgs.cz/novinky/41/>
- [11] Fréza kotoučová pr. 200x16x40 mm. In: *Landsmann s. r. o.* [online]. [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: <http://www.landsmann.cz/zps-720275-freza-kotoucova-pr-200x16x40-mm-polohrubozuba-din-885-typ-n- d76528.html>
- [12] DOC. ING. HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: ZÁKLADNÍ METODY OBRÁBĚNÍ – 1. část* [online]. In: . Brno, 2004 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/zakl\\_met\\_obr/zakl\\_met\\_obr\\_1.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/zakl_met_obr/zakl_met_obr_1.pdf)

- [13] ING. MIČÍKOVÁ, Iveta. Strojní obrábění: Frézování II. In: *SlidePlayer* [online]. 2018 [cit. 2018-06-26]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3358051/>
- [14] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. 1. díl. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [15] *Kennametal: nuove frese integrali Eade Beyond in ceramica* [online]. In: . 2013 [cit. 2018 06 28]. Dostupné z: <http://www.utensilieattrezature.it/2013/07/08/kennametal-nuove-frese-integrali-eade-beyond-in-ceramica/>
- [16] PCD-CBN STANDARD & NON STANDARD TOOLS. In: *Indiamart* [online]. [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/snehdeepgroup/pcd-cbn-standard-non-standard-tools.html>
- [17] ING. NOVÁK, Zděnek. Moderní výkonné frézovací nástroje. In: *Mmspektrum* [online]. 2008 [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-vykonne-frezovaci-nastroje-2.html>
- [18] BRYCHTA, Josef. *Technologie II*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [19] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [20] OVERBY, Alan. *CNC machining handbook: building, programming, and implementation*. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-162301-8.
- [21] BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. *Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0034-9.
- [22] Návod frézky DOS [online]. Mikronex s. r. o., s. 29 [cit. 2018-07-9].
- [23] FANUC CNC control series. FANUC [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/si/en/cnc/controls>
- [24] APRO, Karlo. *Secrets of 5-axis machining*. New York: Industrial Press, c2009. ISBN 978-0-8311-3375-7.
- [25] ING. SPÁČIL, Petr. Praktický přehled hliníkových slitin dostupných v ČR. *Kovospacil* [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <http://www.kovospacil.cz/alloys/cz.htm>

# Seznam obrázků, tabulek a příloh

Obrázek 1: Ukázka čelního a válcového frézování [7] .....	- 9 -
Obrázek 2: Válcové frézování a) nesousledné b) sousledné [7] .....	- 10 -
Obrázek 3: Čelní frézování [7].....	- 11 -
Obrázek 4: Typy fréz a) Válcová b) Válcová čelní c) Čelní d) Kotoučová [8, 9, 10, 11].....	- 12 -
Obrázek 5: Příklad stopkových fréz [12] .....	- 13 -
Obrázek 6: Fréza a) pravořezná b) levořezná [13] .....	- 13 -
Obrázek 7: Fréza a) keramická b) s KNB c) s polykrystalickým diamantem [15, 16, 17] .....	- 15 -
Obrázek 8: Příklad dílenského programování [23] .....	- 21 -
Obrázek 9: Digram toku dat .....	- 22 -
Obrázek 10: Obrábění 2D - pravouhlé řízení [19] .....	- 23 -
Obrázek 11: Obrábění 2D - souvislé řízení [19] .....	- 24 -
Obrázek 12: Obrábění 2,5D [19].....	- 24 -
Obrázek 13: Obrábění 3D [19].....	- 25 -
Obrázek 14: Obrábění 3+2D [19] .....	- 25 -
Obrázek 15: Obrábění 5D [19].....	- 26 -
Obrázek 16: Obrázek 15: Příklady naklápění pro 5D obrábění [19].....	- 26 -
Obrázek 17: Model hodin – přední a zadní strana .....	- 28 -
Obrázek 18: Vyznačená kuželová plocha .....	- 28 -
Obrázek 19: Vyznačená kapsa pro hodinový mechanismus .....	- 29 -
Obrázek 20: Otvor pro uchycení .....	- 29 -
Obrázek 21: Model pro obrábění .....	- 30 -
Obrázek 22: Nový souřadnicový systém a bezpečná oblast .....	- 30 -
Obrázek 23: Dráha 1. úseku.....	- 31 -
Obrázek 24: Stav po 1. úseku.....	- 31 -
Obrázek 25: Dráha 2. úseku .....	- 31 -
Obrázek 26: Stav po 2. úseku.....	- 32 -
Obrázek 27: Dráha 3. úseku .....	- 32 -
Obrázek 28: Stav po 3. úseku.....	- 32 -
Obrázek 29: Dráha 4. úseku .....	- 33 -
Obrázek 30: Stav po 4. úseku.....	- 33 -
Obrázek 31: Stav po 5. úseku.....	- 33 -
Obrázek 32: Stav po 6. úseku.....	- 34 -
Obrázek 33: Stav po 7. úseku.....	- 34 -
Obrázek 34: Stav po 7. úseku.....	- 34 -
Obrázek 35: Stav po 9. úseku.....	- 35 -
Obrázek 36: Dráha 11. úseku .....	- 35 -
Obrázek 37: Stav po 11. úseku.....	- 35 -
Obrázek 38: Dráha 12. úseku .....	- 36 -
Obrázek 39: Stav po 12. úseku.....	- 36 -
Obrázek 40: Dráhy .....	- 37 -
Obrázek 41: Dráha 1. úseku.....	- 37 -
Obrázek 42: Stav po 1. úseku.....	- 37 -
Obrázek 43: Dráha 2. úseku .....	- 38 -
Obrázek 44: Stav po 2. úseku.....	- 38 -
Obrázek 45: Dráha 3. úseku .....	- 38 -
Obrázek 46: Stav po 3. úseku.....	- 39 -
Obrázek 47: Dráha 4. úsek .....	- 39 -
Obrázek 48: Stav po 4. úsek.....	- 39 -
Obrázek 49: Dráha 5. úseku .....	- 40 -
Obrázek 50: Stav po 5. úseku.....	- 40 -
Obrázek 51: Dráha 8. úseku.....	- 41 -
Obrázek 52: Stav po 8. úseku.....	- 41 -

Obrázek 53: Dráha 9. úseku .....	- 42 -
Obrázek 54: Stav po 9. úseku.....	- 42 -
Obrázek 55: Dráha 12. úseku .....	- 43 -
Obrázek 56: Stav po 12. úseku.....	- 43 -
Obrázek 57: Přední strana vyrobených hodin .....	- 44 -
Obrázek 58: Zadní strana vyrobených hodin .....	- 44 -
Obrázek 59: Detail vygravírovaného lva ČVUT.....	- 45 -
Obrázek 60: Začátek výroby – polotovar .....	- 46 -
Obrázek 61: Obrábění číslic.....	- 46 -
Obrázek 62: Detail obrábění číslic .....	- 46 -
Obrázek 63: Dokončené číslice.....	- 47 -
Obrázek 64: Obrábění kuželu.....	- 47 -
Obrázek 65: Gravírování lva ČVUT .....	- 47 -
Obrázek 66: Dokončená přední strana hodin .....	- 48 -
Obrázek 67: Uchycení hodinového mechanismu.....	- 48 -
Obrázek 68: Hodinový mechanismus v kapse .....	- 48 -
Obrázek 69: Dokončená kapsa pro zavěšení.....	- 49 -
Obrázek 70: Dokončené hodiny.....	- 49 -

Tabulka 1: Rozdělení slinutých karbidů dle ISO 513 .....	- 16 -
Tabulka 2: Informativní řezné podmínky pro frézování [1] .....	- 17 -
Tabulka 3: Složení programu (v bloku) [19] .....	- 18 -
Tabulka 4: Seznam přípravných funkcí – frézka Mikronex [22].....	- 19 -
Tabulka 5: Seznam pomocných funkcí a význam adres – frézka Mikronex [22] .....	- 20 -

Příloha 1: Model hodin

Příloha 2: Výkres hodin

Příloha 3: Seřizovací list pro přední stranu

Příloha 4: Seřizovací list pro zadní stranu