



**FAKULTA  
ŠTROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

**Optimalizace hrubovacího obrábění  
grafitových elektrod v CAM**

**Graphite Electrodes Roughing  
Optimalisation in CAM Software**

**Diplomová práce**

**2022**

**Bc. Michal JARKOVSKÝ**

**Studijní program:** N071A270001 Výrobní inženýrství

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



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jarkovský** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **466401**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Optimalizace hrubovacího obrábění grafitových elektrod v CAM**

Název diplomové práce anglicky:

**Graphite electrodes roughing optimisation in CAM software**

Pokyny pro vypracování:

Rychlá příprava elektrod pro hloubení EDM je důležitá pro zlepšení ekonomiky nasazení této technologie. Hrubovací obrábění, kde je důležitý úběr může s vhodnými podmínkami výrazně zkrátit celkovou dobu obrábění. Proto proveďte:

1. Rešerši na téma výroba a použití grafitových elektrod a to s důrazem na jejich třískové obrábění.
2. Analýzou zjistěte vhodné podmínky a nastavení pro obrábění grafitových elektrod.
3. Proveďte praktický experiment porovnání původních a optimalizovaných podmínek s využitím CAM.
4. Vyhodnoťte experiment dostupnými metodami, proveďte technicko-ekonomické zhodnocení.
5. Konstatujte závěry a doporučení pro další práci.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Jan Tomiček, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Jan Tomiček, 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

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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci s názvem „Optimalizace hrubovacího obrábění grafitových elektrod v CAM“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Tomíčka, Ph.D., s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 20.5.2022

.....

Bc. Michal Jarkovský

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Tomíčkoví, Ph.D. za odborné vedení v průběhu vypracování mé práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Vilému Sieratovskému za poskytnutí zázemí pro provedení praktické části diplomové práce a pánům Pavlu Pultrovi a Romanu Hubovi za pomoc při tvorbě praktické části. Také bych ještě chtěl poděkovat paní Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D. za pomoc s teoretickou částí zabývající se vstřikováním plastů.

## ANOTAČNÍ LIST

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Jméno autora:         | Bc. Michal Jarkovský   |
| Název DP:             | Optimalizace hrubovacího obrábění grafitových elektrod v CAM   |
| Anglický název:       | Graphite electrodes roughing optimisation in CAM software  |
| Rok:                  | 2022   |
| Škola, fakulta:       | ČVUT v Praze, fakulta strojní  |
| Studijní program:     | N071A270001 Výrobní inženýrství  |
| Ústav:                | Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie  |
| Vedoucí:              | Ing. Jan Tomíček, Ph.D.  |
| Bibliografické údaje: | počet stran 106<br>počet obrázků 149<br>počet tabulek 71<br>počet příloh 1   |
| Klíčová slova:        | Elektroda, optimalizace, grafit, frézka, ekonomický, propočet, CAD, CAM  |
| Keywords:             | Electrode, optimization, graphite, milling machine, economic, calculation, CAD, CAM  |
| Anotace:              | Tato diplomová práce se zabývá hrubovacím obráběním grafitových elektrod. V praktické části je řešena optimalizace hrubovacího obráběcího procesu a ekonomický propočet optimalizačních variant.                   |
| Abstract:             | This diploma thesis deals with the roughing machining of graphite electrodes. The practical part deals with the optimization of the roughing machining process and the economic calculation of optimized variants. |

## OBSAH

|   |    |
|---|----|
| 1. Úvod .....   | 12 |
| 2. Vstřikovací formy – popis a příspěvek EDM .....                              | 13 |
| 2.1. Formy pro vstřikovací lisy .....   | 13 |
| 2.1.1. Popis a typy lisů .....  | 13 |
| 2.1.2. Konstrukce forem pro vstřikovací lisy .....                              | 15 |
| 2.1.2.1. Vyhazovací systémy .....   | 17 |
| 2.1.2.2. Vtoková soustava .....   | 19 |
| 2.1.3. Problémy při výrobě a příspěvek EDM .....                                | 20 |
| 3. Konvenční a nekonvenční metody obrábění .....                                | 22 |
| 3.1. Konvenční obrábění .....   | 22 |
| 3.1.1. Frézování grafitových elektrod .....                                     | 23 |
| 3.2. Nekonenční obrábění .....  | 24 |
| 3.2.1. Elektroerozivní obrábění – hloubení .....                                | 25 |
| 3.2.1.1. Elektroerozivní obrábění– drátové řezání .....                         | 27 |
| 3.2.1.2. Materiály elektrod .....   | 27 |
| 3.2.2. Požadavky kladené na hrubovací frézování .....                           | 28 |
| 4. SW pro tvorbu elektrod – rozdíly mezi CAD+CAM a CAD/CAM .....                | 29 |
| 4.1. Používané softwary pro výrobu elektrod .....                               | 29 |
| 4.1.1. CAD + CAM .....  | 29 |
| 4.1.2. CAD/CAM .....  | 30 |
| 4.1.3. Speciální software .....   | 31 |
| 5. Analýza současného stavu .....   | 32 |
| 5.1. Příprava modelu a polotovaru pro frézování .....                           | 34 |
| 5.1.1. Příprava modelu elektrody .....  | 34 |
| 5.1.2. Příprava polotovaru pro frézování .....                                  | 35 |
| 5.1.3. Uchycení polotovaru do frézky .....                                      | 37 |
| 5.1.3.1. Uchycení polotovaru pomocí lepidla a speciálně připravené kostky ..... | 38 |
| 5.1.3.2. Uchycení polotovaru pomocí šroubů .....                                | 39 |
| 5.2. Identifikace chyb při obrábění .....                                       | 39 |
| 5.2.1. Testovací model a jeho obrábění .....                                    | 39 |
| 5.2.2. Analýza vyfrézovaného testovacího dílu .....                             | 42 |
| 5.2.2.1. První měření .....   | 42 |
| 5.2.2.2. Druhé měření .....   | 44 |
| 5.2.2.3. Porovnání měření .....   | 45 |
| 6. Optimalizace obrábění – praktický experiment a teoretické simulace .....     | 45 |
| 6.1. Frézování elektrod – tříosá frézka .....                                   | 45 |
| 6.1.1. Stávající stav .....   | 45 |
| 6.1.2. Změna řezných podmínek .....   | 46 |
| 6.1.2.1. Tvarová elektroda malých rozměrů .....                                 | 46 |
| 6.1.2.2. Tvarová elektroda velkých rozměrů .....                                | 51 |
| 6.1.2.3. Elektroda pro obrábění žeber .....                                     | 54 |
| 6.1.2.4. Optimalizace řezných podmínek – shrnutí výsledků .....                 | 59 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 6.1.3.   | Změna obráběcí strategie .....  | 60 |
| 6.1.3.1. | Změna směru frézování .....   | 60 |
| 6.1.3.2. | Frézování celou délkou břitu.....   | 63 |
| 6.1.3.3. | Strategie plunge milling .....  | 67 |
| 6.1.3.4. | Souhrn výsledků – optimalizace obráběcí strategie .....                     | 67 |
| 6.1.4.   | Změna nástroje .....  | 68 |
| 6.1.4.1. | Souhrn výsledků.....  | 70 |
| 6.2.     | Změna upínacího systému.....  | 71 |
| 6.3.     | Frézování elektrod – pětiosá frézka .....                                   | 72 |
| 6.3.1.   | Výběr nástroje .....  | 72 |
| 6.3.2.   | Teoretický výběr stroje.....  | 72 |
| 6.3.3.   | Elektrody vybrané pro optimalizaci.....                                     | 73 |
| 6.3.3.1. | Optimalizace obrábění elektrody – tvarová elektroda malých rozměrů .....    | 74 |
| 6.3.3.2. | Optimalizace obrábění elektrody – tvarová elektroda velkých rozměrů .....   | 75 |
| 6.3.3.3. | Optimalizace obrábění elektrody – tvarová elektroda atypických rozměrů..... | 76 |
| 6.4.     | Ekonomické kalkulace optimalizací.....                                      | 77 |
| 6.4.1.   | Ekonomická kalkulace – změna řezných podmínek.....                          | 77 |
| 6.4.1.1. | Tvarová elektroda malých rozměrů.....                                       | 77 |
| 6.4.1.2. | Tvarová elektroda velkých rozměrů .....                                     | 78 |
| 6.4.1.3. | Elektroda pro obrábění žeber .....  | 79 |
| 6.4.2.   | Ekonomická kalkulace – změna směru obrábění.....                            | 79 |
| 6.4.2.1. | Tvarová elektroda malých rozměrů.....                                       | 79 |
| 6.4.2.2. | Tvarová elektroda velkých rozměrů .....                                     | 80 |
| 6.4.2.3. | Elektroda pro obrábění žeber .....  | 80 |
| 6.4.3.   | Ekonomická kalkulace – obrábění celou délkou břitu nástroje .....           | 81 |
| 6.4.3.1. | Tvarová elektroda malých rozměrů – obrábění celou délkou břitu .....        | 81 |
| 6.4.3.2. | Tvarová elektroda velkých rozměrů – obrábění celou délkou břitu .....       | 82 |
| 6.4.3.3. | Elektroda pro obrábění žeber – obrábění celou délkou břitu.....             | 82 |
| 6.4.4.   | Změna upínacího systému – náklady na polotovary .....                       | 83 |
| 6.4.4.1. | Malá tvarová elektroda – výpočet polotovaru .....                           | 83 |
| 6.4.4.2. | Elektroda pro výrobu žeber – výpočet polotovaru .....                       | 85 |
| 6.4.5.   | Ekonomický propočet – změna nástroje.....                                   | 86 |
| 6.4.5.1. | Tvarová elektroda malých rozměrů – změna nástroje.....                      | 86 |
| 6.4.5.2. | Tvarová elektroda velkých rozměrů – změna nástroje .....                    | 86 |
| 6.4.5.3. | Elektroda pro výrobu žeber změna – nástroje .....                           | 87 |
| 6.4.6.   | Ekonomický propočet – pětiosé obrábění.....                                 | 87 |
| 6.4.6.1. | Tvarová elektroda malých rozměrů – pětiosé frézování .....                  | 88 |
| 6.4.6.2. | Tvarová elektroda velkých rozměrů – pětiosé frézování .....                 | 89 |
| 6.4.6.3. | Tvarová elektroda atypických rozměrů – pětiosé frézování.....               | 90 |
| 6.4.7.   | Ekonomické porovnání optimalizačních variant.....                           | 91 |
| 6.4.7.1. | Shrnutí ušetřených nákladů – malá tvarová elektroda .....                   | 91 |
| 6.4.7.2. | Shrnutí ušetřených nákladů – velká tvarová elektroda .....                  | 92 |
| 6.4.7.3. | Shrnutí ušetřených nákladů – elektroda pro výrobu žeber .....               | 92 |
| 6.4.7.4. | Shrnutí ušetřených nákladů – změna nástroje .....                           | 93 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>6.4.7.5. Shrnutí ušetřených nákladů – pětiosé frézování .....</b> | <b>94</b>  |
| <b>7. Závěr.....</b>   | <b>95</b>  |
| <b>8. Seznam zdrojů.....</b>   | <b>97</b>  |
| <b>9. Seznam obrázků .....</b>                                       | <b>101</b> |
| <b>10. Seznam tabulek .....</b>                                      | <b>104</b> |
| <b>11. Seznam příloh.....</b>  | <b>106</b> |



## SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

### Zkratky

|      |  |
|------|--|
| CAD  | Computer-aided design (počítačem podporované projektování) |
| CAM  | Computer-aided manufacturing (počítačová podpora obrábění) |
| CNC  | Computer numeric control (číslicové řízení počítačem)      |
| EDM  | Electric discharge Machining (elektroerozivní obrábění)    |
| K3   | Kulová fréza o průměru 3 mm                                |
| MTE  | Malá tvarová elektroda                                     |
| Opt. | Optimalizované/optimalizovaný/optimalizovaném              |
| SW   | Software   |
| V10  | Válcová fréza s radiusem o průměru 10 mm                   |
| V3   | Válcová fréza s radiusem o průměru 3 mm                    |
| VTE  | Velká tvarová elektroda                                    |
| ŽE   | Žebrová elektroda  |

### Symbole – latinská abeceda

|            |                  |  |
|------------|------------------|--|
| $A_p$      | [mm]             | Hloubka řezu   |
| $A_e$      | [mm]             | Boční krok nástroje  |
| $f_z$      | $[\frac{mm}{z}]$ | Posuv na zub   |
| $N_{SM}$   | [Kč]             | Náklady (před optimalizací) – malá tvarová elektroda                   |
| $N_{CSM}$  | [Kč]             | Celkové náklady (před optimalizací) – malá tvarová elektroda           |
| $N_{OM1}$  | [Kč]             | Náklady při opt. řezných podmínkách – malá tvarová elektroda           |
| $N_{COM1}$ | [Kč]             | Celkové náklady při opt. řezných podmínkách – malá tvarová elektroda   |
| $N_{UM1}$  | [Kč]             | Ušetřené náklady při opt. řezných podmínkách – malá tvarová elektroda  |
| $N_{SV}$   | [Kč]             | Náklady (před optimalizací) – velká tvarová elektroda                  |
| $N_{CSV}$  | [Kč]             | Celkové náklady (před optimalizací) – velká tvarová elektroda          |
| $N_{OV1}$  | [Kč]             | Náklady při opt. řezných podmínkách – velká tvarová elektroda          |
| $N_{COV1}$ | [Kč]             | Celkové náklady při opt. řezných podmínkách – velká tvarová elektroda  |
| $N_{UV1}$  | [Kč]             | Ušetřené náklady při opt. řezných podmínkách – velká tvarová elektroda |
| $N_{sž}$   | [Kč]             | Náklady (před optimalizací) – elektroda pro obrábění žeber             |
| $N_{CSž}$  | [Kč]             | Celkové náklady (před optimalizací) – elektroda pro obrábění žeber     |
| $N_{Ož1}$  | [Kč]             | Náklady při opt. řezných podmínkách – elektroda pro obrábění žeber     |



|                 |   |
|-----------------|---|
| $N_{COŽ1}$ [Kč] | Celkové náklady při opt. řezných podmínkách – elektroda pro obrábění žeber      |
| $N_{UŽ1}$ [Kč]  | Ušetřené náklady při opt. řezných podmínkách – elektroda pro obrábění žeber     |
| $N_{OM2}$ [Kč]  | Náklady při opt. směru obrábění – malá tvarová elektroda                        |
| $N_{COM2}$ [Kč] | Celkové náklady při opt. směru obrábění – malá tvarová elektroda                |
| $N_{UM2}$ [Kč]  | Ušetřené náklady při opt. směru obrábění – malá tvarová elektroda               |
| $N_{OV2}$ [Kč]  | Náklady při opt. směru obrábění – velká tvarová elektroda                       |
| $N_{COV2}$ [Kč] | Celkové náklady při opt. směru obrábění – velká tvarová elektroda               |
| $N_{UV2}$ [Kč]  | Ušetřené náklady při opt. směru obrábění – velká tvarová elektroda              |
| $N_{OŽ2}$ [Kč]  | Náklady při opt. směru obrábění – elektroda pro obrábění žeber                  |
| $N_{COŽ2}$ [Kč] | Celkové náklady při opt. směru obrábění – elektroda pro obrábění žeber          |
| $N_{UŽ2}$ [Kč]  | Ušetřené náklady při opt. směru obrábění – elektroda pro obrábění žeber         |
| $N_{OM3}$ [Kč]  | Náklady při obrábění celou délkou břitu – malá tvarová elektroda                |
| $N_{COM3}$ [Kč] | Celkové náklady při obrábění celou délkou břitu – malá tvarová elektroda        |
| $N_{UM3}$ [Kč]  | Ušetřené náklady při obrábění celou délkou břitu – malá tvarová elektroda       |
| $N_{OV3}$ [Kč]  | Náklady při obrábění celou délkou břitu – velká tvarová elektroda               |
| $N_{COV3}$ [Kč] | Celkové náklady při obrábění celou délkou břitu – velká tvarová elektroda       |
| $N_{UV3}$ [Kč]  | Ušetřené náklady při obrábění celou délkou břitu – velká tvarová elektroda      |
| $N_{OŽ3}$ [Kč]  | Náklady při obrábění celou délkou břitu – elektroda pro obrábění žeber          |
| $N_{COŽ3}$ [Kč] | Celkové náklady při obrábění celou délkou břitu – elektroda pro obrábění žeber  |
| $N_{UŽ3}$ [Kč]  | Ušetřené náklady při obrábění celou délkou břitu – elektroda pro obrábění žeber |
| $N_{OM4}$ [Kč]  | Náklady při změně nástroje – malá tvarová elektroda                             |
| $N_{COM4}$ [Kč] | Celkové náklady při změně nástroje – malá tvarová elektroda                     |
| $N_{UM4}$ [Kč]  | Ušetřené náklady při změně nástroje – malá tvarová elektroda                    |
| $N_{OV4}$ [Kč]  | Náklady při změně nástroje – velká tvarová elektroda                            |
| $N_{COV4}$ [Kč] | Celkové náklady při změně nástroje – velká tvarová elektroda                    |
| $N_{UV4}$ [Kč]  | Ušetřené náklady při změně nástroje – velká tvarová elektroda                   |



|            |                               |  |
|------------|-------------------------------|--|
| $N_{OŽ4}$  | [Kč]                          | Náklady při změně nástroje – elektroda pro obrábění žeber          |
| $N_{COŽ4}$ | [Kč]                          | Celkové náklady při změně nástroje – elektroda pro obrábění žeber  |
| $N_{UŽ4}$  | [Kč]                          | Ušetřené náklady při změně nástroje – elektroda pro obrábění žeber |
| $N_{TM}$   | [Kč]                          | Náklady na tříosou frézku – malá tvarová elektroda                 |
| $N_{CTM}$  | [Kč]                          | Celkové náklady na tříosou frézku – malá tvarová elektroda         |
| $N_{PM}$   | [Kč]                          | Náklady na pětiosou frézku – malá tvarová elektroda                |
| $N_{CPM}$  | [Kč]                          | Celkové náklady na pětiosou frézku – malá tvarová elektroda        |
| $N_{UPTM}$ | [Kč]                          | Ušetřené náklady u pětiosé frézky – malá tvarová elektroda         |
| $N_{TV}$   | [Kč]                          | Náklady na tříosou frézku – velká tvarová elektroda                |
| $N_{CTV}$  | [Kč]                          | Celkové náklady na tříosou frézku – velká tvarová elektroda        |
| $N_{PV}$   | [Kč]                          | Náklady na pětiosou frézku – velká tvarová elektroda               |
| $N_{CPV}$  | [Kč]                          | Celkové na pětiosou frézku – velká tvarová elektroda               |
| $N_{UPTV}$ | [Kč]                          | Ušetřené náklady u pětiosé frézky – velká tvarová elektroda        |
| $N_{TA}$   | [Kč]                          | Náklady na tříosou frézku – atypická tvarová elektroda             |
| $N_{CTA}$  | [Kč]                          | Celkové náklady na tříosou frézku – atypická tvarová elektroda     |
| $N_{PA}$   | [Kč]                          | Náklady na pětiosou frézku – atypická tvarová elektroda            |
| $N_{CPA}$  | [Kč]                          | Celkové náklady na pětiosou frézku – atypická tvarová elektroda    |
| $N_{UPTA}$ | [Kč]                          | Ušetřené náklady u pětiosé frézky – atypická tvarová elektroda     |
| $P_{PM}$   | [Kč]                          | Původní cena materiálu – malá tvarová elektroda                    |
| $P_{OM}$   | [Kč]                          | Cena materiálu optimalizované elektrody – malá tvarová elektroda   |
| $P_{ZNM}$  | [Kč]                          | Navýšení nákladu na polotovar – malá tvarová elektroda             |
| $P_{PŽ}$   | [Kč]                          | Původní cena materiálu – žebrová elektroda                         |
| $P_{OŽ}$   | [Kč]                          | Cena materiálu optimalizované elektrody – žebrová elektroda        |
| $P_{ZNŽ}$  | [Kč]                          | Navýšení nákladu na polotovar – žebrová elektroda                  |
| $V_{PM}$   | [Kč]                          | Objem původní elektrody – malá tvarová elektroda                   |
| $V_{OM}$   | [Kč]                          | Objem optimalizované elektrody – malá tvarová elektroda            |
| $V_{PŽ}$   | [Kč]                          | Objem původní elektrody – žebrová elektroda                        |
| $V_{OŽ}$   | [Kč]                          | Objem optimalizované elektrody – žebrová elektroda                 |
| $V_f$      | $\left[\frac{mm}{min}\right]$ | Rychlost posuvu  |

## 1. Úvod

Diplomová práce se zabývá výrobou grafitových elektrod a optimalizací hrubovacího procesu výroby. Práce je zaměřena na rozdíl mezi hrubováním na tříosém a pětiosém frézovacím centru včetně zhodnocení výhod a nevýhod daných strojů. Na závěr se v praktické části zhodnotí finanční stránka jednotlivých optimalizací daného obráběcího procesu a úvaha, zdali bude vhodné pořídit pětiosé frézovací centrum.

V teoretické části je popsáno použití těchto grafitových elektrod při výrobě forem pro vstřikovací lisy. Je zde uveden popis konstrukce těchto forem, přehled používaných strojů a jejich vývoj. Dále je vysvětlen rozdíl mezi studeným a horkým vtokem. Následně je popsán rozdíl mezi konvenčním a nekonvenčním obráběním, kde je kladen důraz především na elektroerozivní obrábění. Jsou zde popsány výhody a nevýhody zmíněného obrábění, kde se práce především zaměřuje na elektroerozivní hloubení.

Diplomová práce obsahuje rozbor a popis softwaru pro tvorbu a výrobu elektrod, kdy je věnována pozornost rozdílu mezi CAD+CAM a CAD/CAM softwarům obecně a následně specializovaným SW.

V praktické části je nejprve vysvětlena problematika přípravy polotovaru, kde je řešeno upínání polotovaru do frézky, dále je zde řešen frézovací proces od samého počátku, což znamená od tvorby modelu a frézovacího programu až po samotné hrubovací frézování a problémy, které při něm mohou nastat. V tomto procesu jsou upravovány zvolené řezné parametry, měněny obráběcí strategie, a nakonec je změněn i obráběcí nástroj. Také jsou vytvořeny simulace pětiosého obrábění, které jsou následně porovnávány s tříosým obráběním.

Jako poslední jsou zhodnoceny optimalizace frézovacího procesu a vybráno nejlepší možné řešení pro zvolené typy elektrod (žebro, elektroda větších rozměrů atd.).

Díky vyšším požadavkům na odsávání grafitových částic při obrábění nemohla být praktická část zhotovena ve škole, a byla tedy vypracována ve firmě Bronas s.r.o., která se zabývá výrobou forem pro vstřikovací lisy, kdy firma využije veškeré zjištěné poznatky k optimalizaci hrubovacího procesu.

Cílem této práce je optimalizace hrubovacího obráběcího procesu grafitových elektrod pro firmu Bronas s.r.o. a možné vytvoření podkladů, které budou sloužit k pořízení nového stroje.

## 2. Vstřikovací formy – popis a příspěvek EDM

Vstřikovací formy jsou složité nástroje, které se skládají z velkého počtu dílů. K jejich správné funkci je nutná velká přesnost i při tvarově složitých prvcích. Některé části forem však nelze vyrobit běžnými konvenčními metodami, a tudíž je nutno použít metody nekonvenčního obrábění. Konkrétně se například jedná o elektroerozivní hloubení.

V kapitole se nachází popis vstřikovacích forem a strojů, u kterých je EDM používáno. Je popsán způsob jejich využití a kapitola věnuje pozornost také problematice jejich výroby.

V další části je popsán příspěvek elektroerozivního obrábění při zhotovení vstřikovacích forem a dále jsou prezentovány názorné příklady grafitových elektrod.

### 2.1. Formy pro vstřikovací lisy

Forma pro vstřikovací lis je nástroj, který se používá pro výrobu plastových dílů (např. termoplasty a reaktoplasty). Příklad formy se nachází na obrázku č. 1.

Vstřikovací nástroje jsou pro každý díl originální, tudíž jejich pořizovací náklady jsou poměrně vysoké. Vysoké pořizovací náklady jsou kompenzovány velkou sériovostí výrobního procesu. Při velké sériové výrobě jsou vytvářeny díly s velkou rozměrovou a geometrickou přesností. Dále jsou vstřikovací formy schopny na jeden cyklus vytvořit konečný výrobek při různých tvarových složitostech. [1]

Nejvíce se zmíněný způsob výroby plastových dílců využívá v automobilovém průmyslu, ale své uplatnění našel i ve zdravotnictví, zbrojním průmyslu i spotřebním průmyslu.

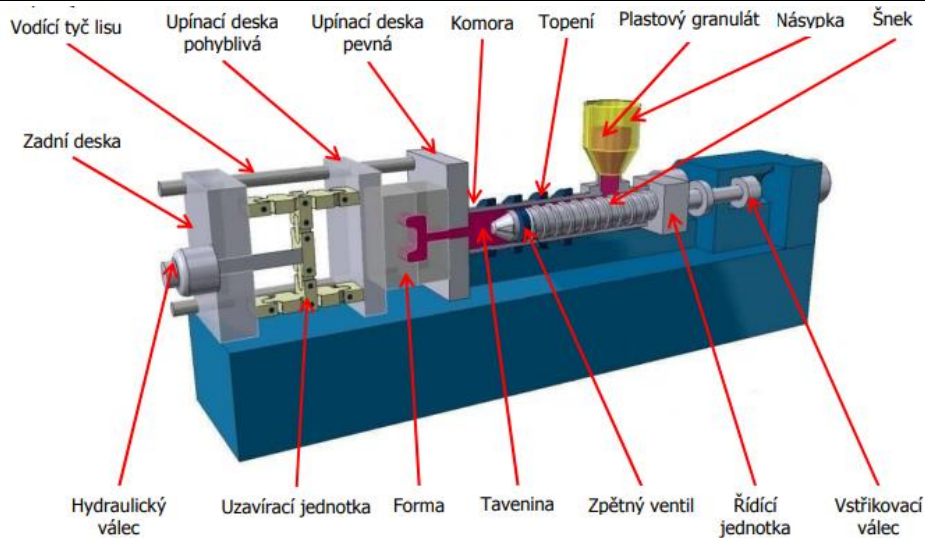


Obrázek 1: Forma pro vstřikovací lis [1]

#### 2.1.1. Popis a typy lisů

Vstřikovací lis je mechanický tvářecí stroj, pomocí kterého se vyrábí plastové díly. Jako tvářecí nástroj používá lis formu, která je na stroj upnuta obsluhou.

Stručný popis vstřikovacího lisu můžeme vidět na obrázku č. 2.



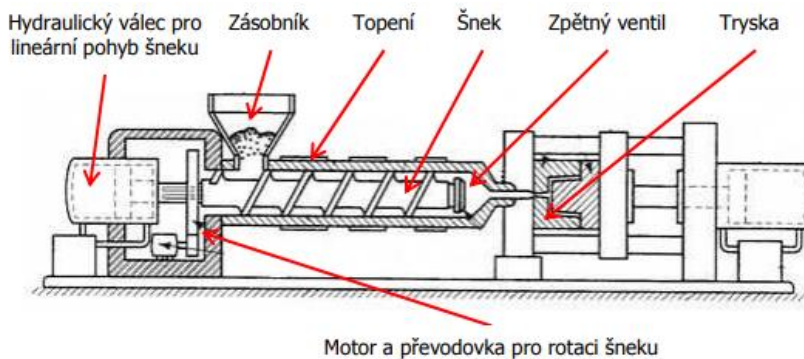
Obrázek 2: Popis vstřikovacího lisu [2]

Lisy se rozdělují dle principu jejich pohonu na:

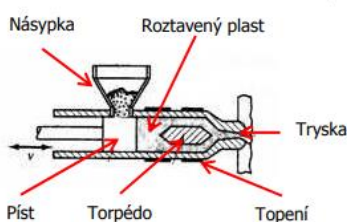
- hydraulické → ovládání je zajištěné pomocí hydraulického agregátu,
- mechanické → lis je řízen pomocí mechanický převodů,
- elektrické → řízení je prováděno pomocí elektromotorů,
- hybridní → nejvíce se používá kombinace elektrického a hydraulického řízení.

Dále se lisy dělí dle způsobu dopravení roztaveného materiálu do formy na:

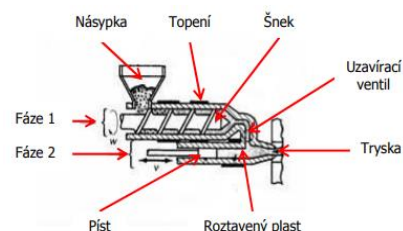
- pístové → dopravení zajišťuje píst (obr. č. 4),
- šnekové → taveninu přepravuje šnekový dopravník (obr. č. 3),
- kombinované → spojení první a druhé varianty (obr. č. 5).



Obrázek 3: Doprava taveniny pomocí šneku [2]



Obrázek 4: Doprava taveniny pomocí pístu [2]



Obrázek 5: Kombinovaná forma [2]

Dalším parametrem, podle kterého můžeme dělit lisovací stroje, je umístění formy:

- horizontální lis (obr. č. 6),
- vertikální lis (obr. č. 7).



Obrázek 6: Horizontální lis [2]



Obrázek 7: Vertikální lis [2]

Podle počtu šnekových dopravníků:

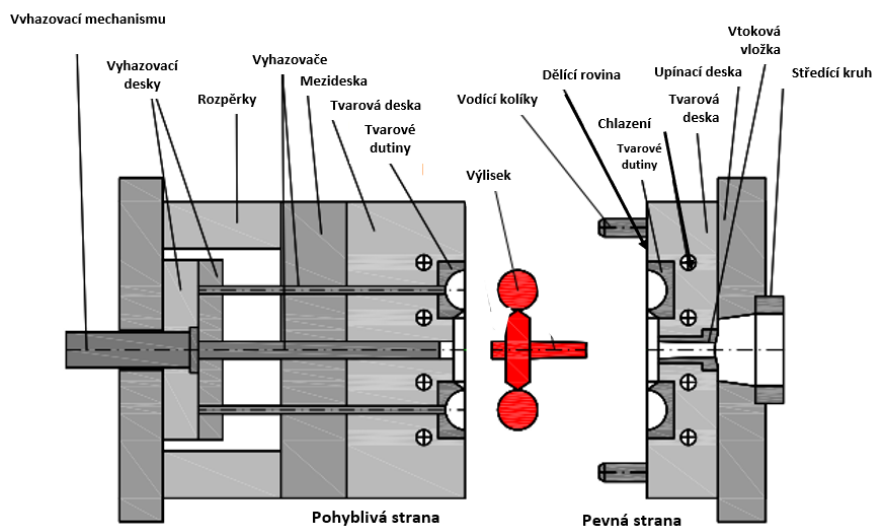
- jednošnekové,
- dvoušnekové,
- vícešnekové.

Dle polohy vstřikovacího kanálu, kdy se vtříkuje:

- kolmo na dělicí rovinu (nejčastěji používaný způsob),
- do dělicí roviny.

### 2.1.2. Konstrukce forem pro vstřikovací lisy

Formy pro vstřikovací lisy se skládají ze dvou hlavních částí, z nichž jedna je pevná a druhá pohyblivá strana, viz na obrázku č. 8, kde je vidět, že je forma konstruována jako stavebnice, kde na sebe dosedají jednotlivé desky, které mají svůj specifický účel. [3]



Obrázek 8: Popis formy pro vstřikovací lis (přeloženo pro potřeby DP) [3]

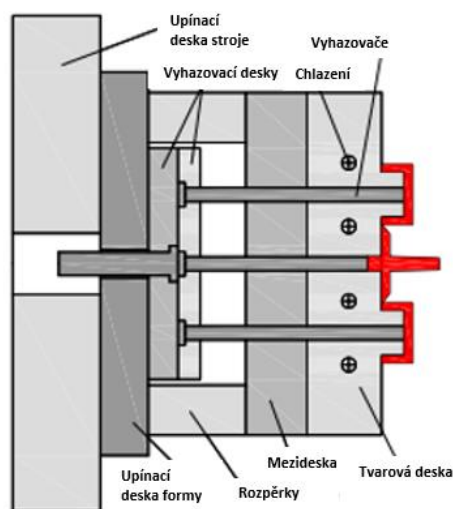
Na obrázku č. 9 se nachází pohyblivá strana. Jak už vyplývá z názvu, jedná se o část formy, která se pohybuje při lisovacím procesu. [3]

V pohyblivé části formy zůstává výlisek po odformování a je nutné ho z formy vyjmout. Tuto činnost zajistí vyhazovací deska s vyhazovači, kdy při vyjetí formy do koncové polohy (vyhazovací desky se opřou o upínací desku) začne být vysouvána vyhazovací deska s vyhazovači, a ty zajistí „vyhození“ výlisku z formy. Pro zpětné zasunutí vyhazovacích desek slouží vratné kolíky, které se následně opřou o pevnou stranu formy při zavírání. Jedná se o jeden z možných způsobů vyjmutí výlisku z formy. Ostatní metody jsou popsány v další kapitole. [3]

Jako další je zde vidět tvarová deska s vyvrtnými otvory, do kterých proudí voda. Jedná se o komplexní chladicí systém, který by měl zajistit rovnoměrné chladnutí výlisku při tuhnutí. [3]

Dále lze na této straně formy nalézt rozpěrky, které vymezují krok vyhazovacích desek. [3]

V mnoha případech se na formě ještě nachází izolační deska, která na obrázku č. 9 není znázorněna.



*Obrázek 9: Schéma pohyblivé strany formy (přeloženo pro potřeby DP) [3]*

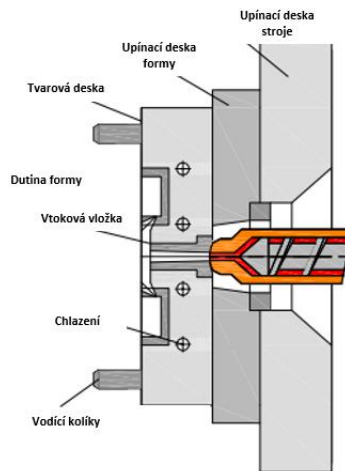
Pevná strana formy je vidět na obrázku č. 10. Pevná strana, stejně jako pohyblivá, se opět skládá z upínací desky, pomocí které je upevněna na lisovací stroj. [3]

Opět je zde k nalezení tvarová deska, do které jsou vkládány tvarové vložky. Ty při lisování tvoří finální tvar výlisku. Tvarová deska s tvarovými vložkami mají svůj vrtný chladicí systém, který zajišťuje rovnoměrné chladnutí výlisku. Chladicí systém je oddělen od pohyblivé části (každá polovina má svůj vlastní). [3]

Na této straně formy se nachází vtoková soustava. Vtoková soustava může být se studeným, či horkým vtokem. Druhy vtokových soustav jsou popsány níže v oddělené kapitole. [3]



Zpravidla se zde také nachází izolační deska, která zabraňuje přestupu tepla z formy do lisovací jednotky. [3]



Obrázek 10: Schéma pevné části formy (přeloženo pro potřeby DP) [3]

#### 2.1.2.1. Vyhazovací systémy

Jak už bylo zmíněno výše, vyhazovací systém zajišťuje vyjmutí vylisku z formy. Vyhazovací činnost může být prováděna různými způsoby, ať už mechanicky nebo pneumaticky.

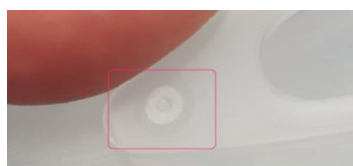
Nejrozšířenější principy jsou popsány níže. Jedná se například o vyhazovací desku s vyhazovači. [3]

#### Vyhazovače + vratné kolíky

Vyhazovací systém s vyhazovači a vratnými kolíky už byl v menším rozsahu popsán v předešlé kapitole. Princip mechanismu spočívá v tom, že je řízen pomocí jednoduchých dorazů. Zde se počítá s otevíráním a zavíráním formy. [3]

Při otevření formy pohyblivá strana dojde na doraz, a tím se vysunou vyhazovací desky, které jsou vymezeny pomocí rozpěrek a dojde k vysunutí vyhazovačů. Ty vytlačí vylisek z formy. Při zavírání vratné kolíky „narazí“ na pevnou část formy a vyhazovací desky se opět zasunou. Takto je proces kompletní a jenom se dále opakuje. [3]

Jedná se o poměrně levný, jednoduchý a spolehlivý systém. Musí se však počítat s odlišnými teplotami formy při lisování v jejich různých částech. Dále se musí počítat s tím, že i když jsou vyhazovací desky s vyhazovači v klidové poloze, tak i přes veškerou snahu tomuto jevu zamezit, nalezneme na vylisku stopy po vyhazovačích, viz obrázek č. 11. [3]



Obrázek 11: Stopa po vyhazovači [5]

Mechanismus může být ovládán pomocí hydrauliky. Nemusí se jednat o mechanismus užívající dorazů. I při tomto způsobu je však forma vybavena vratnými kolíky, které slouží jako pojistka pro případ, že by vyhazovací systém nezafungoval správně, a mohlo by tak dojít ke kolizi s pevnou stranou. [8, 3]



*Obrázek 12: Pohled na vyhazovače a vratné kolíky [4]*



*Obrázek 13: Detail vyhazovače [6]*

### **Pohyblivá jádra**

Pomocí pohyblivých jader je možné odformovat tvary, které by pomocí vyhazovačů nebylo možné vyhotovit. Jedná se například o průchozí otvory, které by běžný vyhazovač, který není pevně vedený, nebyl schopen vytvořit. [3]

Pohyblivé jádro toho schopno je, jelikož je přesně vyrobeno a dosedá na zavírací plochu tvarové vložky. [3]



*Obrázek 14: Ukázka pohyblivého jádra [autor]*

**Další možné způsoby odformování [3]:**

- pomocí stlačeného vzduchu,
- pomocí trubkového vyhazovače (obr. č. 15),
- pomocí různých manipulátorů (PET lahve),
- kombinace předchozích způsobů.



*Obrázek 15: Detail trubkového vyhazovače [9]*

**2.1.2.2. Vtoková soustava**

Vtoková soustava zajišťuje tok roztaveného materiálu do formy. Ve své podstatě se rozlišují dva typy vtokových soustav.

Prvním je studený vtok, kde je plast dopravován do formy pomocí vtokových kanálků.

Druhým typem je horký vtok, kde je ve vtokové rozváděcí desce několik vtokových trysek, které jsou napojené přímo na tvarovou část.

**Studený vtok**

Princip studeného vtoku spočívá v tom, že je tavenina vstřikována tryskou lisu do vtokového systému. Jelikož vtok není vyhříváný, tak plast na krajích vtokového kanálu tuhne, a tudíž musí být vtokový systém odstupňován do rozváděcích kanálků (jedná se podobný princip jako u slévání). [10]

Po vyplnění tvaru následuje dotlak. Ten zajistí doplnění taveniny, která nahrazuje ztrátu objemu. Ztráta je způsobena objemovým smrštěním a je nutné ji tímto způsobem vykompenzovat. [10]

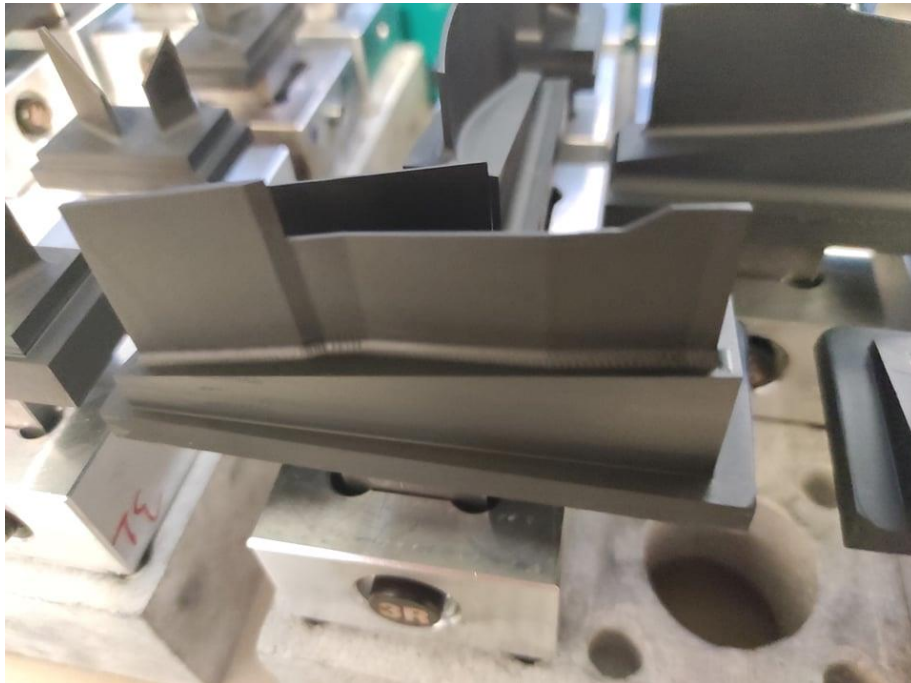
## **Horký vtok**

Jedná se o sestavu vtokového systému, ve které je plast vstřikován do formy při udržované teplotě. Stálá teplota zaručí, že se viskozita polymeru nemění v žádné části vtokové soustavy, a je tudíž stejná až do místa tvarové části formy. [11]

### **2.1.3. Problémy při výrobě a příspěvek EDM**

Výrobky vyráběné pomocí vstřikovacích forem jsou ve většině případech velmi tvarově složité. Také se na nich mohou vyskytovat velmi tenká žebra, která jsou pomocí konvenčních technologií prakticky nevyrobitelná nebo se na nich mohou vyskytovat různé tvarové nerovnosti, které kompenzují deformaci výlisku po ztuhnutí polymeru.

První příklad je možné vidět na dalším obrázku, kde je ukázka elektrody, která takovému úzkému žebrovi vytváří.

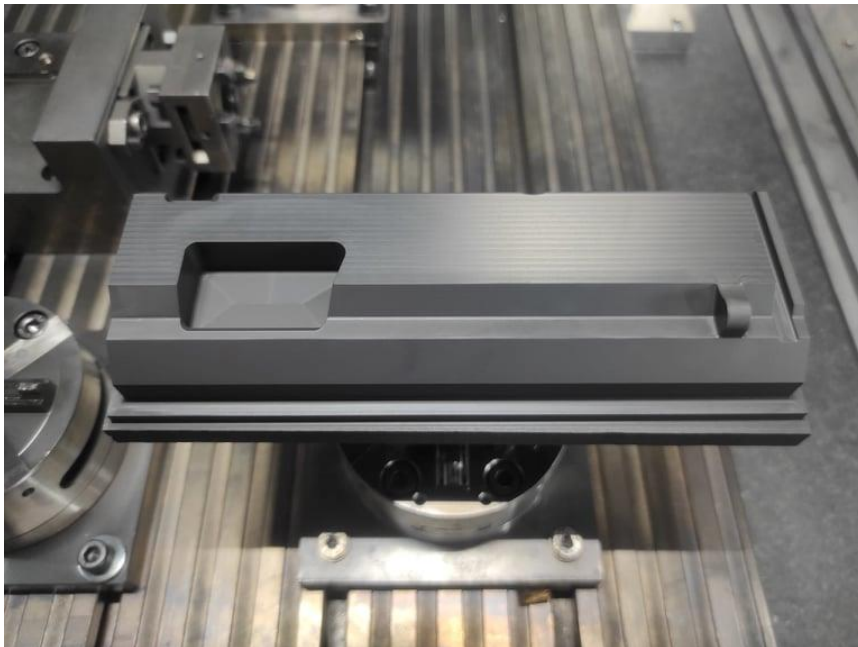


*Obrázek 16: Ukázka žebrové elektrody [autor]*

Dále je možné pomocí elektroerozivního obrábění kompletně přeskočit hrubovací i dokončovací proces na frézce a celý tvar vyrobit pomocí dvou (hrubovací a dokončovací) elektrod, které umožní výrobu i tvarově složitých součástí. Opět je možné takovouto elektrodu vidět na obrázcích, které se nachází na další straně.



Obrázek 17: Příklad tvarově složité elektrody [autor]



Obrázek 18: Příklad velké tvarové elektrody [autor]

### 3. Konvenční a nekonvenční metody obrábění

Jak už bylo popsáno v předchozí kapitole, k výrobě některých částí vstřikovacích forem je potřeba použití nekonvenčních metod obrábění. Mezi nekonvenční metody obrábění se řadí zmiňované elektroerozivní hloubení, kdy k jeho realizaci jsou potřeba grafitové, případně měděné elektrody. Elektrody se vyrábí konvenčními i nekonvenčními způsoby.

Tato část práce se v počátcích kapitoly zejména zabývá konvenčním a nekonvenčním obráběním, jejich rozdíly a používanými nástroji a materiály, kdy je více pozornosti věnováno elektroerozivnímu obrábění, konkrétně elektroerozivnímu hloubení a výrobě grafitových elektrod.

#### 3.1. Konvenční obrábění

Mezi obráběcí metody patří:

- soustružení,
- vrtání,
- vyvrtávání,
- frézování,
- broušení,
- hoblování a obrážení,
- protahování a protlačování.

V těchto případech se jedná o takzvané třískové obrábění. Jde o to, že břit nástroje vniká do obrobku a odděluje od něho malé části materiálu (třísky). [33]

Při této práci je konkrétně nejdůležitější frézování, kde se většina elektrod vyrábí pomocí této metody. Možné metody frézování, konkrétně hrubovací metody, budou popsány v následujících kapitolách. [20]

Dále je důležité vrtání, jelikož se pomocí něho vyrábí takzvané vyplachovací otvory, které u elektrod slouží pro výplach dutiny od nečistot (opálený materiál elektrody a obrobku). Pokud by vyplachovací otvory nebyly vyrobeny a docházelo by ke špatnému výplachu dutiny, mohlo by dojít k napečení nečistot na elektrodu a následnému poškození obráběného dílu. [20]



*Obrázek 19: Příklad vyplachovacích otvorů [autor]*

### 3.1.1. Frézování grafitových elektrod

Frézování grafitových elektrod přináší do obráběcího procesu několik problémů, které se u frézování kovů nevyskytují.

Frézování grafitu se vždy provádí bez použití procesních kapalin. Pokud by se kapalina použila, tak by v kombinaci s odpadním materiálem (části grafitu uvolněné při frézování) bylo vytvořeno velmi silné abrazivum, které by mohlo poškodit vedení stroje nebo samotného vřetena. [34]

Jako dalším rozdílem, a také problémem, mezi frézováním kovu a grafitu je to, že v případě grafitu se jedná o křehký materiál. To má za následek, že při frézování může dojít k vylamování grafitu, pokud nemáme dostatečně ostrý nástroj a vhodné řezné podmínky. [22, 30, 34]

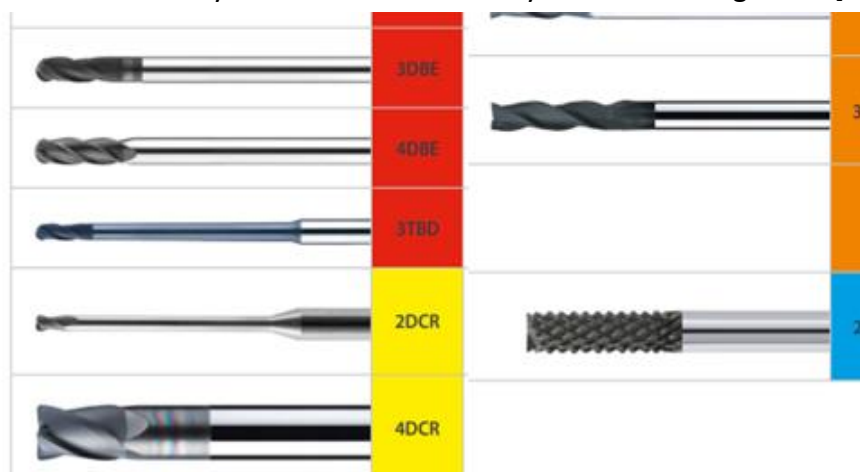


Obrázek 20: Detail vyštípnuté elektrody-1  
[autor]



Obrázek 21: Detail vyštípnuté elektrody-2  
[autor]

Grafit je sice křehký, ale je zároveň tvrdý a může se vyštípnout při špatných řezných podmínkách a při opotřebovaném nástroji. Proto by se měly používat nástroje povlakované diamantem. Diamantový povlak zaručí dlouhou trvanlivost fréz a díky němu nástroj vydrží déle naostřený a nebude docházet k vylamování částí grafitu. [22, 23, 30]



Obrázek 22: Typy povlakovaných fréz [12]

Na obrázku č. 23 jsou vidět konkrétní typy fréz, které vyrábí firma PM-Tech. Jedná se o frézy s tvrdokovovým jádrem, které je následně povlakováno diamantem. [12]



Obrázek 23: Ukázka fréz používaných k frézování grafitu [autor]

Největším problémem při obráběcím procesu je odsávání odpadního materiálu (částic grafitu). Ve stroji musí být zajištěno tak dobré odsávání, aby se grafit nehromadil ve frézovaných kapsách. Zde by mohl způsobovat problémy při obráběcím procesu. Dále je nutné kvalitní odsávání z hlediska zdravotní bezpečnosti, kdy vyfrézovaná elektroda musí být před vyjmutím ze stroje očištěna, aby se částičky grafitu zbytečně nedostávaly do ovzduší mimo stroj a neohrožovaly zdraví obsluhy. [23, 30]

### 3.2. Nekonenční obrábění

Pojem „*nekonvenční metody obrábění*“ zahrnuje metody, u kterých se nevyskytuje standardní nástroj (fréza, soustružnický nůž atd.), ale využívá se tepelných, chemických nebo abrazivních pochodů. Mohou se také používat jejich kombinace. [14]

#### Charakteristické prvky nekonvenčních metod obrábění:

- obráběcí rychlost a výkonnost procesu nezávisí na vlastnostech materiálu obráběného dílu,
- pevnost nástroje nemusí být stejná nebo vyšší jako pevnost materiálu součásti,
- možnost výroby složitých tvarů (viz vstřikovací formy),
- současně s obráběcím procesem může docházet ke změnám vlastností povrchové vrstvy.

#### Rozdělení nekonvenčních metod obrábění:

- **Použití tepelných účinků pro obrábění**
  - Elektroerozivní metody obrábění (Elektro Discharge Machining – EDM),
  - obrábění plazmou (Plasma Beam Machining – PBM),
  - obrábění laserem (Laser Beam Machining – LBM).



- **Použití elektrochemických nebo chemických procesů:**
  - elektrochemické obrábění (Elektro Chemical Machining – ECM),
  - chemické obrábění (Chemical Machining – CM, CHM).
  
- **Použití mechanických účinků:**
  - ultrazvukové obrábění (Ultrasonic Machining – USM),
  - obrábění paprskem vody (Water Jet Machining – WJM).

Práce se konkrétně zabývá elektroerozivním obráběním, konkrétně EDM hloubením, ale je zde popsáno i elektroerozivní řezání.



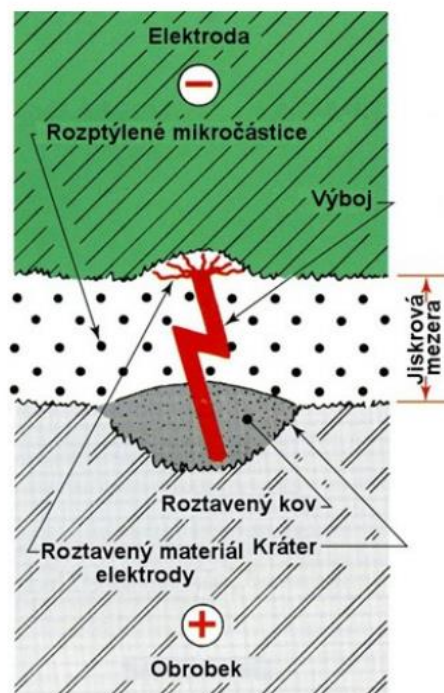
Obrázek 24: příklad EDM hloubení [15]



Obrázek 25: Příklad EDM řezání [16]

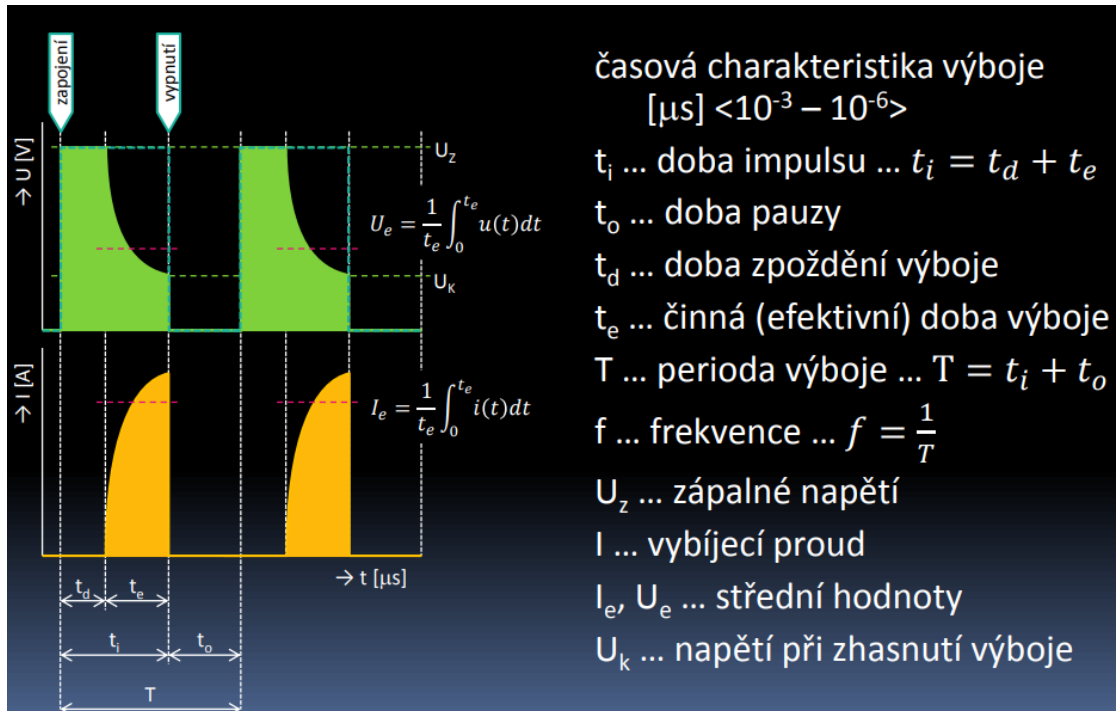
### 3.2.1. Elektroerozivní obrábění – hloubení

Princip elektroerozivního obrábění, konkrétně hloubení, spočívá v tom, že pomocí periodicky se opakujících elektrických výbojů odebíráme tavením malé částičky materiálu, které jsou následně vyplachovány dielektrikem. Odebírání materiálu je zajištěno tepelným a tlakovým působením elektrických výbojů. [13, 16, 17, 18]

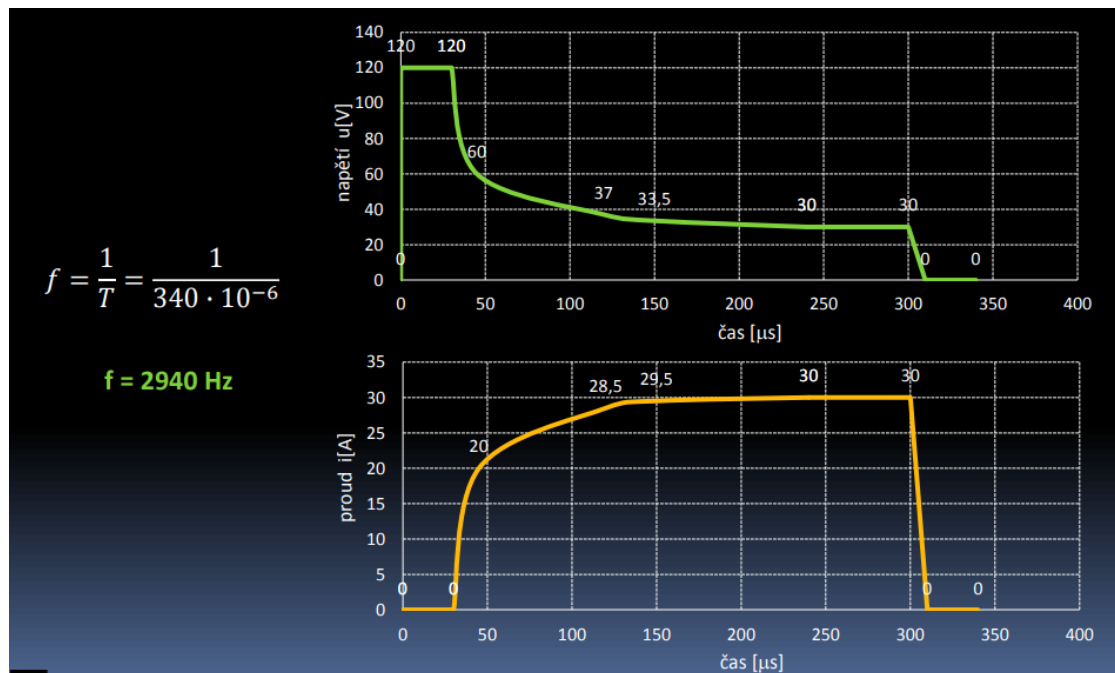


Obrázek 26: Schéma EDM hloubení [14]

Na obrázku č. 27 je vidět, jaké parametry ovlivňují průběh a dávky výboje při EDM hloubení a na obrázku č. 28 je vidět reálný průběh výboje při hloubení. [18]



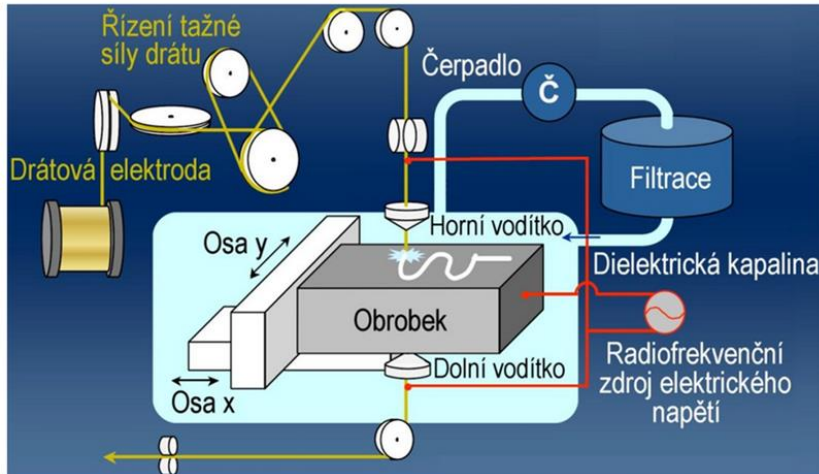
Obrázek 27: Parametry výboje [18]



Obrázek 28: Reálný průběh výboje [18]

### 3.2.1.1. Elektroerozivní obrábění– drátové řezání

Opět se jako v případě elektroerozivního hloubení jedná o elektrotepelný proces. V tomto případě je pro elektrodu použit měděný drát, pomocí kterého je prováděno řezání obrobku (viz schéma). Obrobek a měděný drát (elektroda) jsou stejně jako při hloubení ponořeny v dielektriku, které zajišťuje vedení elektrického proudu a vyplachování odtaveného materiálu. [17, 18, 19]

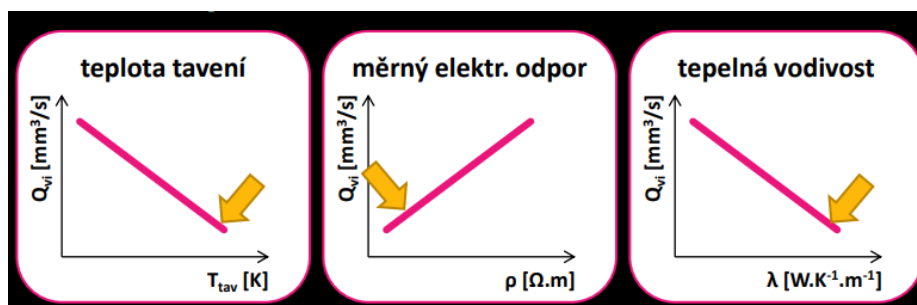


Obrázek 29: Schéma drátového řezání [19]

### 3.2.1.2. Materiály elektrod

Pro elektroerozivní hloubení se používají pro elektrody různé materiály. U těchto materiálů záleží na několika parametrech, podle kterých lze posoudit jejich použití. Konkrétně jde o tyto parametry:

- **Z hlediska minimálního opotřebení:**
  - vysoká teplota tavení,
  - nízký měrný elektrický odpor,
  - vysoká tepelná vodivost.
- **Z hlediska provozních vlastností**
  - malá hmotnost elektrody (hustota materiálu),
  - dobrá pevnost materiálu,
  - dobrá obrobitelnost materiálu elektrody,
  - cena materiálu.



Obrázek 30: Závislost jednotlivých parametrů na objemovém výkonu [18]

Mezi nepoužívanější materiály elektrod se řadí tyto tři:

- **Grafit:**
  - používá se nejčastěji z těchto tří materiálů,
  - při hrubování se opal elektrody pohybuje kolem (5–10) %,
  - jelikož je relativně lehký, tak se dá využít i pro objemnější elektrody,
  - ze všech tří materiálů je nejlépe obrobitelný třískovým obráběním.
- **Měď:**
  - využívá se pro přesné práce,
  - používá se pro obrábění karbidů,
  - drsnost povrchu po obrábění může být menší než  $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ ,
  - má větší tepelnou roztažnost než grafit → dilatace elektrod,
  - je hůře obrobitelná než grafit.
- **Wolfram:**
  - pro obrábění slinutých karbidů a výrobu malých děr (menší než 1 mm),
  - vysoká cena,
  - špatná obrobitelnost.

Tab. 1: Fyzikální parametry jednotlivých materiálů [20]

| Materiál | Hustota<br>[ $\frac{g}{cm^3}$ ] | Tvrdość [HV] | Tep. Vodivost<br>[ $W \cdot k^{-1} \cdot m^{-1}$ ] | El. Odpor<br>[ $\mu\Omega \cdot m$ ] | Tep. Tavení<br>[°C] | Cena [ $\frac{Kč}{dm^3}$ ] |
|----------|---------------------------------|--------------|--|--------------------------------------|---------------------|----------------------------|
| Grafit   | 1,6–2,1                         | 80–150       | 55–100   | 2–20                                 | 3 200               | 1 000–5000                 |
| Měď      | 8,96                            | 370          | 386  | 0,00168                              | 1 085               | 3 000                      |
| Wolfram  | 19,25                           | 3 430        | 173  | 0,0528                               | 3 422               | 19 000                     |

Dále se v praxi používají různé kombinace výše zmíněných materiálů. Jde například o kombinaci grafitu s mědí nebo grafitu s wolframem. Polotovary pro elektrody se vyrábí práškovou metodou. [20]

### 3.2.2. Požadavky kladené na hrubovací frézování

Jak už bylo naznačeno u problémů při frézování grafitových elektrod, tak i přímo pro hrubovací frézování, existují omezující parametry. Mezi hlavní parametry z obecného hlediska lze zařadit co nejvíce jednotný přídavek na dokončení, jelikož nejenom při hrubování, ale i při dokončování může díky velkému přídavku na dokončení dojít k odštípnutí kusu grafitu a znehodnocení polotovaru.

Mezi omezující parametry vycházející pro tuto práci lze zařadit i maximální řeznou sílu při obrábění. Omezující parametr vychází z typu upínání grafitových elektrod do stroje. Postup upínání je popsán v následující kapitole s názvem „Analýza současného stavu“.

## 4. SW pro tvorbu elektrod – rozdíly mezi CAD+CAM a CAD/CAM

Aby byla jakákoliv elektroda správně vyrobena, je nutné mít i dobře vytvořený model této elektrody a správně navržený obráběcí program. Proto je potřeba vybrat nejvíce vhodný SW pro tyto účely.

Následující část je věnována konkrétním softwarům, pomocí kterých se pro grafitové elektrody připravují modely a obráběcí programy. Porovnává jejich výhody a nevýhody, a také popisuje speciální SW pro vytváření těchto elektrod.

### 4.1. Používané softwary pro výrobu elektrod

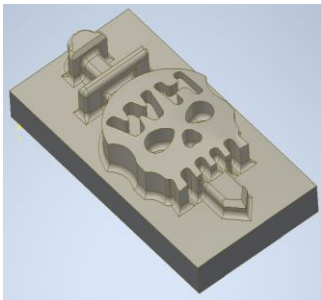
Pro modelování a výrobu elektrod se používají různé softwary. Může se jednat o SW, které se normálně používají při modelování a výrobě kovových součástí, kdy SW dělíme na CAD + CAM a CAD/CAM programy.

Dále existují speciální programy, které jsou přímo uzpůsobeny na výrobu elektrod. Jedná se například o program „Autodesk PowerShape“ nebo přídatný modul do SW Siemens NX.

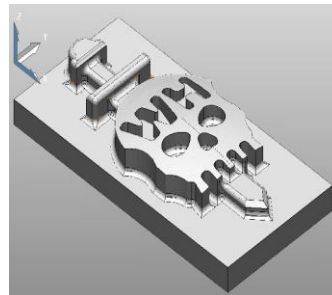
#### 4.1.1. CAD + CAM

Do CAD + CAM se řadí SW, které neumožňují pracovat samostatně v závislosti na modelování a následném vytváření programu pro CNC obrábění. To znamená, že v jednom programu musíme vytvořit model obráběného dílu a v druhém musíme vytvořit program pro obrábění součásti. [21]

Jako příklad lze použít programy od firmy „Autodesk“. Jako modelovací program je použit „Autodesk Inventor“, ve kterém je vytvořen model obráběného dílu. Ten je následně nahrán do programu „Autodesk PowerMill“, v němž jsou vytvořeny potřebné dráhy nástroje pro obrábění. [21]



Obrázek 31: Model dílu v Inventoru z předmětu POCS [autor]



Obrázek 32: Model dílu v PowerMillu z předmětu POCS [autor]

#### Výhody CAD + CAM:

- menší náklady na pořízení.

#### Nevýhody CAD + CAM:

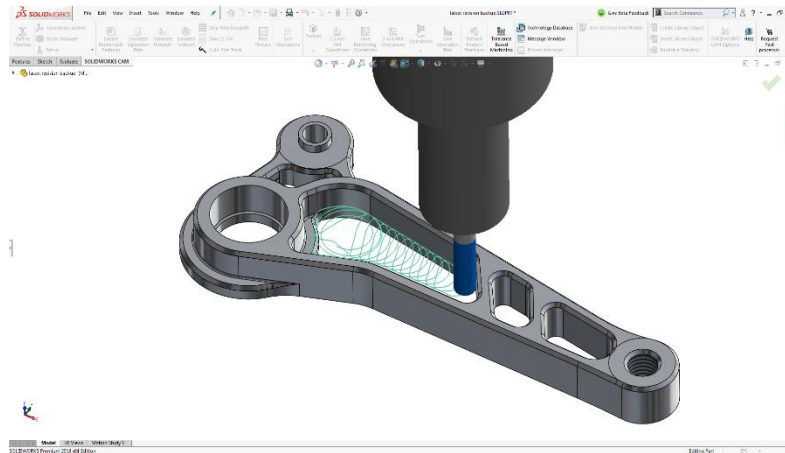
- nutnost importování modelu při jeho jakékoliv změně,
- potřeba znovu vytvořit dráhy,
- potřeba znovu vytvořit hranice pro obrábění.

#### 4.1.2. CAD/CAM

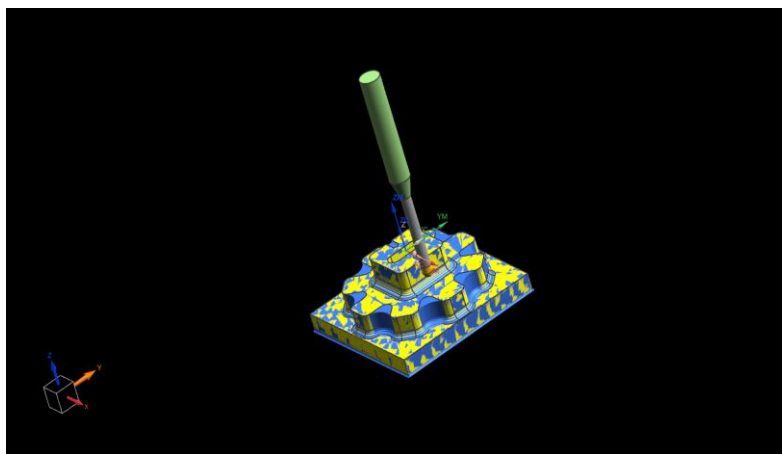
CAD/CAM je zkombinování dvou programů do jednoho. Jedná se o kombinaci modelovacího softwaru a softwaru pro vytváření řezných drah pro CNC stroje. [21]

Mezi zástupce SW kombinací lze zařadit například „Siemens NX“, kdy se jedná o velmi pokročilý program s různými rozšiřujícími moduly. Jeden z těchto modulů je popsán níže jako specifický software pro tvorbu elektrod. [21]

Další je například „Solidworks CAM“, který opět kombinuje výhody spojení CAD a CAM programů. [21]



Obrázek 33: Ukázka Solidworks CAM [24]



Obrázek 34: Ukázka Siemens NX [autor]

#### **Výhody CAD/CAM:**

- odpadá nutnost importu modelu,
- dráhy lze po změně modelu vygenerovat bez větších problémů (nutnost vybrat změněné plochy),
- úprava je možná přímo v SW bez opětovného importování modelu. [21]

#### **Nevýhody CAD/CAM:**

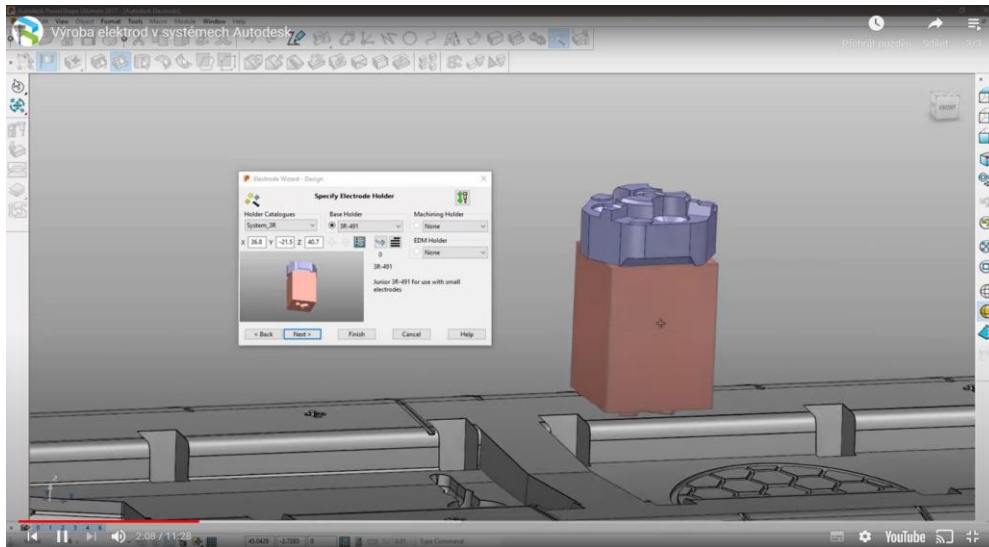
- větší pořizovací náklady,
- v případě CAD/CAM SW je potřeba více proškolení obsluhu programu. [21]

#### 4.1.3. Speciální software

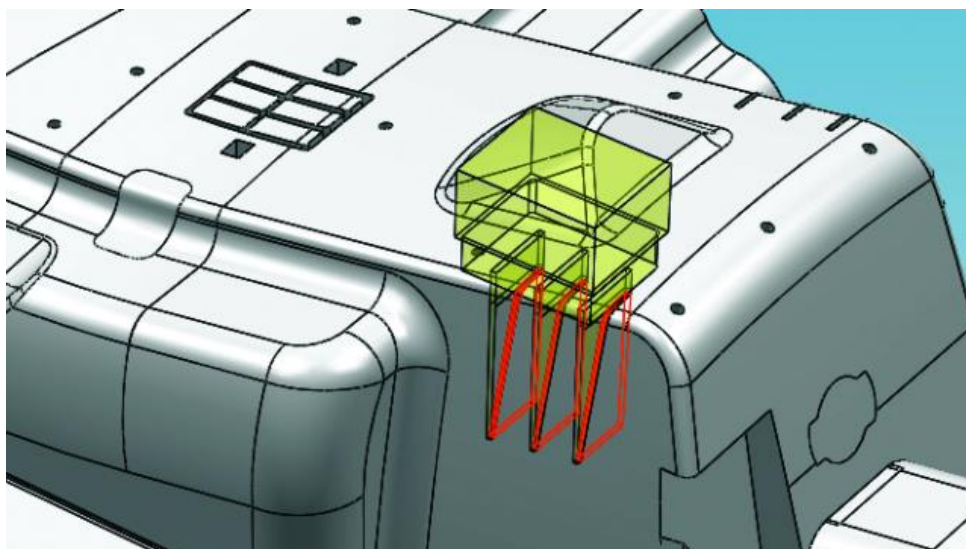
Jako další jsou dostupné programy přímo uzpůsobené pro výrobu elektrod. Mezi programy lze zařadit například „Autodesk PowerShape“.

Pro tvorbu modelu elektrody se v *PowerShapu* používá průvodce, který uživateli pomůže bez větších problémů vytvořit model elektrody. Pokud nastanou při tvorbě v průvodci problémy, tak do modelu může uživatel zasáhnout ručně. [25]

*PowerShape* je také schopný vytvořit všechny potřebné prvky pro výrobu elektrody (výkres modelu elektrody, najížděcí návodku pro hloubící centrum). Po vytvoření souboru je uživatel schopen ho nahrát do programu *PowerMill*, který by měl automaticky vytvořit NC dráhy nástroje. [25]



Obrázek 35: Ukázka programu Powershape [25]



Obrázek 36: Ukázka modulu pro Siemens NX [26]

## 5. Analýza současného stavu

Pro rychlou a přesnou výrobu elektrod je potřeba výkonný a tuhý stroj, který dokáže grafitové elektrody vyrobít. Proto byla provedena celková analýza stavu procesu přípravy elektrod a obráběcího stroje používaného k jejich výrobě.

Tato kapitola diplomové práce pojednává o samotné analýze stavu, který je teď zaveden ve firmě „Bronas s.r.o.“ a jeho nedostatcích.

Ze začátku je analýza zaměřena na přípravu modelu v programu Siemens NX a na tvorbu grafitového polotovaru pro frézování a jeho upnutí do stroje, jak pomocí lepidla, tak i pomocí šroubů.

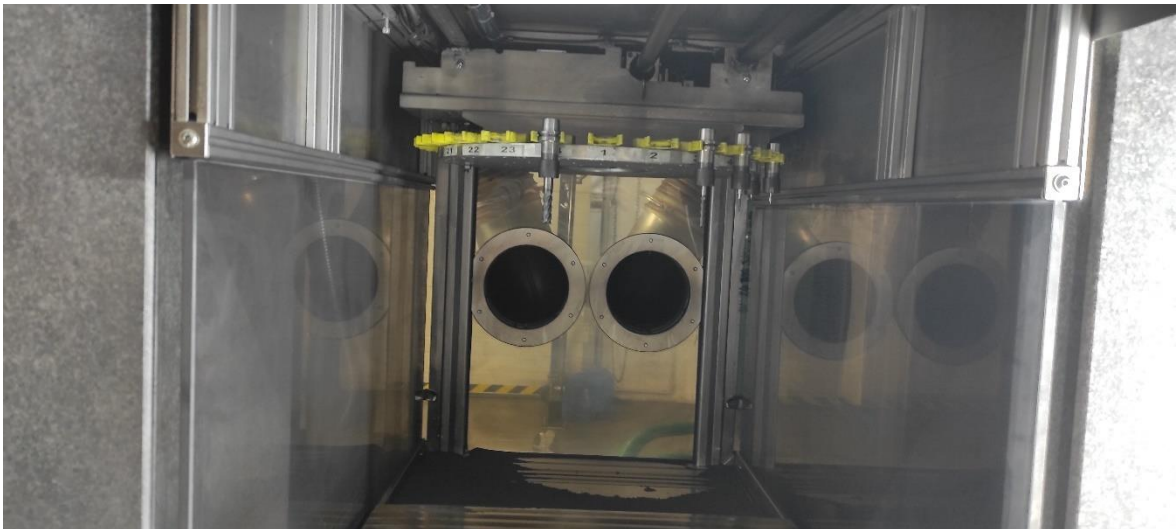
Dále je zde provedeno vyhodnocení možných chyb při frézování, které vznikají vinou stroje, kdy se například jedná o zahřívání vřetene a neschopnost stroje tyto změny kompenzovat, nebo také problémy s pohony stroje, kdy frézka není schopna uřídit některé z pohybů nástroje.

Vyhodnocení je provedeno na předem vytvořeném modelu („hvězdičce“). Zkušební díl byl následně vyfrézován a pomocí něho byly chyby zjištěny.

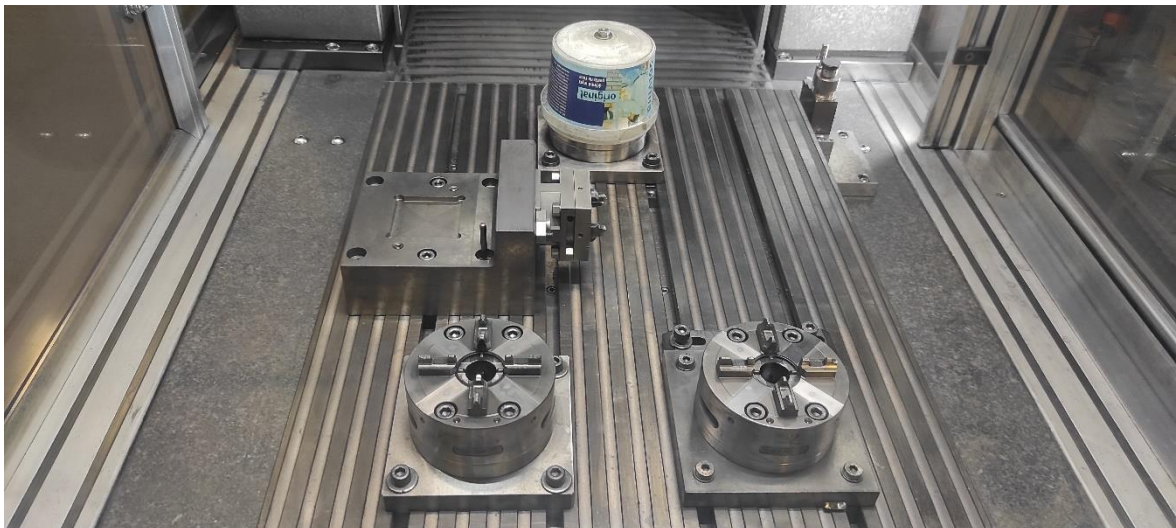


*Obrázek 37: Frézka NCG Mind 560 [autor]*





*Obrázek 38: Detail zásobníku na nástroje [autor]*



*Obrázek 39: Pracovní prostor frézky [autor]*

*Tab. 2: Technické parametry frézky [27]*

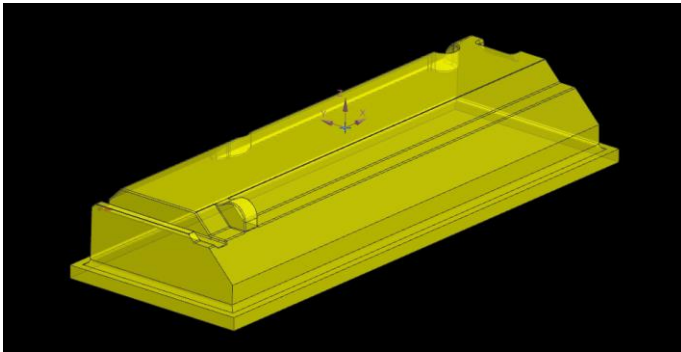
| Rozměry stroje<br>[mm]         | Pracovní<br>prostor x-y-z<br>[mm] | Max. rychlost<br>$\left[\frac{m}{min}\right]$ | Opakovatelnost<br>[mm]              | Výkon vřetene<br>[kW]     |
|--------------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|---------------------------|
| 1150x1700x2050                 | 500x600x200                       | 15  | 0,005                               | 2,0/3,0                   |
| Otáčky vřetene<br>$[min^{-1}]$ | Průměry<br>možných dřívků<br>[mm] | Kapacita<br>zásobníku<br>nástrojů [-]         | Nosnost<br>pojízdného<br>stolu [kg] | Operační<br>systém stroje |
| 3 000–50 000                   | 1–10                              | 8   | 250                                 | Windows 7                 |

## 5.1. Příprava modelu a polotovaru pro frézování

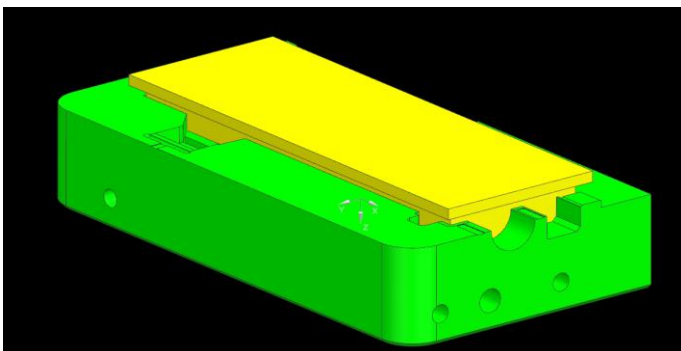
Tato kapitola popisuje proces nutný k vytvoření funkčního modelu elektrody a zároveň vysvětluje postupy prováděné při přípravě polotovaru a různé možnosti upnutí této polotovaru do frézky.

### 5.1.1. Příprava modelu elektrody

Vytváření modelu elektrody ve většině případech probíhá ve firmě BRONAS spol. s.r.o. (dále už jen Bronas) pouhým modelováním, kdy jsou buď pomocí ploch, nebo přímým odečtením součásti od připravené modelové kostky, vytvořeny tvarové plochy elektrody. Poté je nutné tvar elektrody vysunout směrem od součásti a na vysunutý tvar je napojen najížděcí rámeček elektrody. Při postupu je nutné dbát na dostatečné vysunutí, aby v lepším případě nedošlo k elektroerozivnímu obrábění nechtěných ploch a v horším případě naražení držáku hloubícího centra do obráběné součásti. Kolize by mohla vést k destrukci stroje.



Obrázek 40: Ukázka modelu elektrody 1 [autor]



Obrázek 42: Ukázka modelu elektrody 2 [autor]

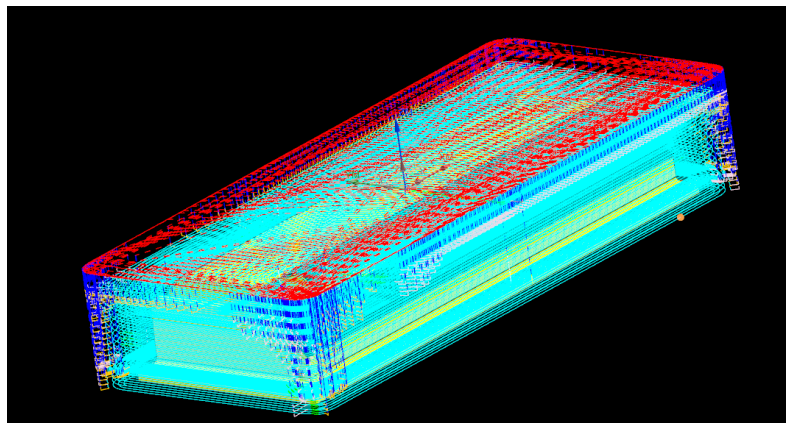
| Model History             |   |
|---------------------------|---|
| Linked Body (0) "Tvar..." | ? |
| Bounding Body (1)         | ✓ |
| Trim Body (2)             | ✓ |
| Trim Body (3)             | ✓ |
| Trim Body (4)             | ✓ |
| Trim Body (5)             | ✓ |
| Trim Body (6)             | ✓ |
| Delete Face (7)           | ✓ |
| Delete Face (8)           | ✓ |
| Move Face (9)             | ✓ |
| Move Face (10)            | ✓ |
| Delete Face (11)          | ✓ |
| Delete Face (12)          | ✓ |
| Delete Face (13)          | ✓ |
| Delete Face (14)          | ✓ |
| Bounding Body (15)        | ✓ |
| Subtract (16)             | ✓ |
| Delete Face (17)          | ✓ |
| Delete Face (18)          | ✓ |
| Unite (19)                | ✓ |
| Delete Face (20)          | ✓ |
| Offset Region (21)        | ✓ |
| Offset Region (22)        | ✓ |
| Delete Face (23)          | ✓ |
| Sketch (24) "SKETCH_..."  | ✓ |
| Offset Region (25)        | ✓ |
| Offset Region (26)        | ✓ |
| Offset Region (27)        | ✓ |
| Offset Region (28)        | ✓ |
| Move Face (30)            | ✓ |
| Delete Face (31)          | ✓ |
| Offset Region (32)        | ✓ |
| Move Face (33)            | ✓ |
| Offset Surface (34)       | ✓ |
| Extend Sheet (35)         | ✓ |
| Extend Sheet (36)         | ✓ |
| Extend Sheet (37)         | ✓ |

Obrázek 41: Ukázka modelovací historie v programu NX [autor]

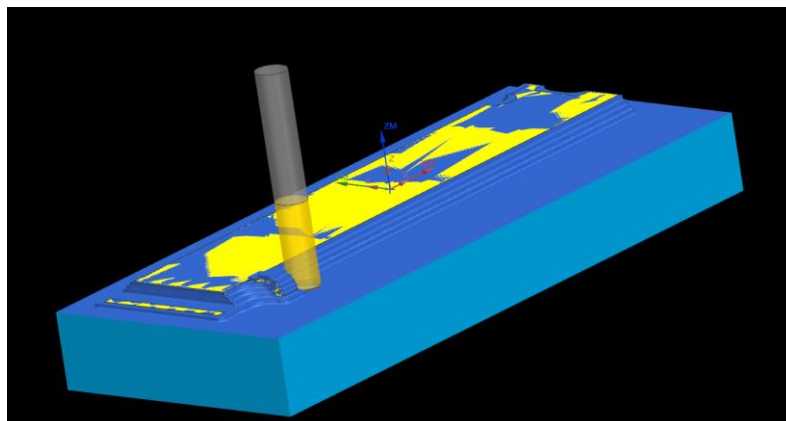
Firma disponuje i přídatným modulem pro tvorbu elektrod pro Siemens NX. Bohužel v některých případech je použití tohoto modelu značně neefektivní, a to z důvodu složitosti některých vyráběných dílů, nebo nelze použít kvůli špatné kvalitě základního modelu obráběné součásti.

**Postup při tvorbě modelu elektrody:**

1. Vytvoření nové součásti odkazující na původní.
2. „Nalinkování“ potřebných ploch nebo celé součásti (potřebné pro možnost práce se součásti).
3. Vytvoření tvarové části elektrody (použití funkce bounding body).
4. Napojení najížděcího rámečku s potřebnými přídávky.
5. Vytvoření souřadnicového systému pro obrábění, který je přesunut do středu rámečku a do výšky nejvyššího bodu elektrody.
6. Vytvoření obráběcích strategií (drah).
7. Provedení potřebných simulací a následný postprocesing.



*Obrázek 43: Dráhy nástroje [autor]*



*Obrázek 44: Simulace obrábění [autor]*

**5.1.2. Příprava polotovaru pro frézování**

Příprava polotovaru pro obrábění je rozdílná a závisí na velikosti a množství potřebných kus. Ve většině případech je nutné připravit dva kusy polotovaru, protože se vyrábí dvě skoro stejné elektrody, které se pouze neshodují v negativním přídávku (podrozměru), který se pohybuje v rozmezí -0,2 mm na stěnu u hrubovací elektrody a -0,1 mm u elektrody dokončovací (záleží na velikosti elektrody).

Pokud není potřeba připravit větší počet polotovarů, tak firma Bronas objednává velké grafitové desky (případně kvádry), které jsou nařezány na pásové pile značky „Bomar STG 230 G“.



*Obrázek 45: Pásová pila [autor]*

V některých případech je také možné použít již vyfrézovanou a použitou elektrodu, která má dostatečně velké rozměry pro vyfrézování nové tvarové části elektrody, a také s dostatečně vysokou částí pro najížděcí rámeček, který se používá při korekci polohy elektrody.



*Obrázek 46: Grafitové desky a použité elektrody [autor]*

Když je nutné vyrobit větší množství polotovarů, například z důvodu zrcadlených pozic, tak se rozměry polotovarů zadávají přímo firmě, která grafit dováží v deskách (kvádrech). Ta je schopna nařezat polotovary na požadované rozměry a s popisky je dodat do firmy.

Naopak pokud je potřeba rychle připravit malou dávku polotovarů menších rozměru, může být použita ruční pilka, viz obrázek níže.



*Obrázek 47: Ruční pilka [autor]*

### 5.1.3. Uchycení polotovaru do frézky

Při upevňování polotovaru do držáku frézky se používají ve firmě Bronas tři různé způsoby, kdy posledních z nich je asi nejméně používaný. Nejvíce jsou používány palety od značky „Erowa“, do kterých jsou vloženy speciálně vyrobené kostky.



*Obrázek 48: Paleta WT 002.100 [28]*

### 5.1.3.1. Uchycení polotovaru pomocí lepidla a speciálně připravené kostky

Způsob uchycení pomocí lepidla je asi nejvíce využívaný v případech, kdy je na speciálně připravenou kostku (frézovanou a broušenou) nalepen polotovar pomocí kyanakrylátového lepidla.

Lepení je nejrychlejší z dané nabídky upevňování polotovaru, kdy se musí počítat s tím, že lepený spoj je schopný přenést menší síly, než když by elektroda byla upnuta ve speciálním svěráku pomocí šroubů.

Z tohoto důvodu se nesmí používat velké úběry. Mohlo by totiž dojít k uvolnění polotovaru a k jeho následné destrukci.



*Obrázek 49: Ukázka upevněných elektrod [autor]*



*Obrázek 50: Kyanakrylátové lepidlo [autor]*



*Obrázek 51: Detail kostky [autor]*

Ještě před samotným frézováním je potřeba zkontrolovat, jestli vrstva lepidla není příliš velká nebo se mezi polotovar a kostku nedostaly nečistoty. Tyto aspekty by mohly způsobit špatnou vodivost elektrického proudu, který prochází skrz upínač a elektrodu, a díky tomu by nemohl proběhnout proces elektroerozivního obrábění.

Vodivost se kontroluje pomocí multimetru, který je na obrázku č. 52. Pokud by nastala situace, že by polotovar nebyl vodivý, musí se odlepit, zaleštit a znovu přilepit na upínací kostku.



*Obrázek 52: Multimetr [autor]*

### 5.1.3.2. Uchytení polotovaru pomocí šroubů

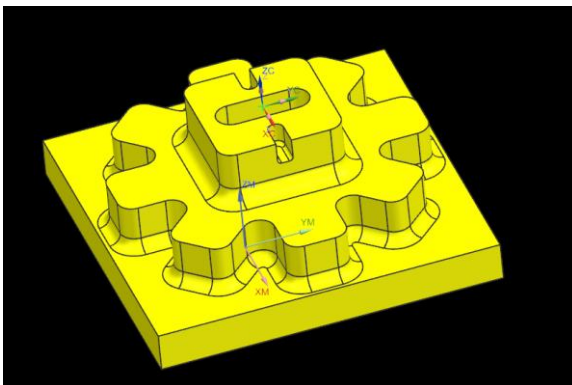
Pro elektrody větších rozměrů se používá upevnění pomocí šroubů. Polotovar se uřízne s větším přídavkem na výšku, následně jsou do jeho spodní strany vyvrtány čtyři otvory, do kterých jsou vyříznuty metrické závit.

## 5.2. Identifikace chyb při obrábění

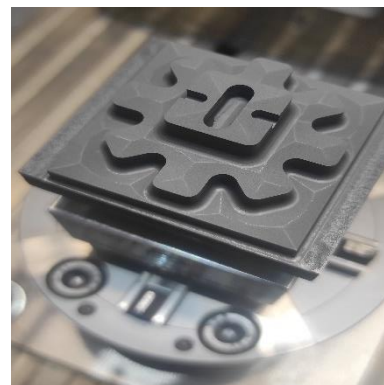
Pro přesnější obrábění a zjištění možných chyb, byl proveden jednoduchý test, který ukázal, jak na tom je přesnost obráběcího stroje.

### 5.2.1. Testovací model a jeho obrábění

Byl vytvořen testovací model „hvězdice“, který byl následně obroben stejným způsobem, jakým jsou obráběny veškeré elektrody před optimalizací. Následně byl vyfrézovaný díl porovnán s modelem pomocí souřadnicového měřicího stroje.



*Obrázek 53: Model pro zkušební frézování [autor]*



*Obrázek 54: Skutečná součást [autor]*

Samotné frézování se skládalo ze tří operací, kdy každá byla prováděna jiným nástrojem. Jako první byla zrealizována hrubovací operace, která byla provedena pomocí válcové frézy (průměr 10 mm). Dále následovaly dokončovací operace, které byly provedeny pomocí kulových fréz (průměry 3 mm a 1 mm), viz následující stránka.



Obrázek 55: Válcová 10 30.6573 [29]

Tab. 3: Rozměry V10 [29]

| $d_1$ [mm] | $R_p$ [mm] | $l_2$ [mm] | $l_3$ [mm] | $d_2$ [mm] | $d_3$ [mm] | $l_1$ [mm] | Z [-] |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|
| 10         | 0,5        | 30         | -          | 10         | -          | 75         | 4     |



Obrázek 56: Kulová 3 30.6551 [29]

Tab. 4: Rozměry K3 [29]

| $d_1$ [mm] | $l_2$ [mm] | $l_3$ [mm] | $d_2$ [mm] | $d_3$ [mm] | $l_1$ [mm] | Z [-] |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|
| 3          | 3          | 15         | 6          | 3          | 60         | 2     |



Obrázek 57: Kulová 1 30.6551 [29]

Tab. 5: Rozměry K1 [29]

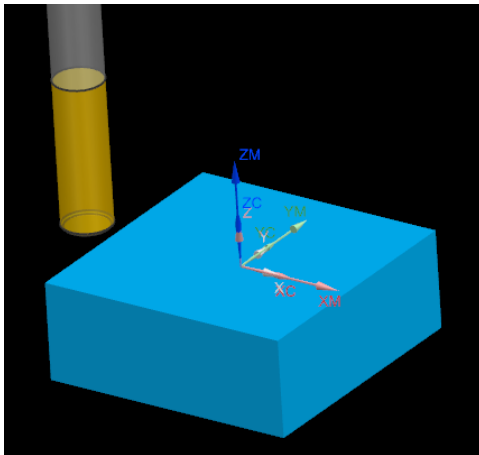
| $d_1$ [mm] | $l_2$ [mm] | $l_3$ [mm] | $d_2$ [mm] | $d_3$ [mm] | $l_1$ [mm] | Z [-] |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|
| 1          | 1          | 10         | 4          | 1          | 60         | 2     |

Pro frézování byly použity nové neopotřebené frézy. Opotřebení fréz má také velký vliv na konečný výsledek frézování.

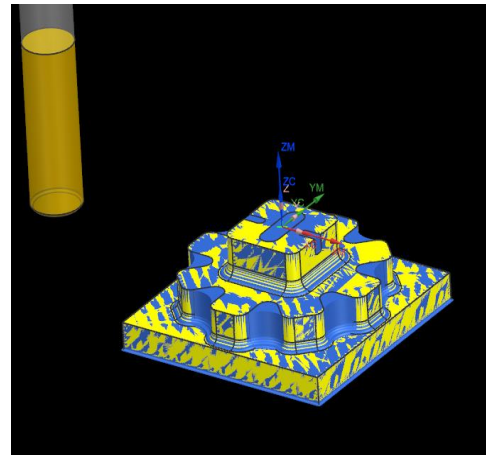
Také byl vyzkoušen vliv obrábění stejné stěny pomocí nástroje jiné velikosti. To znamená, že vrchní drážka na zkušebním dílu byla do poloviny frézována a dokončena kulovou frézou o průměru 3 mm a zbytek byl dofrézován kulovou frézou průměru 1 mm.



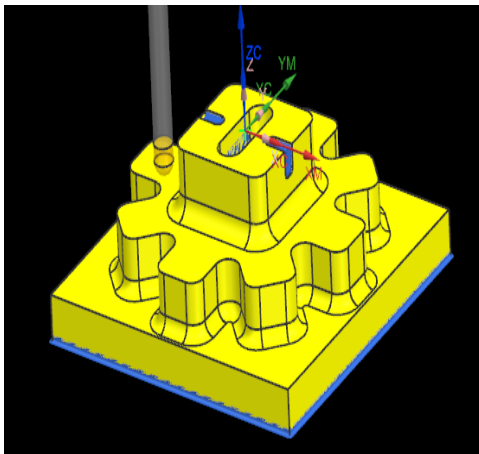
Pro vyhrubování tohoto dílu byla použita operace „Cavity mill“. Pomocí této strategie byl díl obroben na nulovou hodnotu všude, kam se válcová fréza mohla dostat, viz obrázek č. 58. Následovalo dohrubování stejnou strategií pomocí kulové frézy, která měla průměr 3 mm. Poté frézou byly dokončeny vnější plochy a stěny pomocí operace „Contour area“ a strategie „Z level profile“, viz obrázek č. 59. Jako poslední byly dokončovací operace prováděné kulovou frézou o průměru 1 mm pomocí obdobných strategií, viz obrázek č. 60.



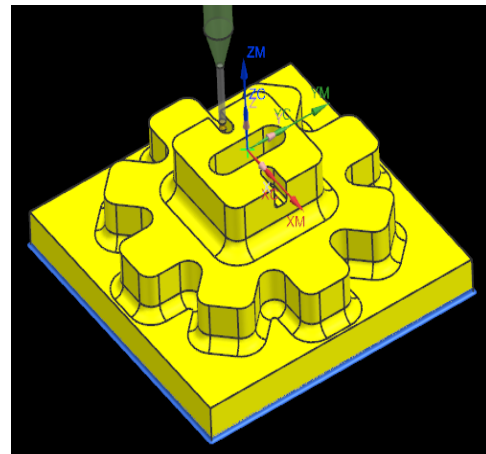
Obrázek 58: 0. fáze obrábění [autor]



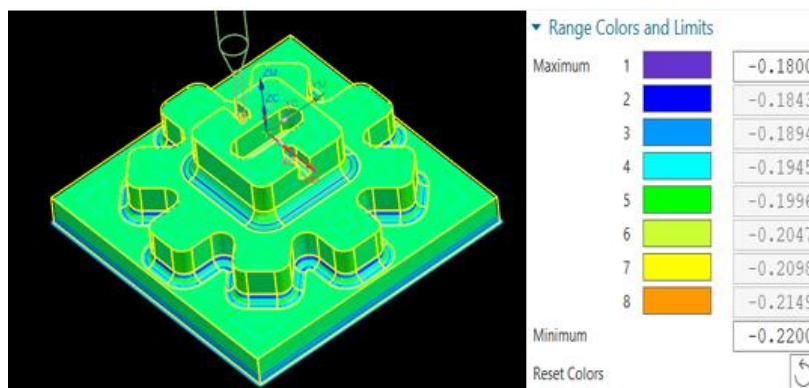
Obrázek 59: 1. fáze obrábění [autor]



Obrázek 60: 2. fáze obrábění [autor]



Obrázek 61: 3. fáze obrábění [autor]



Obrázek 62: Finální analýza [autor]

### 5.2.2. Analýza vyfrézovaného testovacího dílu

Po zhodnocení finální analýzy (obr. č. 61) lze vidět, že by díl měl být dokonale obrobený. Problém může nastat v patních rádiusech, které navazují na vnější a vnitřní plochy. Tyto rádiusy v tuto chvíli nejsou důležité a z finálního hodnocení je vyřazen jejich možný špatný rozměr.

Měření testovaného dílu bylo provedeno na souřadnicovém měřícím stroji značky „Wenzel“ pomocí dotykové snímací hlavy.

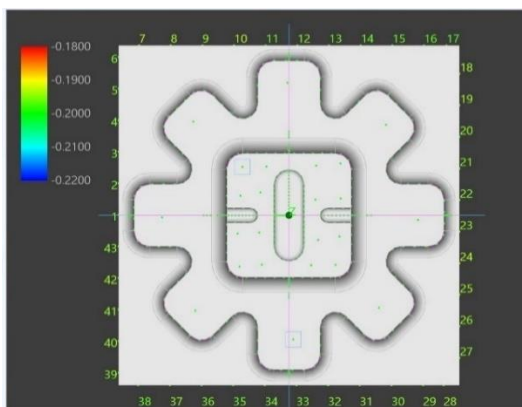
Byla provedena dvě měření, kdy první bylo zkušební a druhé mělo ověřit vliv optimalizací obrábění, která se skládala jak z úpravy tolerance výpočtu drah nástroje, tak i z úpravy parametrů samotného stroje.



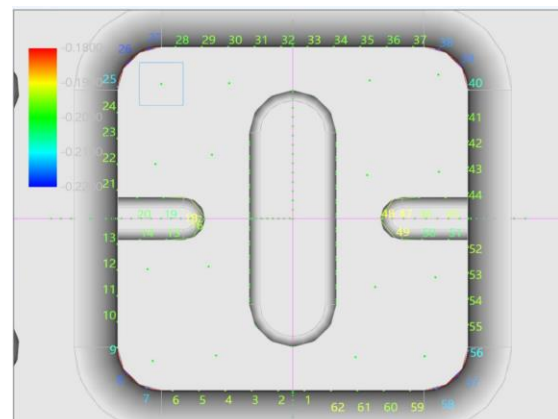
Obrázek 63: Souřadnicový měřicí stroj [autor]

#### 5.2.2.1. První měření

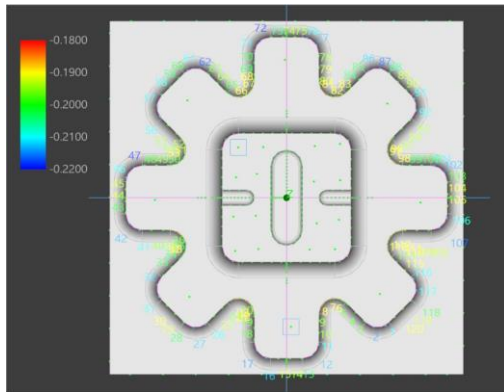
Díl byl obroben technologií a parametry, které se doposud používaly pro veškeré obrábění. Souhrn měřených rozměrů lze vidět níže.



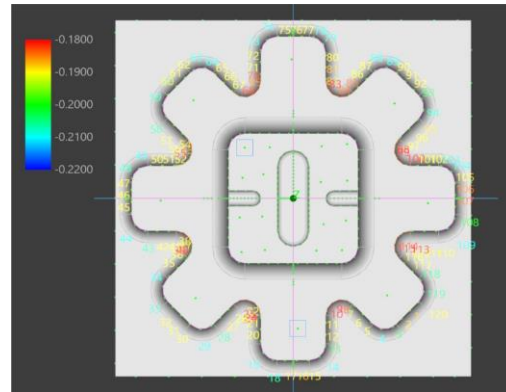
Obrázek 64: Odchylka – Rozměry rámečku [autor]



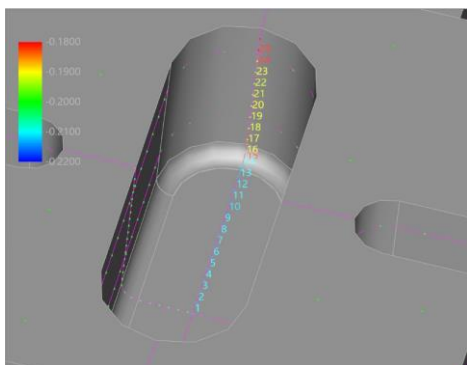
Obrázek 65: Odchylka – Horní čtverec [autor]



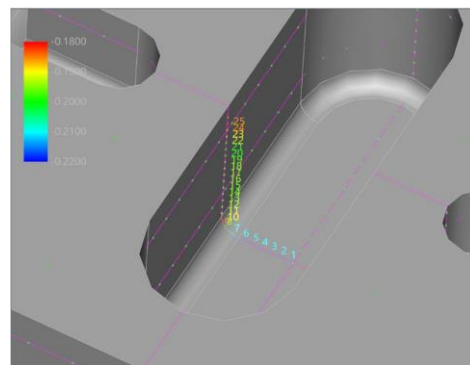
Obrázek 66: Odchylka – Obvod hvězdice (horní křivka) [autor]



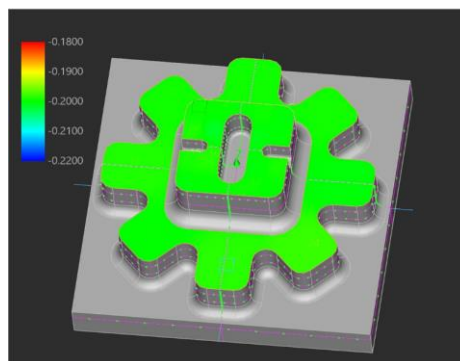
Obrázek 67: Odchylka – Obvod hvězdice (dolní křivka) [autor]



Obrázek 68: Odchylka – Vrchní drážka 1 [autor]



Obrázek 69: Odchylka – Vrchní drážka 2 [autor]



Obrázek 70: Odchylka – Rovinné plochy [autor]

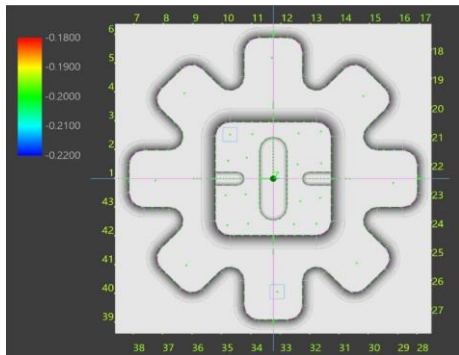
Z provedeného měření je patrné, že vnější rovné plochy frézka dokáže obrobit s vysokou přesností bez větších problémů, kdy se přesnost těchto ploch pohybuje v tisícinách mm. Stejně na tom jsou i stěny najížděcího rámečku.

Rozměry přestávají odpovídat v různých drážkách a tvarových plochách. Chyba v obrábění je nejvíce patrná u frézovaného obvodu, kdy jsou vnitřní radii stěn nedořezány a vnější podřezány. Chybová hodnota se pohybuje v rozmezí od (-0,02 - +0,02) mm.

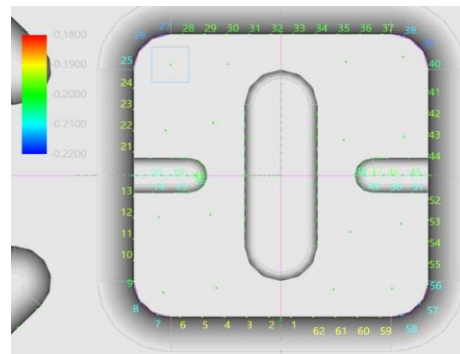
Dále nastává problém u vnitřních rovinných ploch, které jsou v některých případech podřezané o více jak 0,01 mm.

### 5.2.2.2. Druhé měření

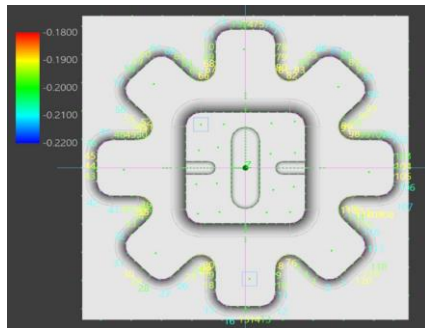
U druhého frézování byla použita menší tolerance pro výpočet drah nástroje, a také byly nahrány do stroje nové parametry přímo od výrobce.



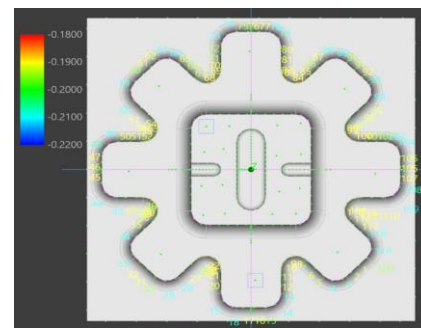
Obrázek 71: Odchylka – rozměry rámečku 2 [autor]



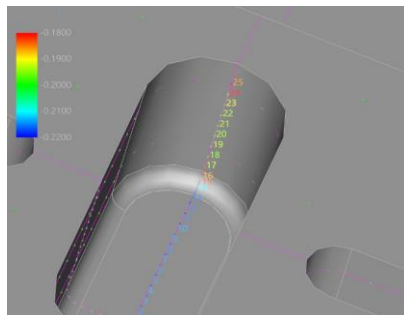
Obrázek 72: Odchylka – horní čtverec 2 [autor]



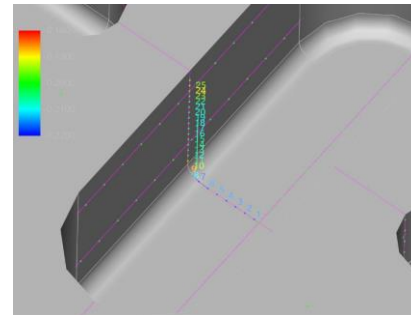
Obrázek 73: Odchylka – obvod hvězdice (horní křivka 2) [autor]



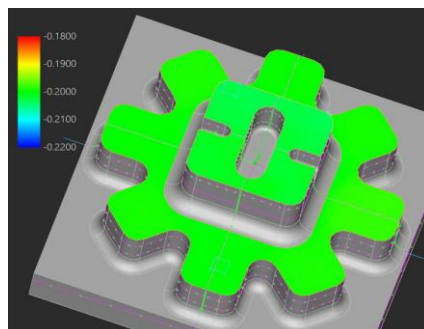
Obrázek 74: Odchylka – obvod hvězdice (dolní křivka 2) [autor]



Obrázek 75: Odchylka – vrchní drážka 1-2 [autor]



Obrázek 76: Odchylka – vrchní drážka 2-2 [autor]



Obrázek 77: Odchylka – rovinné plochy [autor]

### 5.2.2.3. Porovnání měření

Z měření můžeme zjistit, že i po úpravě parametrů a zmenšení tolerance výpočtu jsou některé plochy podřezány a jiné nedořezány. Problém tudíž není chybou programování, ale je zaviněn malou tuhostí stroje (viz jeho stáří).

Na optimalizaci hrubovacího frézování tyto nedostatky nebudou mít žádný vliv, a tudíž experiment mohl dále pokračovat. Zcela jistě zjištěná chyba přispívá k myšlence pořízení nového stroje, čímž se částečně zabývá i tato práce.

## 6. Optimalizace obrábění – praktický experiment a teoretické simulace

Z předchozích analýz bylo zjištěno, že přesnost stroje nijak výrazně neovlivní hrubovací proces, a tudíž byla možnost pokračovat a začít s konkrétním optimalizačním procesem.

Šestá kapitola diplomové práce se zabývá reálnou optimalizací stávajících podmínek obrábění. Optimalizace stávajícího postupu obrábění je prováděna jak už z hlediska použitých obráběcích technologií, tak i z pohledu použitých nástrojů, kdy jako stroj pro experimentální část byla použita frézka *NC mind NCG 560*, na které bylo v předchozí kapitole provedeno vyhodnocení možných chyb.

Po praktickém experimentu je vytvořen experiment teoretický, kdy je tříosá frézka nahrazena frézku pětiosou. Výsledky teoretické analýzy jsou následně porovnány s praktickým experimentem a jsou zde vyhodnoceny klady a zápory nahrazení tříosé frézky frézku pětiosou.

V samotném závěru je proveden ekonomický propočet různých optimalizačních variant a výběr mezi pořízením nové tříosé frézky nebo frézky pětiosé.

### 6.1. Frézování elektrod – tříosá frézka

Následující úseky práce přímo pojednávají o konkrétních krocích, které byly podniknuty k optimalizaci obráběcího procesu na tříosé frézce.

Nejprve je popsán stávající stav a následně byly měněny obráběcí podmínky (hloubka řezu, posuv atd.) a obráběcí strategie. Jako poslední byl změněn hrubovací nástroj.

#### 6.1.1. Stávající stav

Stávající řezné podmínky jsou demonstrovány na různých vyráběných elektrodách, kdy se jedná jak o tvarově složité a malé elektrody, tak o velké tvarové elektrody a případně elektrody pro tvorbu žeber. Pro výchozí stav byly nastaveny tyto podmínky a vesměs byly použity pro hrubování všech elektrod, ať už se jedná o malé či velké elektrody. Pro hrubovací obrábění byla použita válcová fréza o průměru 10 mm.

Tab. 6: Řezné podmínky V10 – výchozí stav [autor]

| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Otáčky vřetene [ $min^{-1}$ ] | Rychlost posuvu – $V_f$ [ $\frac{mm}{min}$ ] |
|------------|------------|-------------------------------|--|
| 1          | 2          | 8 000                         | 4 000  |

Tyto podmínky jsou v některých případech nevyhovující, a bylo tudíž nutné je optimalizovat.

Také bylo v některých případech nezbytné optimalizovat i dohrubovací operace, které byly prováděny válcovou frézou o průměru 3 mm a kulovou frézou, která má taktěž průměr 3 mm.

Tab. 7: Řezné podmínky V3 a K3 – výchozí stav [autor]

| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Otáčky vřetene [ $\text{min}^{-1}$ ] | Rychlost posuvu – $V_f$ [ $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$ ] |
|------------|------------|--------------------------------------|--|
| 0.2        | 0,9        | 30 000                               | 3 000  |

Při některých optimalizacích bylo nutné dbát na parametry obráběcího stroje. V případě, že by mohly být použity lepší parametry, nemusel by je stroj zvládnout. Také by mohlo dojít k odlomení/odlepení obrobku a k jeho následné destrukci.

Podmínky byly optimalizovány dle katalogu pro nástroje „PM-tech“ a z katalogu pro nástroje „Karnasch“.

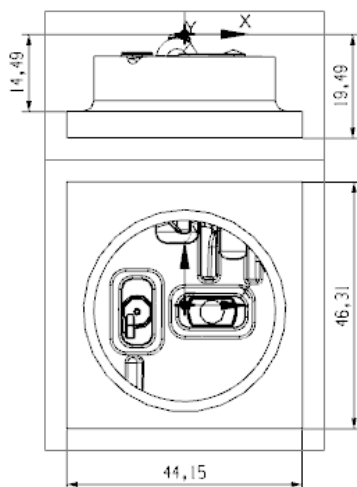
#### 6.1.2. Změna řezných podmínek

Podkapitola pojednává o optimalizaci řezných podmínek hrubování pomocí řádkování, kdy počáteční podmínky jsou vypsány v tabulce č. 6 a tabulce č. 7.

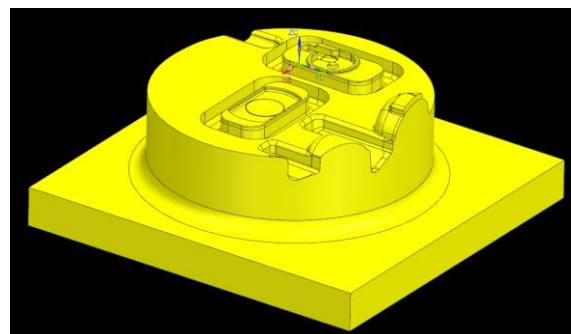
Řezné podmínky jsou upraveny na různých elektrodách. Tyto elektrody jsou vždy popsány před samotnou optimalizací.

##### 6.1.2.1. Tvarová elektroda malých rozměrů

V tomto případě se jedná o elektrodu, u které se v dokončeném stavu vyskytují rádiusy o velikosti 0,25 mm. Vrchní plocha není rovná, ale je tvarová, proto ji nelze obrábět válcovou frézou.



Obrázek 78: Rozměry malé tvarové elektrody [autor]



Obrázek 79: Model malé tvarové elektrody [autor]

Pro názornou ukázkou byla vždy vytvořena simulace s různými řeznými podmínkami, kdy na začátku byla pouze měněna hloubka řezu a byl sledován obráběcí čas.

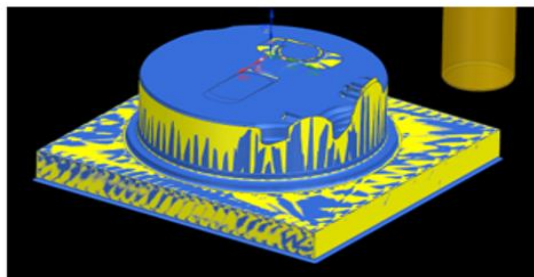
Čas obrábění, který ukazuje program Siemens NX, bohužel nesouhlasí s reálným časem a z nabytých praktických zkušeností je nutno ho vynásobit minimálně 1,5násobkem, což odpovídá realitě. Reálný čas se nachází v tabulkách vedle času simulace, které byly vygenerované programem NX. Čas byl vždy vynásoben koeficientem o velikosti 2.

Pokud je ovšem během obrábění nutno přepnout obrobek, čas potřený na výrobu ještě vzroste. Samotný čas na přepnutí a znovunajetí obvykle bývá dalších 20 až 30 minut.

Dále byly měněny i ostatní řezné podmínky jako je například rychlost řezu nebo posuv, případně posuv na zub.

**Změna hloubky řezu:**

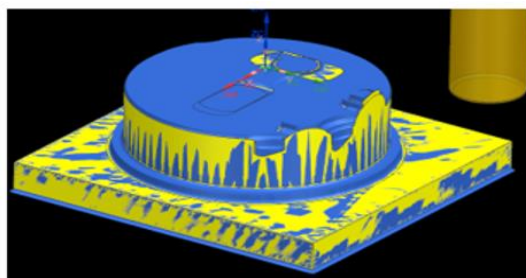
Toto je elektroda obrobená původními řeznými podmínkami. Simulace vypadá dobře a lze pozorovat, že se na elektrodě nenachází výrazné schody, ale hrubovací obrábění je zbytečně dlouhé.



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [min:s]   |
|------------|------------|---------------|
| 1          | 2          | 08:57 (17:54) |

*Obrázek 80: Změna hloubky řezu 1 [autor]*

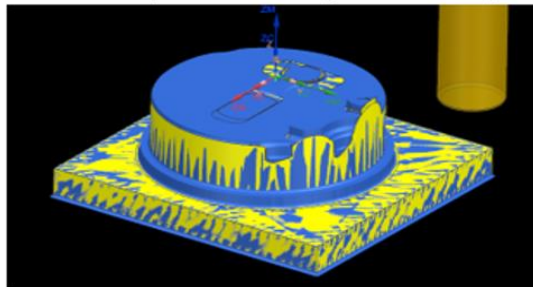
Zde už můžeme vidět, že po zvětšení  $A_p$  se začínají tvořit větší schody po obrábění. Zvětšení schodů však není tak výrazné, protože některé oblasti budou ještě dohrubovány pomocí menších nástrojů. Je také vidět, že čas obrábění se zmenšil skoro o dvě minuty.



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [min:s]   |
|------------|------------|---------------|
| 1,5        | 2          | 07:09 (14:18) |

*Obrázek 81: Změna hloubky řezu 2 [autor]*

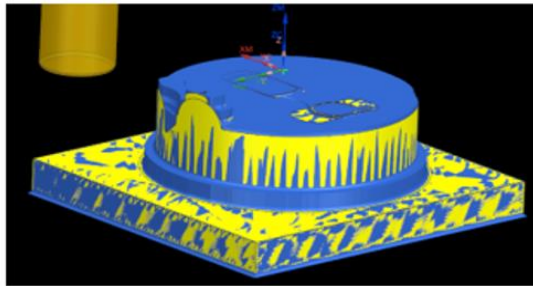
Opět se zvětšily schody po hrubování, protože byla nastavena větší hloubka řezu. Nedostatek není tak markantní, aby ho bylo nutno řešit dodatečným dohrubováním. Čas obrábění od počáteční hodnoty klesl skoro o čtyři minuty.



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [min:s]   |
|------------|------------|---------------|
| 2          | 2          | 05:11 (10:22) |

Obrázek 82: Změna hloubky řezu 3 [autor]

Po poslední změně hloubky řezu už časová změna nebyla tak výrazná a pouze se snížila o více jak půlminutu. V tomto případě už by bylo nutné použít dohrubovací strategii pro začištění schodů po předchozí operaci.



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [min:s]  |
|------------|------------|--------------|
| 2,5        | 2          | 04:36 (9:12) |

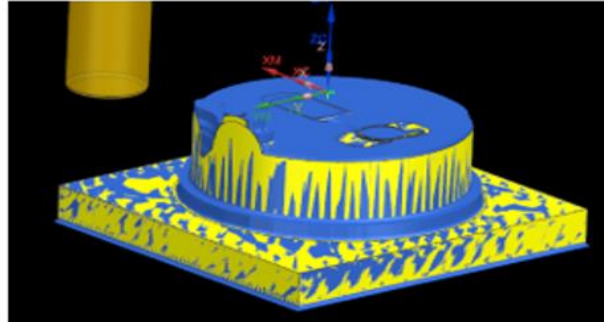
Obrázek 83: Změna hloubky řezu 4 [autor]

Při použití dohrubovací operace by čas byl téměř stejný jako při předchozích řezných podmínkách.



**Změna bočního kroku nástroje (maximální hloubka řezu):**

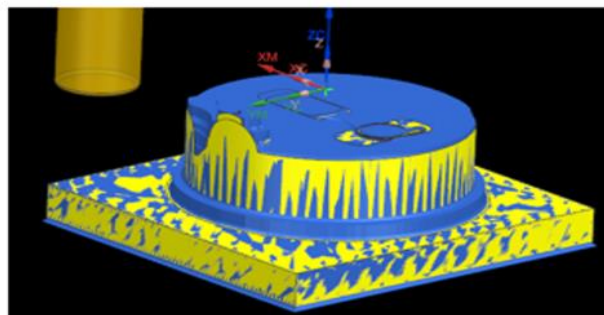
Elektroda vyfrézovaná s bočním krokem 2 mm je vidět na obrázku č. 81, tudíž simulace této elektrody je přeskočena. Jako další je použit boční krok 3 mm (30 % průměru nástroje). Na řádkování to nic nemění, a tudíž není potřeba používat dodatečné dohrubování. V tuto chvíli je vidět, že obráběcí čas je oproti původnímu více jak o polovinu menší.



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [min:s]   |
|------------|------------|---------------|
| 2          | 3          | 03:42 (07:22) |

*Obrázek 84: Změna bočního kroku 1 [autor]*

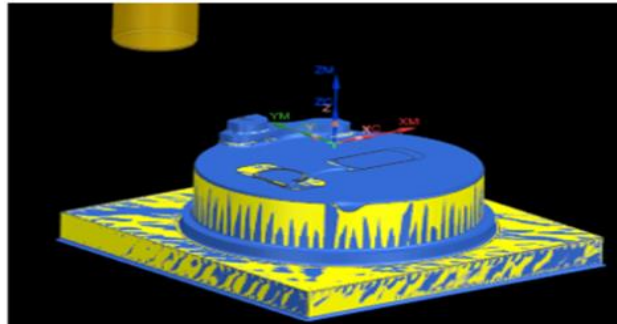
Opět byl zvýšen boční krok z 3 mm na 4 mm. Na simulaci to znovu není poznat, protože se jedná pouze o boční krok. Čas při těchto podmínkách klesl skoro o další čtvrt minutu.



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [min:s]   |
|------------|------------|---------------|
| 2          | 4          | 02:59 (05:58) |

*Obrázek 85: Změna bočního kroku 2 [autor]*

Poslední optimalizací bylo zvoleno zvýšení bočního kroku na 5 mm (50 % průměru nástroje). Tyto podmínky jsou konečným doporučením katalogu nástrojů od firmy Karnasch. Po změně bočního kroku klesl čas z 2:59 na 2:27.



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [min:s]   |
|------------|------------|---------------|
| 2          | 5          | 02:27 (04:54) |

Obrázek 86: Změna bočního kroku 3 [autor]

#### Změna posuvu na zub dle katalogu:

Pokud by byly změněny i tyto podmínky, tak by se výsledný obráběcí čas ještě více snížil. Níže lze nalézt porovnání současného stavu a stavu po změně posuvu na zub.

Tab. 8: Současný stav posuvu na zub [autor]

| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | $f_z$ [ $\frac{mm}{z}$ ] | Čas [min:s] |
|------------|------------|--------------------------|-------------|
| 2          | 5          | 0,125                    | 2:27 (4:54) |

Tab. 9: Stav po změně posuvu na zub [autor]

| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | $f_z$ [ $\frac{mm}{z}$ ] | Čas [min:s] |
|------------|------------|--------------------------|-------------|
| 2          | 5          | 0,16                     | 1:56 (3:52) |

Po finální optimalizaci se obráběcí čas u této elektrody snížil až na 1 minutu a 56 vteřin, což snížení až o 78,4 % oproti původnímu obráběcímu času.

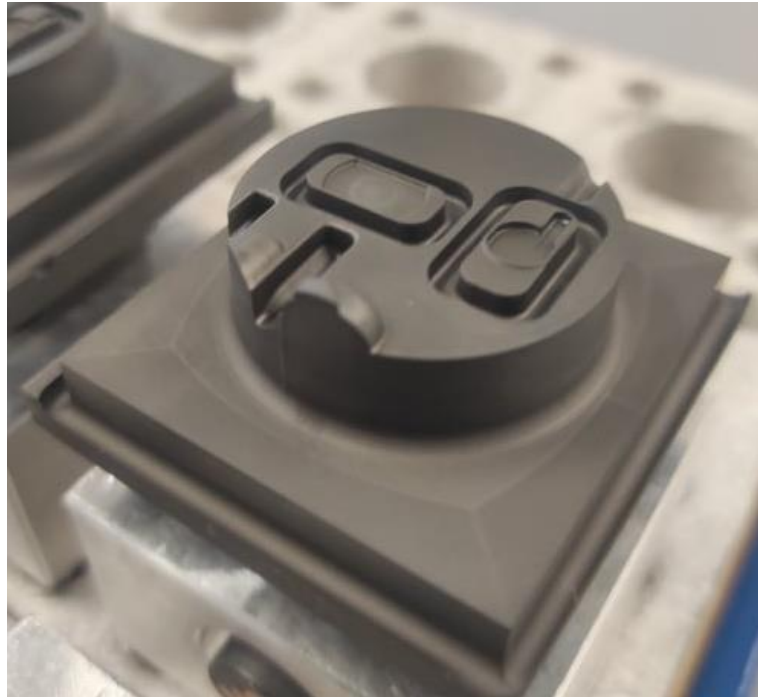
#### Souhrn výsledných poznatků u tvarové elektrody malých rozměrů

Výrobek byl vyroben třemi variantami řezných podmínek a jak je vidět na obrázku č. 87, že ať už byla použita jakákoliv metoda, tak to nemělo vliv na výslednou kvalitu povrchu grafitové elektrody.

U první varianty byly použity stávající řezné podmínky. U druhé varianty byly použity podmínky popsané u obrázku č. 82. Řezné podmínky u třetího kusu byly nastaveny podle obrázku č. 86.

Při porovnání první a poslední použitelné varianty je patrné, že obráběcí čas je o 72,6 % menší než při původních řezných podmínkách.

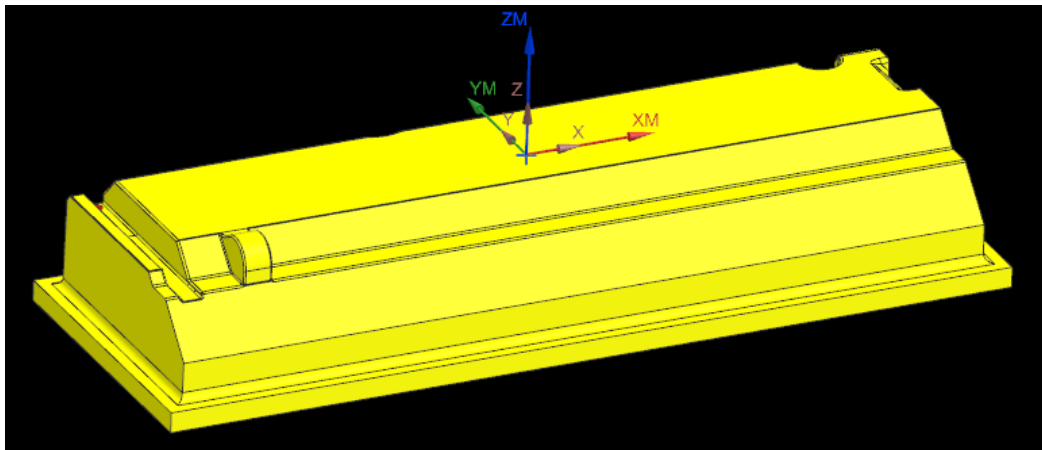
Poslední varianta se změněným posuvem na zub nebyla využita kvůli obavám o uvolnění obrobku nalepeného na kostce.



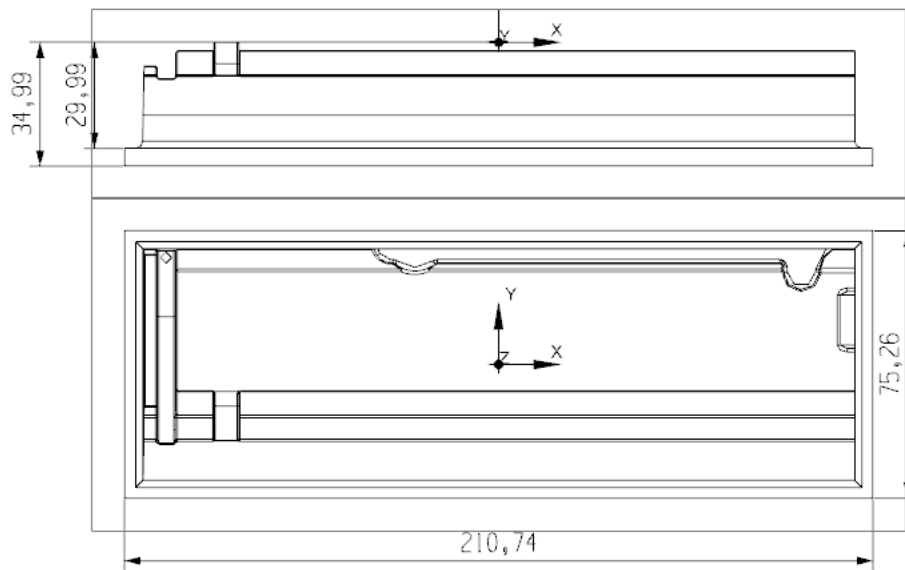
*Obrázek 87: Tvarová elektroda malých rozměrů – výsledný díl [autor]*

#### 6.1.2.2. Tvarová elektroda velkých rozměrů

Zde se jedná o tvarovou elektrodu velkých rozměrů. Elektroda obrábí kompletně celou tvarovou část tvarové vložky. Na této elektrodě z důvodu časové náročnosti byly provedeny jen dvě optimalizační řešení.



*Obrázek 88: Model tvarové elektrody větších rozměrů [autor]*



Obrázek 89: Rozměry tvarové elektrody [autor]

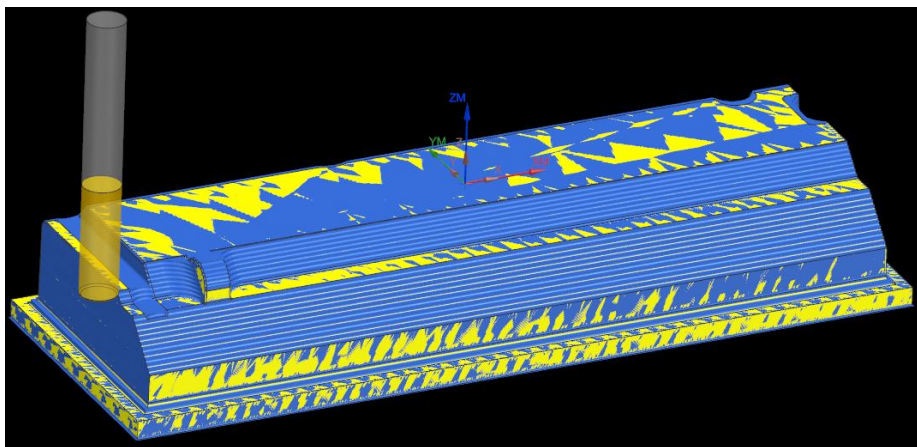
Problémem u velké tvarové elektrody jsou vysoké schody vytvořené po strategii hrubování řádkováním. Tyto schody musely být následně dohrubovány, aby plocha byla připravena pro dokončovací operace.

Počáteční řezné podmínky byly jako v předchozím případě následující:

Tab. 10: Původní řezné podmínky pro tvarovou elektrodu [autor]

| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 1          | 2          | 1:01:12 (2:02:24) |

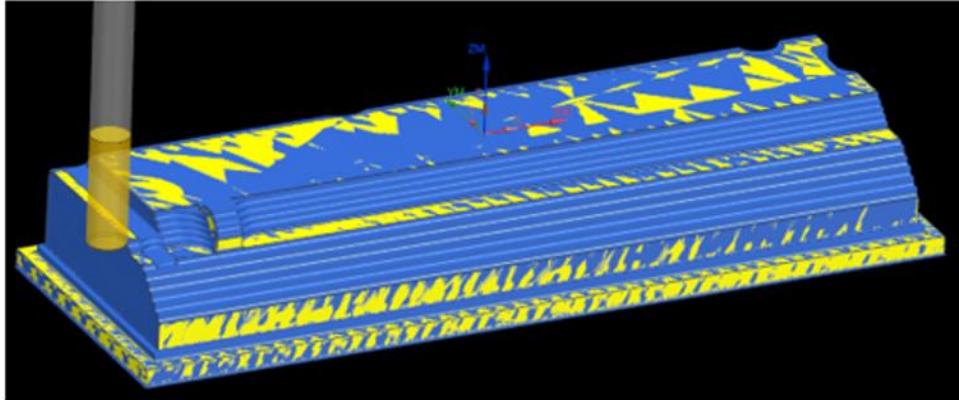
Dále následuje simulace s počátečními podmínkami. Na šikmých plochách jsou vidět menší schody po hrubovací operaci. Tyto schody by v tuto chvíli nebylo nutno dohrubovat, ale jelikož se bude měnit hloubka řezu, tak bude potřeba použít dohrubovací operaci.



Obrázek 90: Simulace s počátečními podmínkami [autor]

### Změna hloubky řezu:

Během první optimalizace byla změněna hloubka řezu. Tím byly vytvořeny větší schody na šikmých plochách, které bylo nutno dohrubovat. Tyto plochy byly hrubovacím frézováním dohrubovány pomocí rastrové strategie. Celkový čas je součtem těchto dvou operací. Po sečtení těchto dvou obráběcích času je vidět, že i při kombinaci dvou frézovacích operací je obráběcí čas kratší než při původním nastavení.

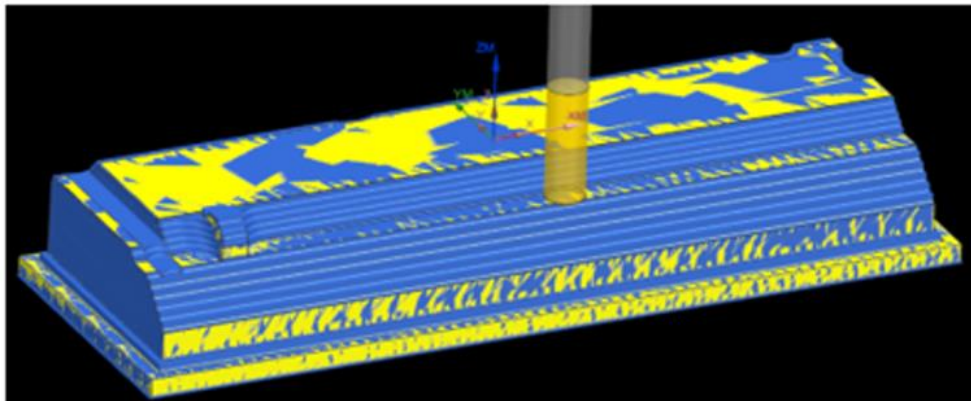


| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [min:s]       |
|------------|------------|-------------------|
| 2          | 2          | 0:36:50 (1:13:40) |

Obrázek 91: Změna hloubky řezu u velké tvarové elektrody [autor]

### Změna bočního kroku:

Druhá optimalizace spočívala v tom, že se ponechala hloubka řezu z předchozí optimalizace a zvětšil se boční krok nástroje. Jelikož elektroda byla upevněna v držáku pomocí šroubů, tak bylo možné použít hrubší řezné podmínky bez rizika vylomení obrobku.



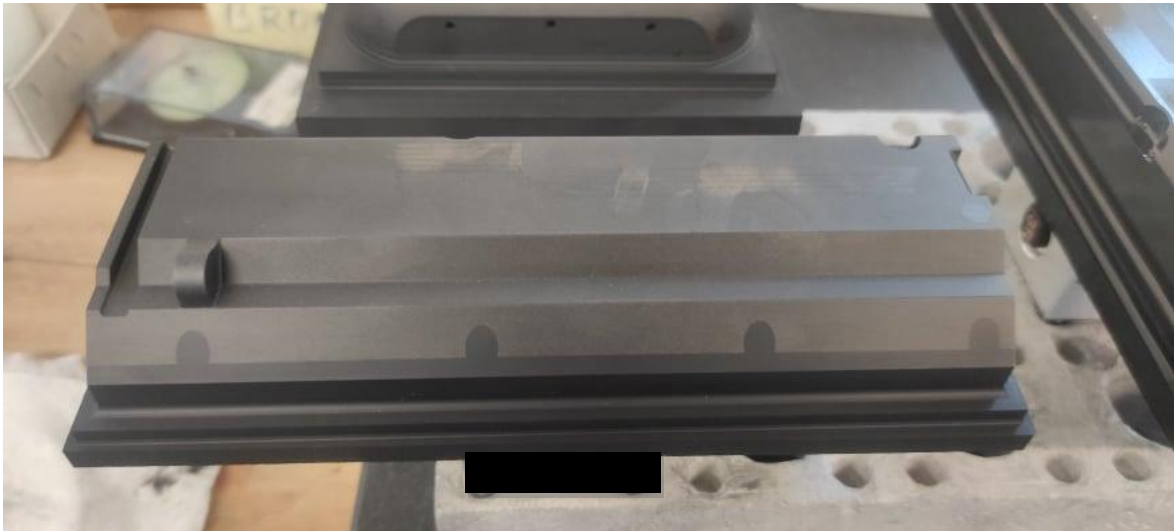
| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [min:s]       |
|------------|------------|-------------------|
| 2          | 4          | 0:20:19 (0:40:36) |

Obrázek 92: Změna bočního kroku u velké tvarové elektrody [autor]

## **Souhrn výsledných poznatků u tvarové elektrody velkých rozměrů**

Po kombinaci těchto dvou optimalizací byl čas snížen z 1:01:12 (2:02:24) na 00:36:50 (1:13:40). V tomto případě se procentuálně obráběcí čas snížil o 70,18 %. Jelikož pro potřebu elektroerozivního obrábění je potřeba hrubovací a dokončovací elektroda, je snížení hrubovacího času dvojnásobné.

Změna řezných parametrů se při dokončování nijak neprojevila, a tudíž je použití této optimalizace možné.



*Obrázek 93: Dokončená velká tvarová elektroda [autor]*

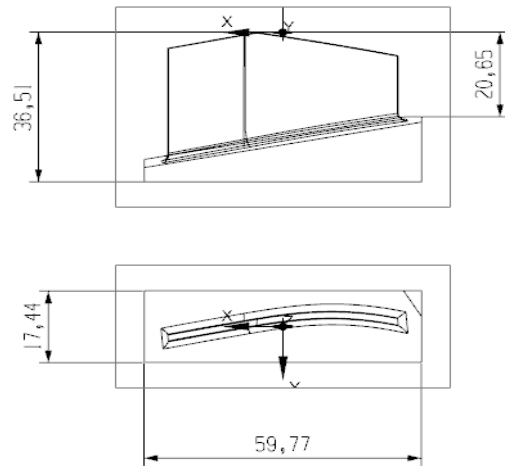
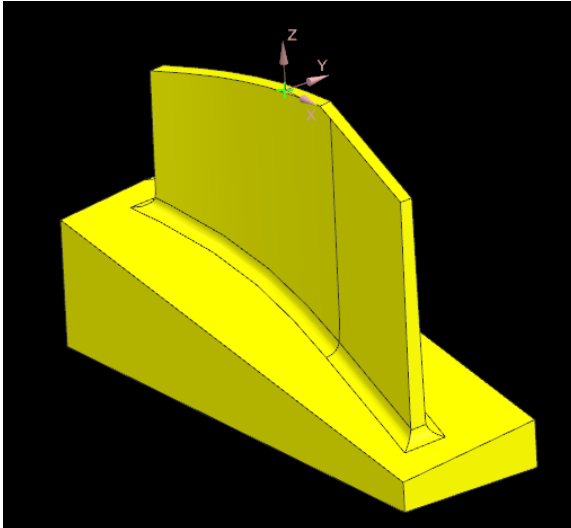
### **6.1.2.3. Elektroda pro obrábění žeber**

U těchto elektrod se vyskytuje problém z hlediska obrábění, který u ostatních tvarových elektrod není. Problém spočívá v samotné konstrukci elektrody, kdy je velký nepoměr mezi tloušťkou žebra a jeho výškou.

Například u elektrody, u které je nutno optimalizovat obrábění, je tloušťka žebra 1,4 mm a výška žebra je 33 mm.

Nepoměr mezi rozměry při dokončovací obrábění může způsobit to, že se nástroj může rozvibrovat, a tím odlomit část elektrody. Tomuto je předcházeno tak, že je ponechán větší přídavek na dokončení, než je zvykem u tvarových elektrod. V normálním případě je elektroda obráběna tzv. „na nulu“. To znamená, že jsou veškeré rozměry vyfrézovány dle modelu a poté jsou vyfrézovány dvě elektrody, kdy jedna má hrubovací podrozměr a druhá má dokončovací podrozměr.

Při optimalizaci obrábění je na štíhlost žebra brán ohled a v celkovém čase jsou zahrnuty i dohrubovací operace, které je nutné provést před samotným dokončovací obráběním.



Obrázek 94: Model žebrové elektrody [autor]

Obrázek 95: Rozměry žebrové elektrody [autor]

Jako počáteční řezné podmínky byly použity ty, které jsou popsány v tabulce č. 11 a nachází se v ní i celkový obráběcí čas hrubovací a dohrubovací operace.

Hloubka řezu a boční krok nástroje byly dále upravovány za účelem, kdy cílem bylo dosažení co nejmenšího výrobního času a zároveň vyhrubování elektrody bez vad.

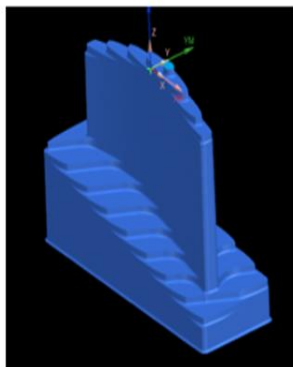
Mezi tyto vady se hlavně řadí odštipování části obrobku, nebo kompletní odlomení žebra z důvodu rozvibrování nástroje.

Tab. 11: Počáteční řezné podmínky – žebrová elektroda [autor]

| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 1          | 2          | 0:09:43 (0:19:23) |

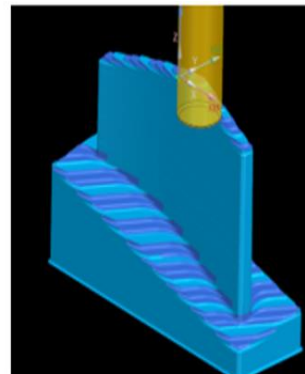
### Změna hloubky řezu

První optimalizace spočívala v tom, že byla opět zvětšena hloubka řezu. Po hrubovací operaci bylo následně nutno dočistit schody pomocí doplňkové dohrubovací operace. Po této optimalizaci byl celkový čas snížen o 2 minuty a 33 vteřin.



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 1,5        | 2          | 0:06:27 (0:12:54) |

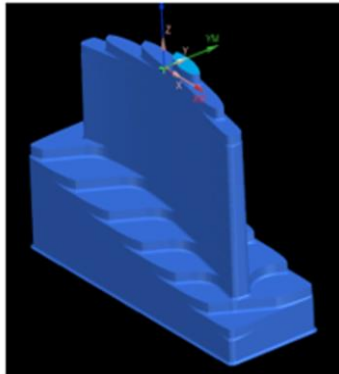
Obrázek 96: Změna hloubky řezu – 1.1 [autor]



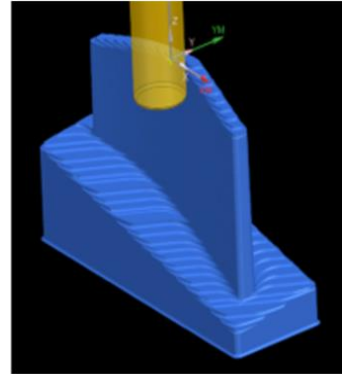
| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 0,4        | 2          | 0:00:43 (0:01:26) |

Obrázek 97: Změna hloubky řezu – 1.2 [autor]

Ve druhém kole optimalizací byla znovu zvýšena hloubka řezu o 0,5 mm. Změna řezné hloubky opět přinesla značnou časovou úsporu, kdy sice dohrubovací čas narostl, ale v kombinaci s hrubovacím časem je celková hodnota opět nižší. Celkový čas se snížil o 1 minutu a 29 vteřin.



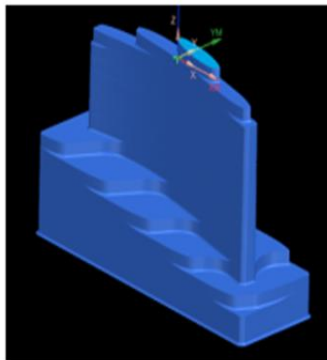
| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 2          | 2          | 0:04:46 (0:09:32) |



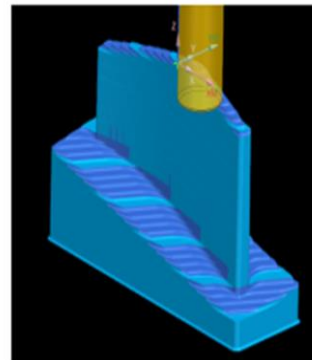
| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 0,4        | 2          | 0:00:55 (0:01:50) |

Obrázek 98: Změna hloubky řezu – 2.1 [autor]      Obrázek 99: Změna hloubky řezu – 2.2 [autor]

Poslední optimalizací v tomto směru je zvětšení hloubky řezu na 2,5 mm. Z předchozí zkušenosti je známo, že se sníží hrubovací čas, ale dohrubovací čas o pár vteřin vzroste. I v tomto případě tomu tak je, ale opět je kombinace těchto času nižší než předchozí celkový obráběcí čas. Celkový čas se snížil o 41 vteřin.



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 2,5        | 2          | 0:03:48 (0:07:36) |



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 0,4        | 2          | 0:00:55 (0:02:12) |

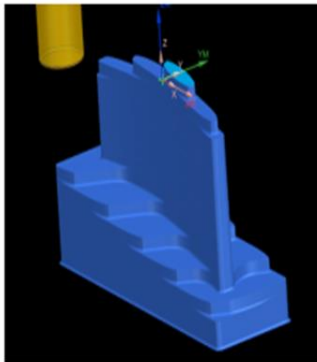
Obrázek 100: Změna hloubky řezu – 3.1 [autor]      Obrázek 101: Změna hloubky řezu – 3.2 [autor]



### Změna bočního kroku nástroje

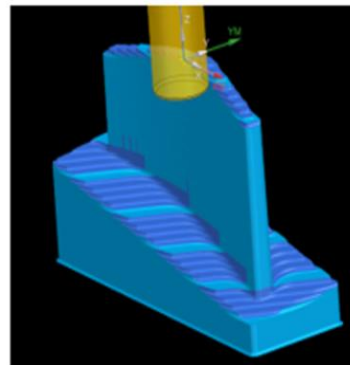
Následující změny řezných podmínek spočívají ve zvětšení bočního kroku nástroje při obrábění žebrové elektrody. Jak už bylo řečeno v kapitolách výše, tak změna bočního kroku není patrná na simulaci prováděné v programu NX, ale projeví se na zmenšení času obrábění.

Zpočátku byl boční krok nástroje zvýšen o 1 mm, kdy díky předchozím simulacím a praktickému experimentu bylo nasnadě, že nejlepší možná volba pro hloubku řezu je 2,5 mm. Úprava řezného parametru se promítne na dohrubovací operaci, kdy je hloubka řezu zachována, ale i u tohoto obrábění je zvyšován boční krok nástroje, viz následující obrázky simulací. Změna bočního kroku snížila celkový čas o 1 minutu a 31 vteřin.



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 2,5        | 3          | 0:02:32 (0:05:04) |

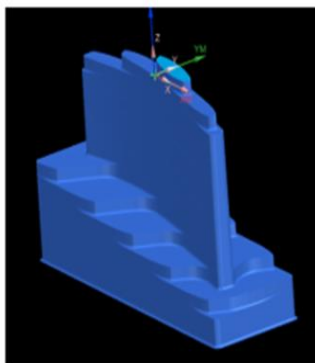
Obrázek 102: Změna bočního kroku – 1.1  
[autor]



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 0,4        | 3          | 0:00:51 (0:01:42) |

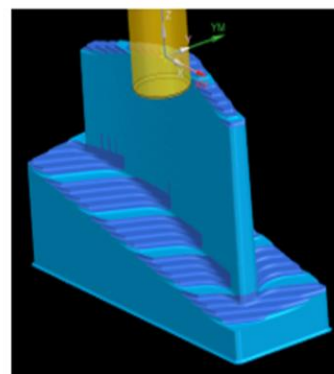
Obrázek 103: Změna bočního kroku – 1.2  
[autor]

V dalším návrhu zlepšení byl opět boční krok nástroje zvýšen o 1 mm. Výsledná hodnota bočního kroku byla 4 mm. Zvýšení bočního kroku opět snížilo potřebný čas k obrábění o 35 vteřin.



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 2,5        | 4          | 0:02:04 (0:04:08) |

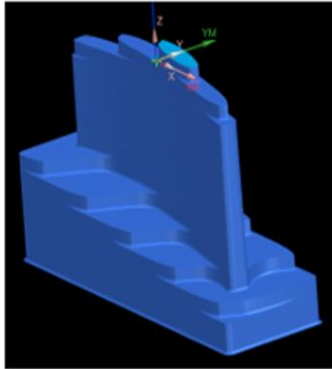
Obrázek 104: Změna bočního kroku – 2.1  
[autor]



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 0,4        | 4          | 0:00:44 (0:01:28) |

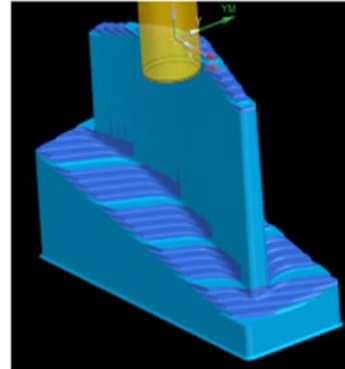
Obrázek 105: Změna bočního kroku – 2.2  
[autor]

U posledního optimalizačního kroku u žebrové elektrody byl boční krok nástroje zvýšen na 5 mm. Zde opět nastávaly obavy z možného uvolnění grafitového polotovaru, ale při samotném frézování problémový stav nenastal. Po této změně už snížení času nebylo tak razantní a celkový obráběcí čas klesl pouze o 6 vteřin.



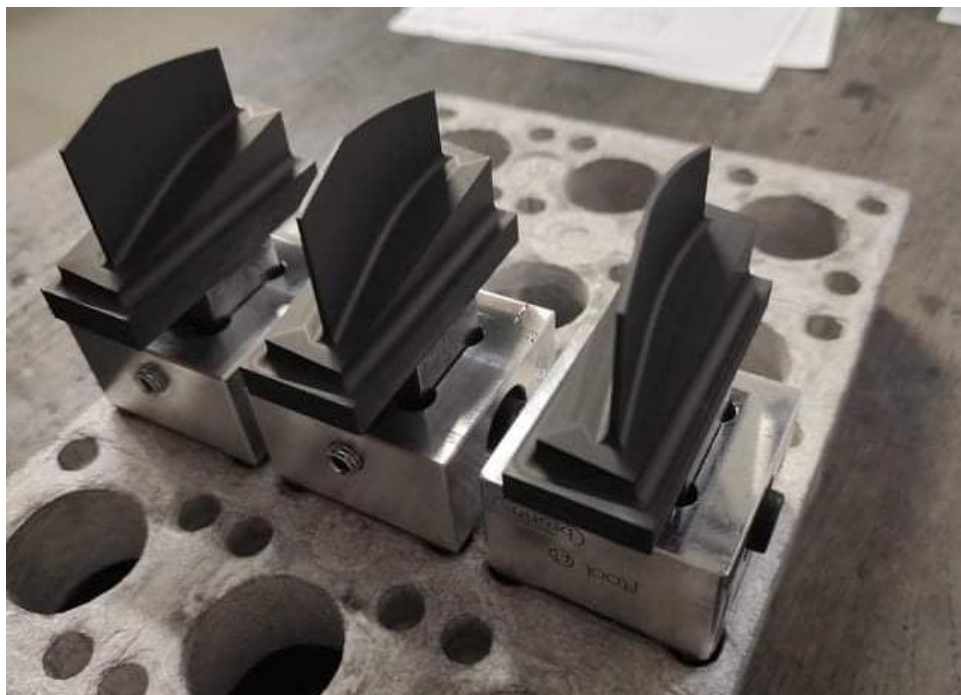
| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 2,5        | 5          | 0:01:52 (0:03:44) |

Obrázek 106: Změna bočního kroku – 3.1  
[autor]



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 0,4        | 5          | 0:00:40 (0:01:20) |

Obrázek 107: Změna bočního kroku – 3.2  
[autor]



Obrázek 108: Vyfrézované žebrové elektrody [autor]

**6.1.2.4. Optimalizace řezných podmínek – shrnutí výsledků**

V této kapitole jsou přehledně prezentovány veškeré zjištěné poznatky z provedených optimalizací hrubovacího procesu frézování grafitových elektrod.

**Tvarová elektroda malých rozměrů**
*Tab. 12: Tvarová elektroda malých rozměrů – výsledky 1 [autor]*

| Optimalizace | Stávající stav | 1            | 2            | 3           | 4           |
|--------------|----------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| $A_p$ [mm]   | 1              | 1,5          | 2            | 2,5         | 2           |
| $A_e$ [mm]   | 2              | 2            | 2            | 2           | 3           |
| Čas [min:s]  | 8:57 (17:54)   | 7:09 (14:18) | 5:11 (10:22) | 4:36 (9:12) | 3:42 (7:24) |

*Tab. 13: Tvarová elektroda malých rozměrů – výsledky 2 [autor]*

| Optimalizace | 5           | 6           |
|--------------|-------------|-------------|
| $A_p$ [mm]   | 2           | 2           |
| $A_e$ [mm]   | 4           | 5           |
| Čas [min:s]  | 2:59 (5:58) | 2:27 (4:54) |

**Tvarová elektroda velkých rozměrů**
*Tab. 14: Tvarová elektroda velkých rozměrů – výsledky [autor]*

| Optimalizace  | Stávající stav    | 1                 | 2                 |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $A_p$ [mm]    | 1                 | 2                 | 2                 |
| $A_e$ [mm]    | 2                 | 2                 | 4                 |
| Čas [h:min:s] | 1:01:12 (2:02:24) | 0:36:50 (1:13:40) | 0:20:19 (0:40:36) |

**Elektroda pro obrábění žeber**
*Tab. 15: Žebrová elektroda – výsledky hrubování 1 [autor]*

| Optimalizace | Stávající stav | 1            | 2           | 3           | 4           |
|--------------|----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| $A_p$ [mm]   | 1              | 1,5          | 2           | 2,5         | 2,5         |
| $A_e$ [mm]   | 2              | 2            | 2           | 2           | 3           |
| Čas [min:s]  | 9:43 (19:23)   | 6:27 (12:54) | 4:46 (9:32) | 3:48 (7:36) | 2:32 (5:04) |

*Tab. 16: Žebrová elektroda – výsledky hrubování 2 [autor]*

| Optimalizace | 5           | 6           |
|--------------|-------------|-------------|
| $A_p$ [mm]   | 2,5         | 2,5         |
| $A_e$ [mm]   | 4           | 5           |
| Čas [min:s]  | 2:04 (4:08) | 1:52 (3:44) |

*Tab. 17: Žebrová elektroda – výsledky dohrubování 1 [autor]*

| Optimalizace | Stávající stav | 1           | 2           | 3           | 4           |
|--------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $A_p$ [mm]   | -              | 0,4         | 0,4         | 0,4         | 0,4         |
| $A_e$ [mm]   | -              | 2           | 2           | 2           | 3           |
| Čas [min:s]  | -              | 0:43 (1:26) | 0:55 (1:10) | 1:06 (2:12) | 0:51 (1:42) |

Tab. 18: Žebrová elektroda – výsledky dohrubování 2 [autor]

| Optimalizace | 5           | 6           |
|--------------|-------------|-------------|
| $A_p$ [mm]   | 0,4         | 0,4         |
| $A_e$ [mm]   | 4           | 5           |
| Čas [min:s]  | 0:44 (1:28) | 0:40 (1:20) |

### 6.1.3. Změna obráběcí strategie

Do kapitoly byly převzaty nejlepší optimalizace z kapitol předchozích, následně u nich byla provedena změna z pohledu obráběcí strategie, kdy se přestalo frézovat sousledně a začalo se používat obousměrné frézování.

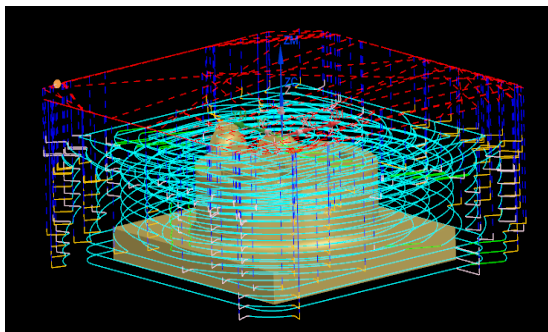
Po provedení obměny u řádkovacího hrubování, byl styl obrábění kompletně nahrazen frézováním celou délkou břitu nástroje, kdy zmíněná obráběcí strategie byla vypracována pro každou elektrodu. V této kapitole byly také více řešeny nájezdy a odjezdy a spojení jednotlivých drah nástroje.

#### 6.1.3.1. Změna směru frézování

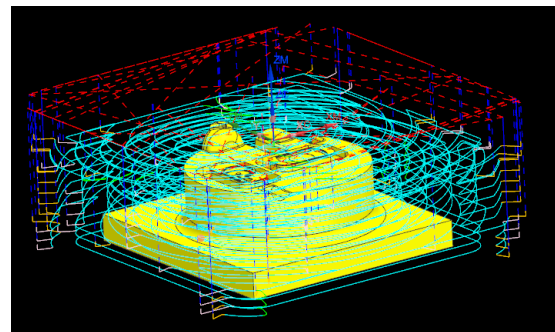
Styl frézování byl upraven u všech tří elektrod, u kterých byla provedena optimalizace řezných podmínek v předchozí kapitole. Obousměrný způsob byl použit jak u hrubovacího frézování, tak i u dohrubovacího.

#### Tvarová elektroda malých rozměrů

Jak lze vidět na doložených obrázcích níže, změna strategie ze sousledného frézování na obousměrné má za následek to, že se při obrábění nevyskytuje tolik přejezdů a je snížen celkový obráběcí čas o další 6 vteřin. Z praktické zkušenosti také bylo zjištěno, že zavedení obousměrného frézování se násobící koeficient může snížit z 2 na 1,5. Díky tomu reálný čas klesne ještě o vyšší hodnotu, než klesl čas simulace.



Obrázek 109: Malá tvarová elektroda – dráhy před úpravou [autor]



Obrázek 110: Malá tvarová elektroda – dráhy po úpravě [autor]

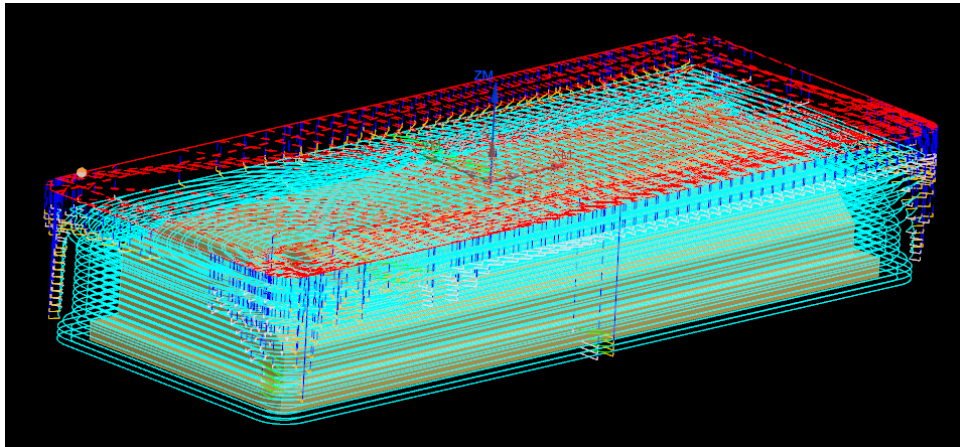
Tab. 19: Porovnání časů – změna směru frézování u malé tvarové elektrody [autor]

| Čas – dráhy před úpravou [min:s] | Čas – dráhy po úpravě [min:s] |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 2:27 (4:54)                      | 2:21 (3:31)                   |

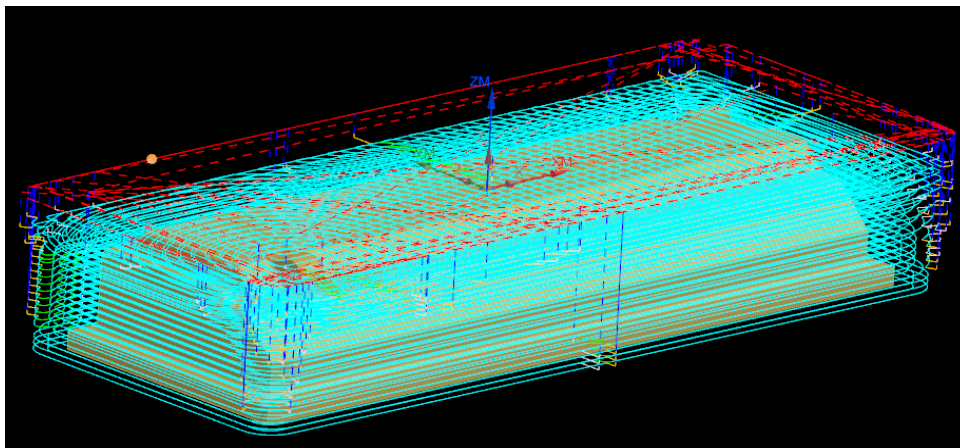
### Tvarová elektroda velkých rozměrů

U tohoto typu elektrody byla rovněž provedena optimalizace obráběcí strategie, ale jen v teoretické rovině, jelikož na optimalizaci při pracovním vytížení nezbyl čas. Opět bylo použito obousměrné frézování, které výrazně snížilo obráběcí čas u hrubovací operace. V celkovém čase je ještě zakombinován čas potřebný k obrobení schodů vzniklých po frézování.

Po změně koeficientu pro přenásobení času simulace je vidět, že rozdíl reálných časů obrábění je mnohem vyšší, a tudíž se nahrazení sousledného frézování obousměrným už teď jeví jako správný krok v optimalizaci obráběcího procesu.



Obrázek 111: Velká tvarová elektroda – dráhy před úpravou [autor]



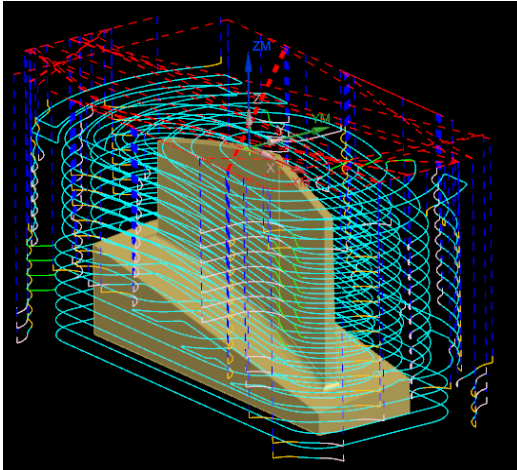
Obrázek 112: Velká tvarová elektroda – dráhy po úpravě [autor]

Tab. 20: Porovnání časů – změna směru frézování u velké tvarové elektrody [autor]

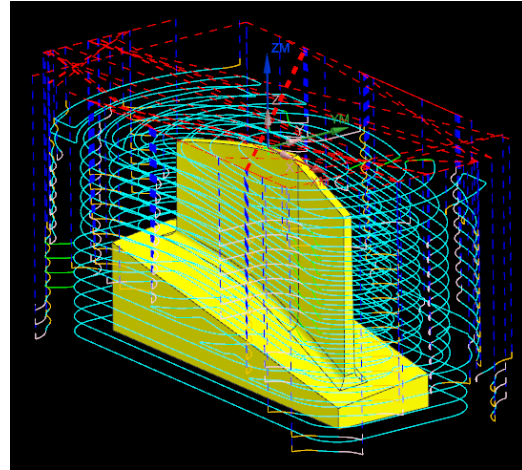
| Čas – dráhy před úpravou [min:s] | Čas – dráhy po úpravě [min:s] |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 20:19 (40:36)                    | 18:27 (27:41)                 |

### Elektroda pro obrábění žeber

Jako poslední byla tato změna provedena u elektrody speciálně vyrobené pro elektroerozivní obrábění žeber. U žebrové elektrody změna obráběcího času nebyla tak velká, ale při porovnání reálných časů je snížení výraznější. Jsou zde také zvlášť vidět dráhy nástroje samotného hrubování a zbytkového hrubování.



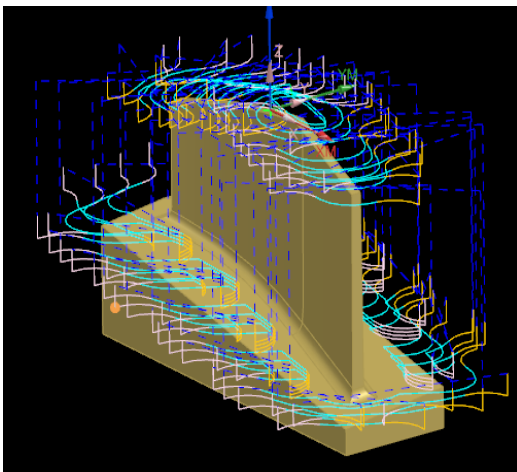
Obrázek 113: Žebrová elektroda– dráhy před změnou (hrubování) [autor]



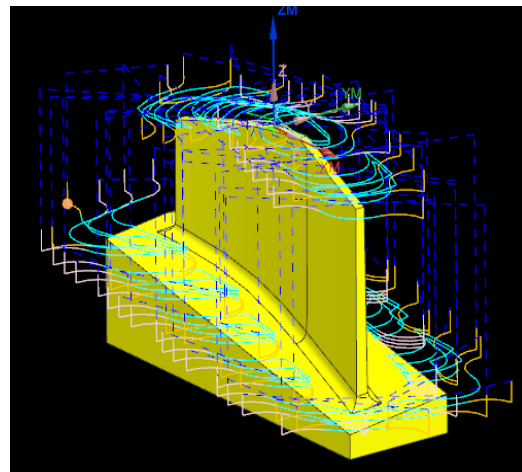
Obrázek 114: Žebrová elektroda– dráhy po změně (hrubování) [autor]

Tab. 21: Porovnání časů – změna směru frézování u žebrové elektrody (hrubování)[autor]

| Čas – dráhy před úpravou [min:s] | Čas – dráhy po úpravě [min:s] |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 1:52 (3:44)                      | 1:50 (2:45)                   |



Obrázek 115: Žebrová elektroda– dráhy před změnou (zbytkové hrubování) [autor]



Obrázek 116: Žebrová elektroda– dráhy po změně (zbytkové hrubování) [autor]

Tab. 22: Porovnání časů – změna směru frézování u žebrové elektrody (zbytkové hrubování) [autor]

| Čas – dráhy před úpravou [min:s] | Čas – dráhy po úpravě [min:s] |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 0:40 (1:20)                      | 0:35 (0:53)                   |

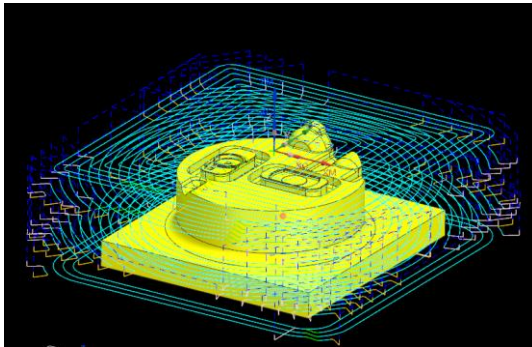
### 6.1.3.2. Frézování celou délkou břitu

Pro obráběcí strategii frézování celou délkou břitu musely být upraveny řezné podmínky a nemohly být použity ty, které dle pokusů při řádkovacím frézování vycházely nejlépe. Podmínky byly opět zvoleny s pomocí katalogu nástrojů od firmy Karnasch, kdy byla zvýšena hloubka řezu a snížen boční krok nástroje.

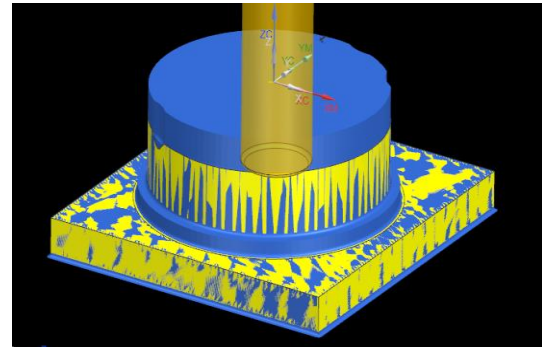
Po vytvoření simulace frézování celou délkou břitu byly tyto simulace porovnány s řádkovacím hrubováním.

#### Tvarová elektroda malých rozměrů

Frézování celou délkou břitu bylo nejprve implementováno do hrubovacího obrábění u malé tvarové elektrody. Při kombinaci hrubovacího času a času zbytkového hrubování bylo zjištěno, že i u tohoto typu elektrody je výhodnější použít obrábění celou délkou břitu společně se zbytkovým hrubováním, které bylo vytvořeno pomocí strategie řádkovacího hrubování.



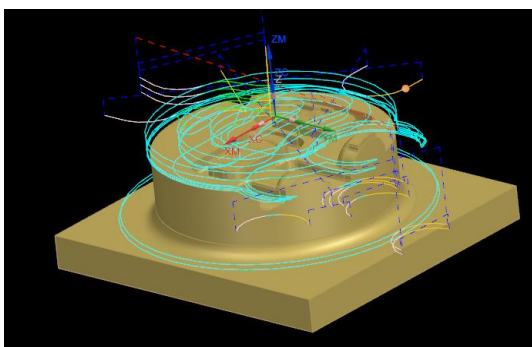
Obrázek 117: Dráhy frézování celou délkou břitu – malá tvarová elektroda [autor]



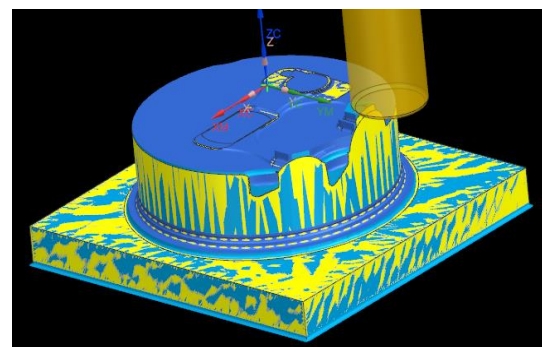
Obrázek 118: Simulace frézování celou délkou břitu – malá tvarová elektroda [autor]

Tab. 23: Čas frézování celou délkou břitu – malá tvarová elektroda [autor]

| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 20         | 2          | 0:01:46 (0:02:34) |



Obrázek 119: Dráhy zbytkového frézování – malá tvarová elektroda [autor]



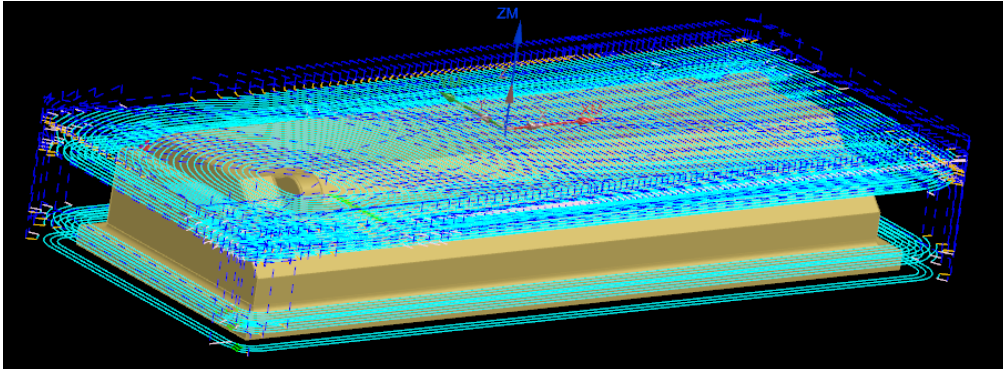
Obrázek 120: Simulace zbytkového frézování – malá tvarová elektroda [autor]

Tab. 24: Čas zbytkového frézování – malá tvarová elektroda [autor]

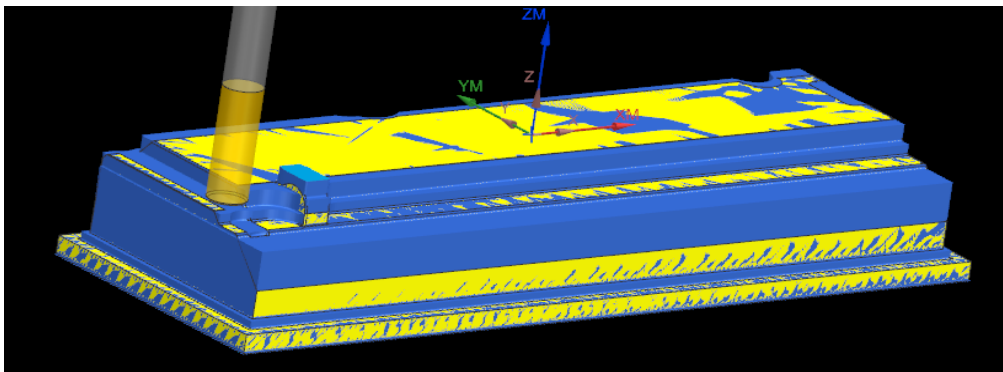
| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 1,5        | 5          | 0:00:30 (0:01:30) |

### Tvarová elektroda velkých rozměrů

Stejně jako u malé tvarové elektrody bylo frézování celou délkou břitu využito u tvarové elektrody velkých rozměrů. Zde je vidět větší příspěvek této strategie ke snížení celkového obráběcího času. Opět je k celkovému času připočten čas zbytkového hrubování, kdy jejich rozdělení je vidět níže.



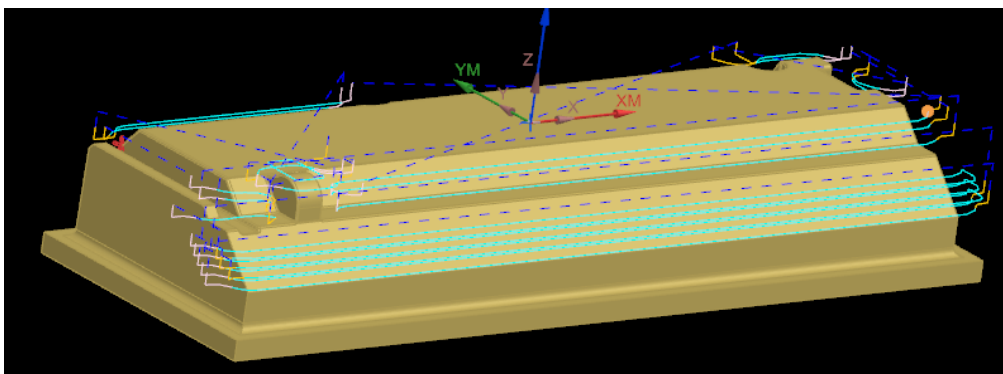
Obrázek 121: Dráhy frézování celou délkou břitu – velká tvarová elektroda [autor]



Obrázek 122: Simulace frézování celou délkou břitu – velká tvarová elektroda [autor]

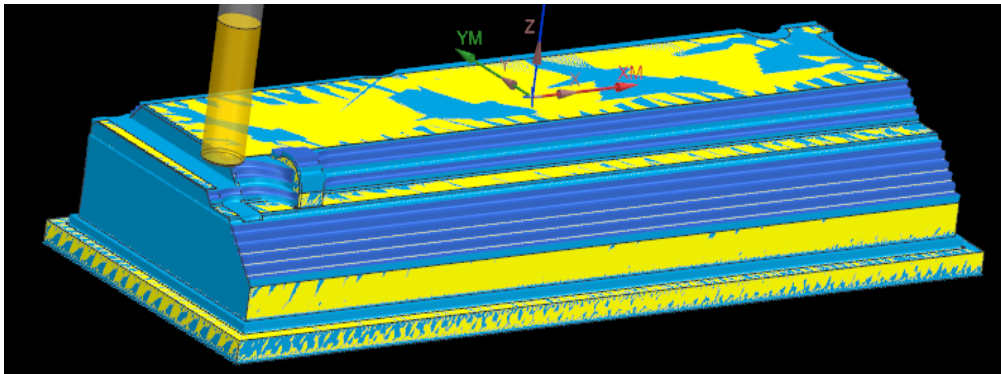
Tab. 25: Čas frézování celou délkou břitu – velká tvarová elektroda [autor]

| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 20         | 2          | 0:12:50 (0:19:15) |



Obrázek 123: Dráhy zbytkového frézování – velká tvarová elektroda [autor]





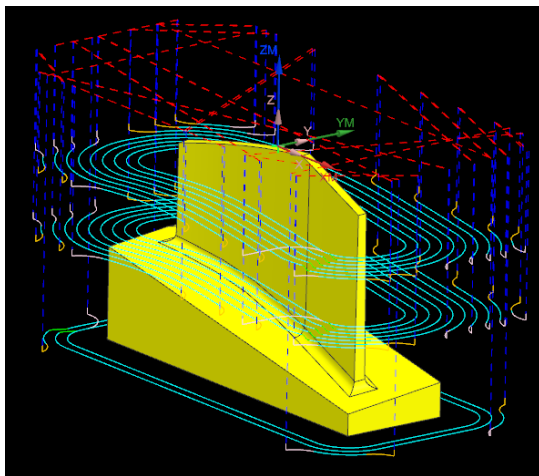
Obrázek 124: Simulace zbytkového frézování – velká tvarová elektroda [autor]

Tab. 26: Čas zbytkového frézování – velká tvarová elektroda [autor]

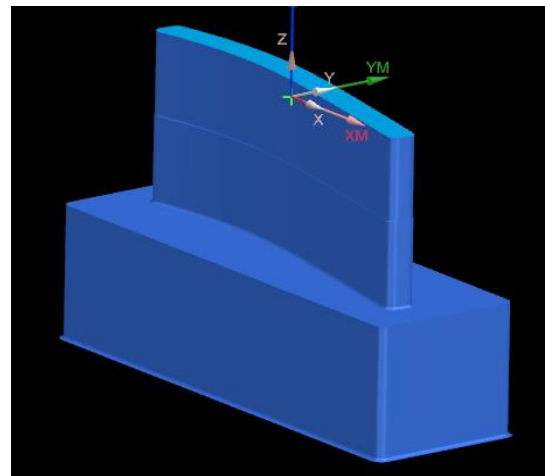
| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 2          | 5          | 0:03:22 (0:05:03) |

### Elektroda pro obrábění žeber

Jako poslední implementací této obráběcí strategie byla zvolena žebrová elektroda. Znovu bylo použito frézování celou délkou břitu, kdy i v tomto případě přispělo ke značnému snížení obráběcího času. Také zde bylo použito zbytkové hrubování, kdy je čas frézování celou délkou břitu a dohrubování rozdělen v tabulkách níže.



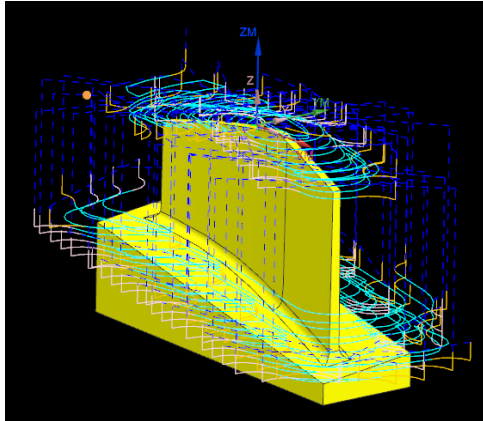
Obrázek 125: Dráhy frézování celou délkou břitu – žebrová elektroda [autor]



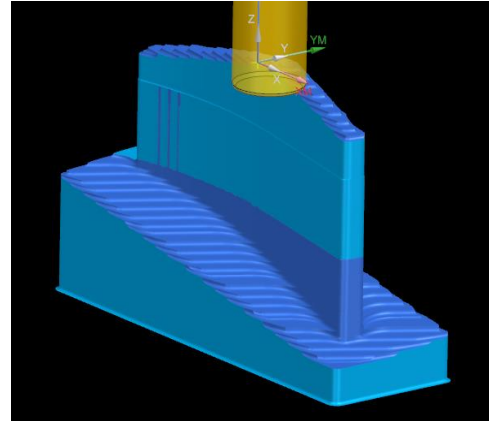
Obrázek 126: Simulace frézování celou délkou břitu – žebrová elektroda [autor]

Tab. 27: Čas frézování celou délkou břitu – žebrová elektroda [autor]

| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 20         | 2          | 0:00:40 (0:01:00) |



Obrázek 127: Dráhy zbytkového frézování – žebrová elektroda [autor]



Obrázek 128: Simulace zbytkového frézování – žebrová elektroda [autor]

Tab. 28: Čas zbytkového frézování– žebrová elektroda 1 [autor]

| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 1          | 5          | 0:00:15 (0:00:23) |

Tab. 29: Čas zbytkového frézování– žebrová elektroda 2 [autor]

| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [h:min:s]     |
|------------|------------|-------------------|
| 0,5        | 5          | 0:00:38 (0:00:57) |

Bohužel, při praktickém experimentu docházelo za tohoto bočního kroku nástroje k uvolňování obrobku, a tudíž musel být snížen z 20 % na 5 % průměru nástroje. Změny časů po úpravě tohoto parametru jsou vidět níže.

U velké tvarové elektrody byl boční krok zmenšen jen na 10 % průměru nástroje, jelikož byl obrobek upnut pomocí šroubů, a tudíž by měl vydržet větší síly než ostatní obráběné elektrody.

Tab. 30: Čas hrubování po úpravě bočního kroku [autor]

| Elektroda               | Čas – boční krok 20 % [h:min:s] | Čas – boční krok 5 % [min:s] |
|-------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Malá tvarová elektroda  | 01:46 (02:34)                   | 03:42 (05:33)                |
| Velká tvarová elektroda | 12:50 (19:15)                   | 24:51 (37:17)                |
| Žebrová elektroda       | 00:40 (01:00)                   | 02:26 (03:39)                |

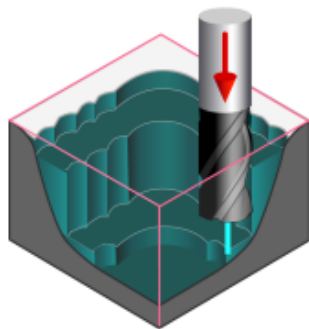
Tab. 31: Celkové časy po úpravě bočního kroku [autor]

| Elektroda               | Čas – boční krok 20 % [min:s] | Čas – boční krok 5 % [min:s] |
|-------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Malá tvarová elektroda  | 02:16 (03:24)                 | 04:33 (06:50)                |
| Velká tvarová elektroda | 16:12 (24:18)                 | 29:19 (43:58)                |
| Žebrová elektroda       | 01:33 (02:20)                 | 03:37 (04:59)                |

### 6.1.3.3. Strategie plunge milling

Mezi jednotlivými optimalizacemi se vyskytla možnost použít obráběcí strategii „plunge milling“. Jedná se o odvrtávací strategii, při které nástroj koná obráběcí pohyb ve směru své osy.

Strategie ponorného frézování se projevila jako nevhodný krok, protože její největší účinek je vidět při hrubovacím obrábění hlubokých míst, kdy k jejich kompletnímu obrobení je nutný dlouhý nástroj. Poznatek o obráběcí strategii je v rozporu s výrobou elektrod, jelikož v mnoha případech je vzhled elektrody přesným opakem a elektroda je negativem této dutiny.



#### **Plunge Milling**

Roughs a contoured shape by cutting along the tool axis in successive plunge motions.

Part and blank geometry are defined the same as in Cavity Milling.

Recommended for efficiently roughing out large volumes of material in deep areas that require a long tool and increased rigidity.

*Obrázek 129: Ukázka a anglický popis strategie „Plunge milling“ v programu Siemens NX [autor]*

### 6.1.3.4. Souhrn výsledků – optimalizace obráběcí strategie

V této kapitole lze nalézt veškeré výsledky zjištěné při změnách a optimalizacích obráběcích strategií.

Byla provedena změna směru frézování a zkoumán její vliv na obrábění. Bylo zjištěno, že díky plynulejším přechodům se čas simulace nemusel násobit koeficientem o velikosti 2, ale stačilo ho vynásobit koeficientem 1,5.

Po změně směru obrábění byla provedena změna celkové obráběcí strategie, při které se začalo zkoušet obrábět celou délkou břitu. Díky omezujícím silovým podmínkám byla už simulace vytvořena s redukovanými řeznými podmínkami, jež se lišily od popisu v katalogu od výrobce nástrojů.

Po praktickém experimentu bylo zjištěno, že se boční krok z již snížených 20 % musel dále snížit na 5 %. To mělo za následek skokový nárůst času při frézování celou délkou břitu nástroje.

Jako poslední možný krok bylo zvažováno použití obráběcí strategie „Plunge milling“. Odvrtávací strategie byla po prvním vyzkoušení označena jako nevhodná z důvodů popsanych výše, a tudíž se v této práci nenachází žádné údaje o obráběcích časech nebo řezných podmínkách.

*Tab. 32: Porovnání celkových časů po změně směru obrábění [autor]*

| Elektroda               | Čas – Před změnou [min:s] | Čas – Po změně [min:s] |
|-------------------------|---------------------------|------------------------|
| Malá tvarová elektroda  | 02:27 (4:54)              | 02:21 (3:31)           |
| Velká tvarová elektroda | 20:19 (40:36)             | 18:27 (27:41)          |
| Žebrová elektroda       | 02:32 (5:04)              | 02:25 (3:38)           |

*Tab. 33: Porovnání celkových časů řádkového hrubování a hrubování celým břitem nástroje (doporučené podmínky) [autor]*

| Elektroda               | Čas – hrubování řádkováním [min:s] | Čas – boční krok 20 % [min:s] |
|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| Malá tvarová elektroda  | 02:21 (3:31)                       | 02:16 (03:24)                 |
| Velká tvarová elektroda | 18:27 (27:41)                      | 16:12 (24:18)                 |
| Žebrová elektroda       | 02:25 (3:38)                       | 01:33 (02:20)                 |

*Tab. 34: Porovnání celkových časů řádkového hrubování a hrubování celým břitem nástroje (použitelné podmínky) [autor]*

| Elektroda               | Čas – hrubování řádkováním [min:s] | Čas – boční krok 5 % [min:s] |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Malá tvarová elektroda  | 02:21 (3:31)                       | 04:33 (06:50)                |
| Velká tvarová elektroda | 18:27 (27:41)                      | 29:19 (0:43:58)              |
| Žebrová elektroda       | 02:25 (3:38)                       | 03:37 (04:59)                |

#### 6.1.4. Změna nástroje

Pro konečnou optimalizaci byla vybrána celková změna nástroje. Válcová monolitní fréza o průměru 10 mm byla vyměněna za plátkovou frézu o průměru 12 mm, kdy také byl snížen počet břitů dva.


*Obrázek 130: Ukázka plátkové frézy [autor]*

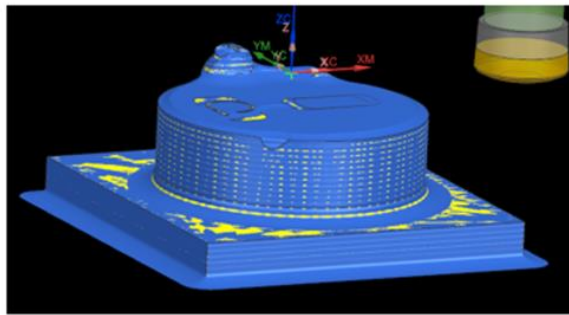
Pro generování simulací a samotné obrábění byly zvoleny řezné podmínky, které se nachází v tabulce níže. Tyto řezné podmínky byly aplikovány na všechny tři druhy elektrod a byly zvoleny s ohledem na obráběcí nástroj a samotný obráběcí stroj.

Tab. 35: Řezné podmínky pro plátkovou frézu [autor]

| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Otáčky vřetene [ $min^{-1}$ ] | Rychlost posuvu – Vf [ $\frac{mm}{min}$ ] |
|------------|------------|-------------------------------|---|
| 0,75       | 6          | 6 000                         | 8 000                                     |

#### Tvarová elektroda malých rozměrů

Opět jako první pro tuto optimalizaci byla zvolena malá tvarová elektroda. Je vidět, že díky omezujícím podmínkám nástroje se čas sice prodloužil, ale odpadá jakékoliv zbytkové hrubování z důvodu malé hloubky řezu a zaoblení nástroje.

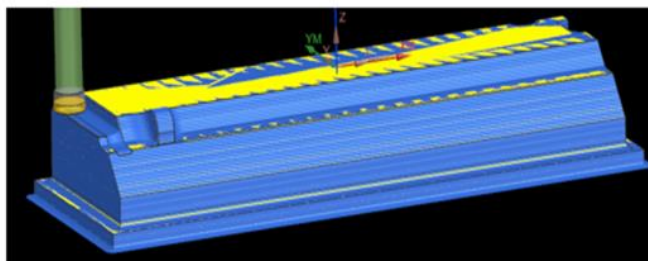


| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [min:s]   |
|------------|------------|---------------|
| 0,75       | 6          | 05:50 (13:40) |

Obrázek 131: Simulace obrábění pomocí plátkové frézy a celkový čas – malá tvarová elektroda [autor]

#### Tvarová elektroda velkých rozměrů

Stejně dopadla i velká tvarová elektroda, u které opět stoupl čas, ale jako v předchozím případě kompletně odpadlo zbytkové hrubování větším nástrojem.



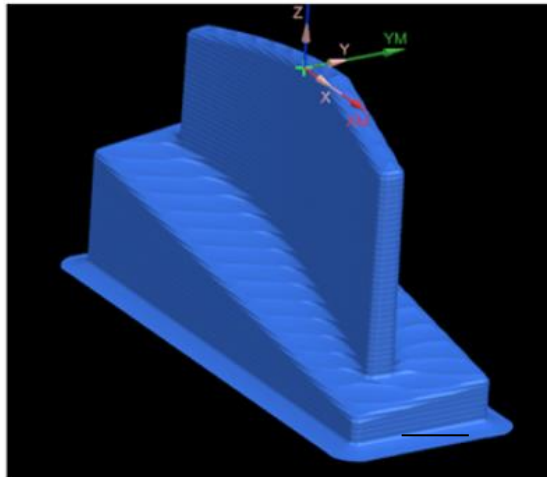
| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [min:s]   |
|------------|------------|---------------|
| 0,75       | 6          | 27:16 (40:54) |

Obrázek 132: Simulace obrábění pomocí plátkové frézy a celkový čas – velká tvarová elektroda [autor]

### Elektroda pro obrábění žeber

Jako poslední je řešeno zavedení tohoto optimalizačního kroku u žebrové elektrody. Opět je v tomto případě ponechán větší přídavek na dokončení. Přídavek je větší, aby při dokončovacích operacích nedošlo k celkovému odlomení žebra vlivem vibrací.

Z obrázku simulace toho obrábění je vidět, že nástroj díky zaoblení plátek a malé hloubce řezu dokonale vyhruboval celou elektrodu. Čas této obráběcí operace je poněkud vyšší, než tomu bylo u předchozí optimalizace.



| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Čas [min:s]   |
|------------|------------|---------------|
| 0,75       | 6          | 06:52 (10:18) |

Obrázek 133: Simulace obrábění pomocí plátkové frézy a celkový čas – žebrová elektroda [autor]

#### 6.1.4.1. Souhrn výsledků

Z výsledků, které byly zjištěny při změně nástroje vyplývá, že se sice zvýšil obráběcí čas, ale naopak se více sjednotily přídavky na dokončení elektrody. Zvýšení času nastalo díky snížení hloubky řezu, přičemž hloubka řezu nemůže být větší než 0,75 mm. Toto omezení vyplývá z tvaru břitových destiček.

I když jsou ve všech případech frézovací časy větší, z ekonomického hlediska by to neměl být problém. Zvýšení času by mělo být vykompenzováno mnohem nižší cenou tohoto nástroje. Ekonomická otázka bude řešena v dalších kapitolách.

Tab. 36: Souhrn výsledků – plátková fréza [autor]

| Elektroda               | Čas – hrubování plátkovou frézou [min:s] |
|-------------------------|--|
| Malá tvarová elektroda  | 05:30 (8:15)                             |
| Velká tvarová elektroda | 27:16 (40:54)                            |
| Žebrová elektroda       | 06:52 (10:18)                            |

## 6.2. Změna upínacího systému

Po analýze předchozích kapitol bylo zjištěno, že veškeré omezující podmínky, které se týkají působení sil při obrábění, lze teoreticky eliminovat změnou upínacího systému obrobku.

V tuto chvíli se pro upnutí menších a středních elektrod používá lepidlo a speciálně připravená kostka. Na tuto kostku je nalepen polotovár, a kostka s polotovarem je upnuta do držáku EROWA. Způsob upnutí není schopen přenášet velké síly při obrábění, kdy se obrábí celou délkou břitu. Problém nastává při zvolení doporučeného bočního kroku nástroje dle výrobce. Při nastavení těchto řezných podmínek dochází k uvolnění obrobku a jeho následné destrukci.

Problém s řeznou silou by se dal vyřešit použitím svěráku. Díky upnutí do svěráku by mohly být použity řezné podmínky doporučené výrobcem. Tyto podmínky by výrazně snížily hrubovací časy, viz optimalizace v předchozích kapitolách. V tuto chvíli je obrobek při obrábění celou délkou břitu schopen snést boční krok pouze 5 % průměru nástroje. Doporučený boční krok je dle výrobce 20 až 25 % průměru nástroje (viz kapitola pojednávající o tomto stylu obrábění).

Pro následné zajištění elektrody do držáku EROWA by musel být upraven výrobní postup výroby elektrody a velikost polotovaru. Místo přídavku 5 mm na výšku by bylo nutné přídavek zvětšit na 10 až 15 mm. Toto by zapříčinilo zvýšení ceny polotovaru. Konkrétní navýšení ceny u obráběných elektrod je vypočteno v kapitole zabývající se tímto problémem.

Také by se prodloužil samotný obráběcí proces. Navýšení by bylo z důvodu nutnosti zarovnání polotovaru elektrody z jedné strany. Následně by bylo nutné vyvrtat čtyři díry, do kterých by pak byl vyříznut závit pro šroub. Poté by byl polotovar vyjmut ze svěráku, otočen a znovu upevněn do stroje. Následné obrábění by proběhlo stejně jako v kapitolách o optimalizacích. Boky polotovaru nemusí být zarovnané, jelikož díky zvětšenému přídavku je vytvořen na elektrodě najížděcí rámeček. Pomocí rámečku si hloubící centrum samo zkoriguje natočení upnuté elektrody.

Pro tyto účely by bylo možné použít svěrák VMP – 6 (ukázka níže), jehož cena se pohybuje okolo 23 000 Kč.



Obrázek 134: Strojní modulární svěrák VMP – 6 [32]

### 6.3. Frézování elektrod – pětiosá frézka

Po optimalizaci řezných podmínek a obráběcích strategií na konkrétním tříosém stroji byla ještě navržena varianta pětiosého obrábění. Jelikož nebylo možné vypracovat praktickou část, byl vypracován teoretický experiment, který by mohl alespoň pomocí simulací naznačit, zda není výhodnější pořídit místo tříosé frézky frézku pětiosou.

Simulace jsou vytvořeny s předpokladem, že i když se jedná o frézku pětiosou, tak v porovnání se současným strojem bude přesnost a tuhost vyšší. Díky tomuto předpokladu se budou moci použít hrubší řezné podmínky.

Dále byly pro experiment vybrány elektrody větších rozměrů, kdy bylo na původním stroji nutné obrobek přeupínat. Manipulace s obráběnou součástí zvyšovala celkový obráběcí čas až o 20 minut.

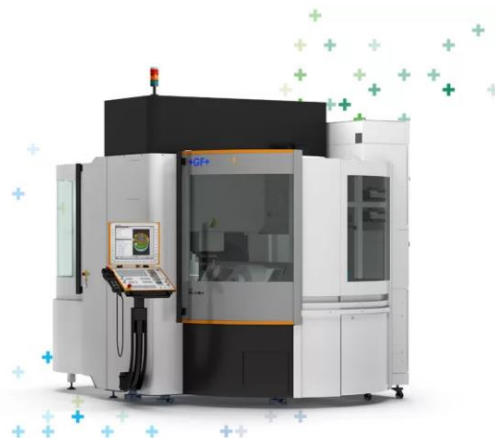
#### 6.3.1. Výběr nástroje

Nástroj pro simulaci bude stejný, jako byl použit pro praktický experiment u tříosého frézování. Jedná se o válcovou frézu s rádiusem o průměru 10 mm. Řezné podmínky pro daný nástroj byly upraveny dle katalogu od výrobce. Pro vytvoření simulace byly využity veškeré poznatky, které byly zjištěny z praktických experimentů.

#### 6.3.2. Teoretický výběr stroje

Ve firmě Bronas se v tuto chvíli nachází pětiosá frézka značky „GF Mikron“. Zmíněný stroj je určen k obrábění kovových součástí, ale společnost GF vyrábí variantu uzpůsobenou pro obrábění grafitu.

Stroj byl vybrán z důvodu, že má firma ekonomická data (pořizovací cena, HRS atd.) varianty stroje pro obrábění kovových dílů. Díky tomu není nutné zjišťovat pořizovací cenu u této společnosti a k HRS je pouze připočtena přírážka, která by měla pokrýt úpravy stroje. Úprava stroje spočívá v tom, že se uzpůsobí pro obrábění elektrod (odsávání atd.).



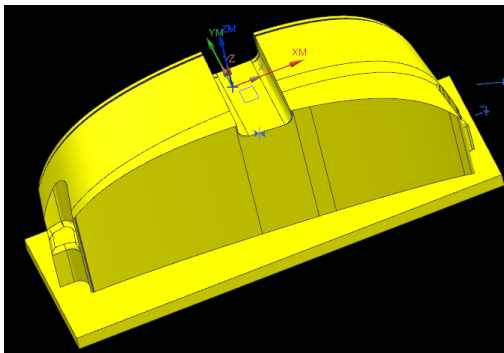
Obrázek 135: Pětiosá frézka Mikron S U Series [31]



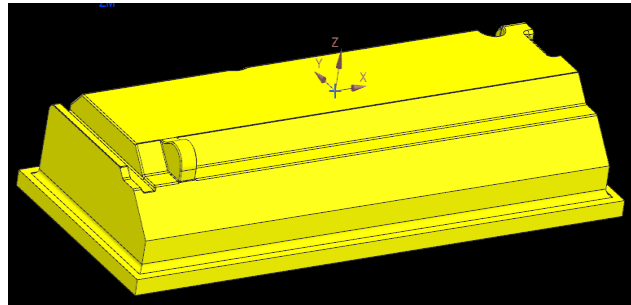
### 6.3.3. Elektrody vybrané pro optimalizaci

Pro účel optimalizace byly vybrány tři specifické elektrody větších rozměrů. U těchto elektrod byla řešena nutnost použití delších nástrojů, nebo specifika daná jejich velkými rozměry. U jedné je to kombinace obou problémů zároveň. Obráběcí programy jsou tvořeny od nejmenší elektrody po největší.

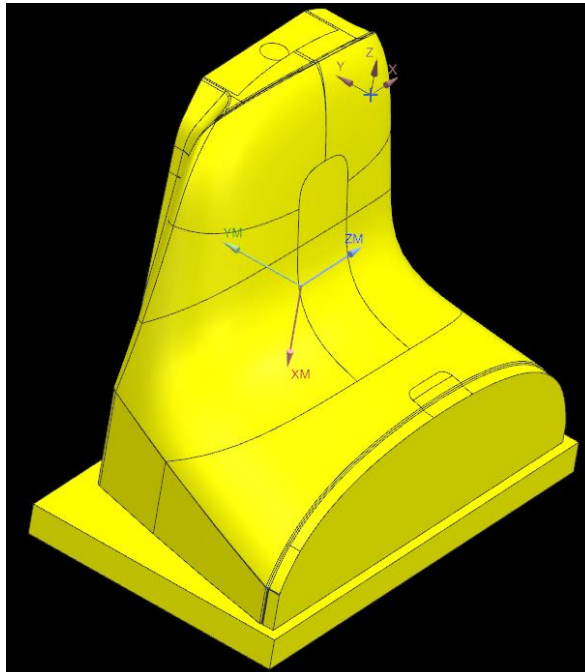
V případě pětiosého frézování byla také řešena problematika přepínání obrobku. Problém vzniká v případech, kdy ani dlouhý nástroj není dostatečný k perfektnímu obrobení součásti. Z tohoto důvodu musí být frézovaný díl přepnut. Tyto kroky mezi obráběcími operacemi navyšují celkový obráběcí čas až o 20 minut. Navýšení nastává z důvodu nutnosti opětovného najetí. Jev je nejvíce vidět zejména u dokončovacích operací, ale vyskytuje se i u hrubovacího frézování.



Obrázek 136: Pětiosé obrábění – elektroda č. 1 [autor]



Obrázek 137: Pětiosé obrábění – elektroda č. 2 [autor]



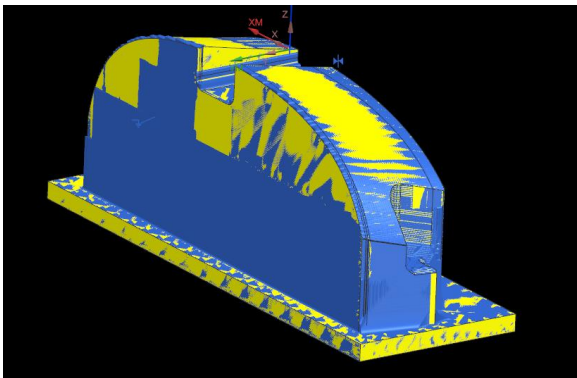
Obrázek 138: Pětiosé obrábění – elektroda č. 3 [autor]

### 6.3.3.1. Optimalizace obrábění elektrody – tvarová elektroda malých rozměrů

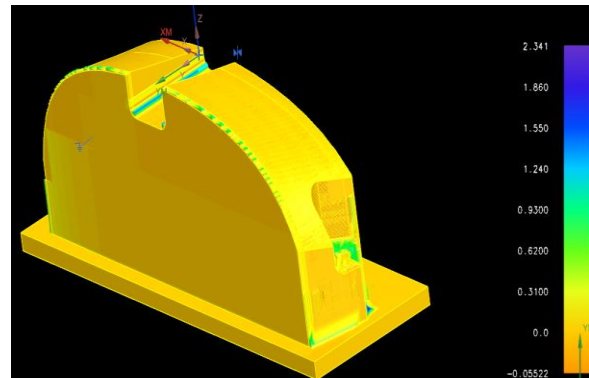
Jak už je z názvu poznat, tak jako první byla vybrána elektroda č. 1. Elektroda je nejmenší ze všech tří. Při obrábění na tříosé frézce bylo nutné použít delší nástroje, a tudíž byly použity i mírnější řezné podmínky. Zároveň se zvýšily při tomto obrábění náklady na nástroje. Je to z důvodu vyšší ceny nástrojů s větší celkovou délkou nástroje a délkou břitu. Cenové navýšení je následně řešeno v kapitole, která pojednává o kalkulaci nákladů. Také je zde použita varianta, kdy polotovary pro elektrody nejsou přilepené na kostkách, ale jsou upnuty do svěráku.

Tříosé hrubovací obrábění bylo přetvořeno na pětiosé indexované a byla porovnávána úspora obráběcího času. Elektroda se z důvodu dostatečné délky nástrojů nemusela přeupínat, proto do výsledných časů není započítán čas nutný na přeupnutí obrobku a následné najetí.

Dále zde není tak extrémní úspora času u hrubovacího obrábění. Spíše se efekt indexovaného obrábění projeví u dokončovacích operaci, které v této práci nejsou řešeny. Příklad je na důležitých plochách jednotný a měl by být pro dokončení této elektrody dostačující.



Obrázek 139: Simulace obrábění elektrody 1 [autor]



Obrázek 140: Analýza obrábění elektrody 1 [autor]

Tab. 37: Porovnání časů tříosého a pětiosého obrábění – elektroda 1 [autor]

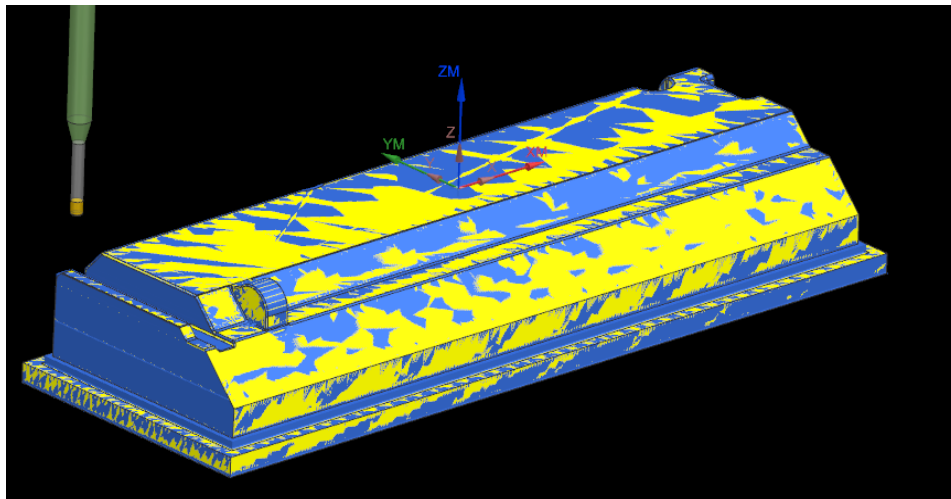
| Čas hrubování – tříosé frézování [min:s] | Čas hrubování – pětiosé frézování [min:s] |
|--|---|
| 27:13 (40:50)                            | 12:32 (15:03)                             |

### 6.3.3.2. Optimalizace obrábění elektrody – tvarová elektroda velkých rozměrů

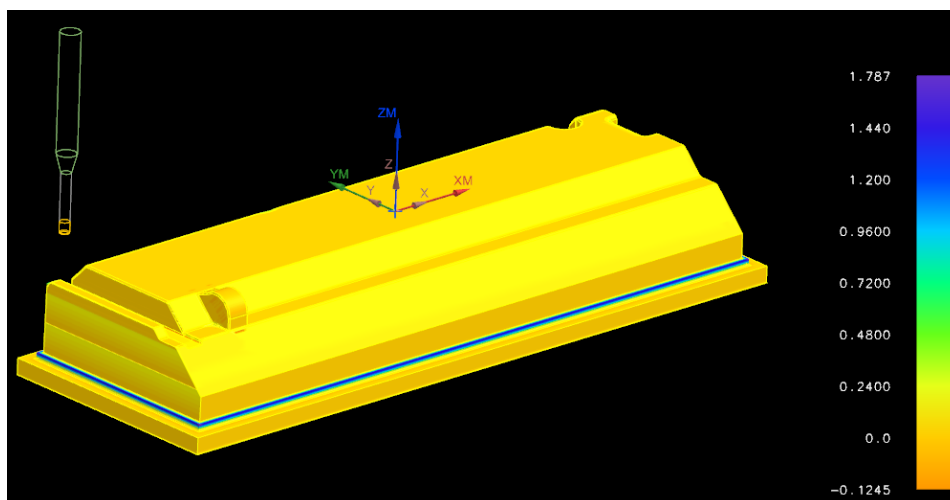
Jako další je na řadě elektroda, která už byla optimalizována při tříosém frézování. V této kapitole bude snaha o další optimalizační kroky, které by mohly vést k ještě rychlejšímu vyrobení této elektrody.

Simulace se liší i v tom, že bylo optimalizováno hrubování menšími nástroji. V předešlé simulaci by to větší snížení času nepřineslo, ale v této už je pokles obráběcího času znatelnější, viz následující tabulka.

Koeficienty pro přepočet na reálný čas jsou stejné jako v předešlé optimalizaci. Koeficient pro přepočet se vztahuje i na obrábění menšími nástroji.



Obrázek 141: Simulace obrábění elektrody 2 [autor]



Obrázek 142: Analýza obrábění elektrody 2 [autor]

Tab. 38: Porovnání časů tříosého a pětiosého obrábění – elektroda 2 [autor]

| Čas hrubování – tříosé frézování [min:s] | Čas hrubování – pětiosé frézování [min:s] |
|--|---|
| 18:27 (27:41)                            | 08:10 (9:48)                              |

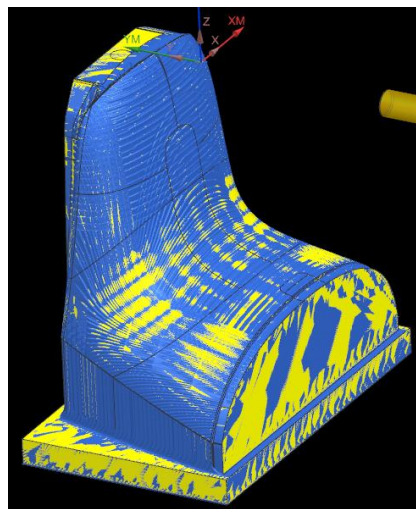
### 6.3.3.3. Optimalizace obrábění elektrody – tvarová elektroda atypických rozměrů

Poslední zkušební optimalizace pětiosého frézování byla provedena na elektrodě velkých rozměrů. U elektrody nastal problém v tom, že nebylo možné použít nástroje krátkých délek. Díky tomu musela být elektroda několikrát přeupnuta a znovu najeta. Tyto operace trvaly okolo 20 minut.

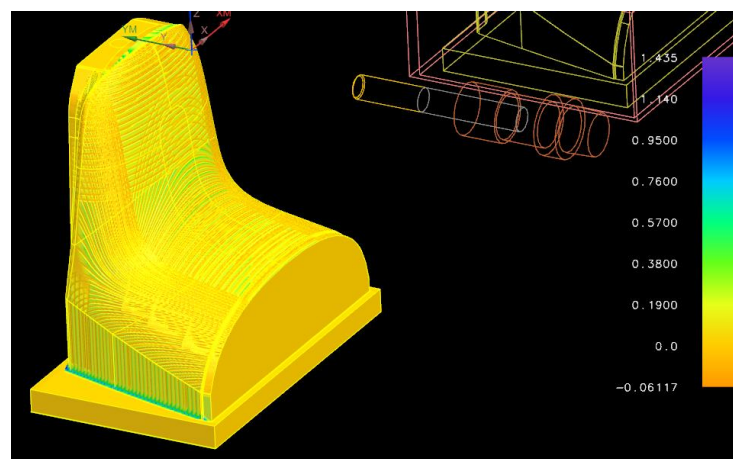
Dále musely být na původní frézce upraveny řezné podmínky tak, aby nenastalo rozvibrování nástroje. Rozvibrování bylo způsobeno velkým vysunutím nástroje.

Pro obrobení byly vybrány nejlépe vycházející optimalizace z předešlých kapitol. Jako hlavní obráběcí strategie dle simulace se u tohoto typu elektrody osvědčilo obrábění celým břitem frézy.

Přidavky na dokončení byly dostatečné a veškeré výraznější schody byly začištěny. Opět je zde řešen příspěvek pětiosého obrábění pouze u hrubování, i když by přidání dalších dvou os výrazně snížilo časy i dokončovacích operací.



Obrázek 143: Simulace obrábění elektrody 3 [autor]



Obrázek 144: Analýza obrábění elektrody 3 [autor]

Tab. 39: Porovnání časů tříosého a pětiosého obrábění – elektroda 3 [autor]

| Čas hrubování – tříosé frézování [h:min:s] | Čas hrubování – pětiosé frézování [h:min:s] |
|--|---|
| 04:15:39 (06:23:24)                        | 0:39:25 (0:47:18)                           |

## 6.4. Ekonomické kalkulace optimalizací

V předchozích kapitolách byly provedeny optimalizace hrubovacího obráběcího procesu výroby grafitových elektrod. Byly sníženy obráběcí časy u tříosého frézování, a následně byl proveden teoreticky experiment, který využívá pětiosého obrábění.

V této kapitole jsou veškeré tyto poznatky shrnuty a jsou ekonomicky vyčísleny veškeré časové úspory. Pro kalkulace jsou použity reálné časy (časy v závorkách).

Dále je zde řešeno zvětšení potřebného polotovaru při využití svěráku. Je zde vypočten rozdíl ceny polotovaru mezi stávajícím upnutím a navrhovanou optimalizací.

Hodinová nákladová sazba na tříosou frézku byla převzata od firmy Bronas. Pro určení sazby pro pětiosý obráběcí stroj byla použita sazba na stroj Mikron, který je určen pro obrábění kovových obrobků. K této sazbě byla následně připočtena odhadnutá hodnota, která zahrnuje úpravu stroje. Ta umožní obrábění grafitových elektrod.

Tab. 40: HRS – obráběcí stroje [autor]

| HRS – tříosý stroj [ $\frac{Kč}{h}$ ] | HRS – pětiosý stroj [ $\frac{Kč}{h}$ ] |
|---------------------------------------|--|
| 800                                   | 1 800                                  |

### 6.4.1. Ekonomická kalkulace – změna řezných podmínek

Většina provedených optimalizací se týkala obrábění pomocí válcové frézy o průměru 10 mm. Níže jsou vidět použité podmínky, které byly nastaveny před optimalizací.

Tab. 41: Válcová 10 – podmínky před optimalizací [autor]

| $A_p$ [mm] | $A_e$ [mm] | Otáčky vřetene [ $min^{-1}$ ] | Rychlost posuvu – $V_f$ [ $\frac{mm}{min}$ ] |
|------------|------------|-------------------------------|--|
| 1          | 2          | 8 000                         | 4 000  |

Pro všechny tři případy vyráběných elektrod byly vybrány nejlepší optimalizace, které řešily změnu řezných podmínek. Výsledný reálný čas je vždy porovnáván s původním obráběcí časem.

#### 6.4.1.1. Tvarová elektroda malých rozměrů

Jako nejvýhodnější optimalizace řezných podmínek pro grafitovou elektrodu tohoto typu byla zvolena níže popsaná v tabulce. Z časových hodnot je vidět, že původní obráběcí čas jenom změnou těchto podmínek byl snížen více jak o jednu třetinu.

Dále byly provedeny výpočty finančních úspor. V tabulce je uveden čas potřebný na výrobu jedné elektrody, ale pro elektroerozivní hloubení jsou potřeba elektrody dvě. Z tohoto důvodu jsou výsledné uspořené náklady vynásobeny koeficientem o velikosti 2.

*Tab. 42: Porovnání – tvarová elektroda malých rozměrů [autor]*

|             | Stávající stav | Optimalizace |
|-------------|----------------|--------------|
| $A_p$ [mm]  | 1              | 2            |
| $A_e$ [mm]  | 2              | 5            |
| Čas [min:s] | 8:57 (17:54)   | 2:27 (4:54)  |

**Výpočet ušetřených nákladů:**

$$N_{SM} = HRS * t_{SM} = 800 \times 0,3 = 240 \text{ Kč} \quad \mathbf{1}$$

$$N_{CSM} = N_{SM} * 2 = 240 \times 2 = 480 \text{ Kč} \quad \mathbf{2}$$

$$N_{OM1} = HRS * t_{OM1} = 800 \times 0,082 = 65,60 \text{ Kč} \quad \mathbf{3}$$

$$N_{COM1} = N_{OM1} * 2 = 65,60 \times 2 = 131,20 \text{ Kč} \quad \mathbf{4}$$

$$N_{UM1} = N_{CSM1} - N_{COM1} = 480 - 131,20 = 348,80 \text{ Kč} \quad \mathbf{5}$$

**6.4.1.2. Tvarová elektroda velkých rozměrů**

Postup aplikovaný v předchozí kapitole byl použit i zde. Opět byl porovnán stávající stav a nejlepší možná optimalizace týkající se rezných podmínek. Následně byly vypočteny náklady na vyhrubování jednoho kusu a porovnány.

*Tab. 43: Porovnání – tvarová elektroda velkých rozměrů [autor]*

|               | Stávající stav      | Optimalizace      |
|---------------|---------------------|-------------------|
| $A_p$ [mm]    | 1                   | 2                 |
| $A_e$ [mm]    | 2                   | 4                 |
| Čas [h:min:s] | 01:01:12 (02:02:24) | 0:20:19 (0:40:36) |

$$N_{SV} = HRS * t_{SV} = 800 \times 2,04 = 1\,632 \text{ Kč} \quad \mathbf{6}$$

$$N_{CSV} = N_{SV} * 2 = 240 \times 2 = 3\,264 \text{ Kč} \quad \mathbf{7}$$

$$N_{OV1} = HRS * t_{OV1} = 800 \times 0,68 = 544 \text{ Kč} \quad \mathbf{8}$$

$$N_{COV1} = N_{OV1} * 2 = 544 \times 2 = 1\,088 \text{ Kč} \quad \mathbf{9}$$

$$N_{UV1} = N_{CSV} - N_{COV} = 3\,264 - 1\,088 = 2\,176 \text{ Kč} \quad \mathbf{10}$$

### 6.4.1.3. Elektroda pro obrábění žeber

Znovu byla vybrána nejvýhodnější proveditelná optimalizace. Následně pomocí HRS byly vypočteny náklady na výrobu elektrody a vypočtena ušetřená částka. Optimalizovaný čas zahrnuje i dohrubování

Tab. 44: Porovnání – Elektroda pro tvorbu žeber[autor]

|             | Stávající stav | Optimalizace |
|-------------|----------------|--------------|
| $A_p$ [mm]  | 1              | 2            |
| $A_e$ [mm]  | 2              | 5            |
| Čas [min:s] | 9:43 (19:23)   | 2:32 (5:04)  |

$$N_{S\check{z}} = HRS * t_{S\check{z}} = 800 \times 0,323 = 258,40 \text{ Kč} \quad 11$$

$$N_{CS\check{z}} = N_{S\check{z}} * 2 = 258,40 \times 2 = 516,80 \text{ Kč} \quad 12$$

$$N_{O\check{z}1} = HRS * t_{O\check{z}1} = 800 \times 0,084 = 67,20 \text{ Kč} \quad 13$$

$$N_{CO\check{z}1} = N_{O\check{z}1} * 2 = 67,20 \times 2 = 134,40 \text{ Kč} \quad 14$$

$$N_{U\check{z}1} = N_{CS\check{z}} - N_{CO\check{z}} = 516,80 - 134,40 = 382,40 \text{ Kč} \quad 15$$

### 6.4.2. Ekonomická kalkulace – změna směru obrábění

V kapitole je vypočten přínos změny směru obrábění na obousměrné. Následně je varianta porovnána s předešlou optimalizací, která byla počítána v minulé kapitole.

#### 6.4.2.1. Tvarová elektroda malých rozměrů

V tabulce č. 45 lze vidět, že i samotná změna obráběcího směru přinesla snížení obráběcího času. Konečný přínos byl vypočten a je prezentován pod již zmíněnou tabulkou.

Tab. 45 Porovnání – Tvarová elektroda malých rozměrů (změna směru obrábění) [autor]

|             | Stávající stav | Optimalizace |
|-------------|----------------|--------------|
| $A_p$ [mm]  | 2              | 2            |
| $A_e$ [mm]  | 5              | 5            |
| Čas [min:s] | 2:27 (4:54)    | 2:21 (3:31)  |

$$N_{OM2} = HRS * t_{OM2} = 800 \times 0,059 = 47,20 \text{ Kč} \quad 16$$

$$N_{COM2} = N_{OM2} * 2 = 47,20 \times 2 = 94,40 \text{ Kč} \quad 17$$

$$N_{UM2} = N_{COM1} - N_{COM2} = 131,20 - 94,40 = 36,80 \text{ Kč} \quad 18$$

#### 6.4.2.2. Tvarová elektroda velkých rozměrů

Stejný postup byl proveden i u tohoto typu elektrody. Opět je zde vidět časová úspora díky této změně.

Tab. 46: Porovnání – Tvarová elektroda velkých rozměrů (změna směru obrábění) [autor]

|               | Stávající stav     | Optimalizace       |
|---------------|--------------------|--------------------|
| $A_p$ [mm]    | 2                  | 2                  |
| $A_e$ [mm]    | 4                  | 4                  |
| Čas [h:min:s] | 0:20:19 (00:40:36) | 0:18:27 (00:27:41) |

$$N_{OV2} = HRS * t_{OV2} = 800 \times 0,48 = 368 \text{ Kč} \quad \mathbf{19}$$

$$N_{COV2} = N_{OV2} * 2 = 368 \times 2 = 736 \text{ Kč} \quad \mathbf{20}$$

$$N_{UV2} = N_{COV1} - N_{COV2} = 1\,088 - 736 = 352 \text{ Kč} \quad \mathbf{21}$$

#### 6.4.2.3. Elektroda pro obrábění žeber

Poslední výpočet se zabývá elektrodou pro obrábění žeber. Z porovnání jednotlivých optimalizací je patrné, že i zde došlo ke značnému snížení obráběcího času a díky tomu i ke snížení nákladů. Větší snížení je pozorovatelné u skutečného času obrábění.

Tab. 47: Porovnání – Elektroda pro tvorbu žeber[autor]

|             | Stávající stav | Optimalizace |
|-------------|----------------|--------------|
| $A_p$ [mm]  | 2              | 2            |
| $A_e$ [mm]  | 5              | 5            |
| Čas [min:s] | 2:32 (5:04)    | 2:25 (3:38)  |

$$N_{Ožz} = HRS * t_{Ožz} = 800 \times 0,061 = 48,80 \text{ Kč} \quad \mathbf{22}$$

$$N_{COžz} = N_{Ožz} * 2 = 48,80 \times 2 = 97,60 \text{ Kč} \quad \mathbf{23}$$

$$N_{Užz} = N_{COž1} - N_{COžz} = 134,40 - 97,60 = 36,80 \text{ Kč} \quad \mathbf{24}$$



### 6.4.3. Ekonomická kalkulace – obrábění celou délkou břitu nástroje

Kapitola se zabývá ekonomickými propočty úprav obráběcího procesu, kdy změna spočívá v tom, že se místo řádkovacího hrubování začalo používat obrábění celým břitem nástroje.

#### 6.4.3.1. Tvarová elektroda malých rozměrů – obrábění celou délkou břitu

U tohoto typu elektrod se obrábění celým břitem nástroje moc neosvědčilo, jelikož elektroda nemá žádné vyšší výstupky nebo samotná elektroda není příliš vysoká, tudíž výhoda obrábění celou délkou břitu zde odpadá, viz ekonomické propočty. V celkovém obráběcím času je připočteno i nutné dohrubování.

Tab. 48 Porovnání – Tvarová elektroda malých rozměrů (obrábění celou délkou břitu) [autor]

|             | Stávající stav | Optimalizace  |
|-------------|----------------|---------------|
| $A_p$ [mm]  | 2              | 20            |
| $A_e$ [mm]  | 5              | 2             |
| Čas [min:s] | 2:21 (3:31)    | 02:16 (03:24) |

$$N_{OM3} = HRS * t_{OM3} = 800 \times 0,057 = 45,60 \text{ Kč} \quad \mathbf{25}$$

$$N_{COM3} = N_{OM3} * 2 = 45,60 \times 2 = 91,20 \text{ Kč} \quad \mathbf{26}$$

$$N_{UM3} = N_{COM2} - N_{COM3} = 94,40 - 91,20 = 3,20 \text{ Kč} \quad \mathbf{27}$$

Ovšem díky omezujícím podmínkám, které pojednávají o velikosti maximální síly při obrábění, bylo nutné zmenšit boční krok nástroje. Velikost bočního kroku byla zjištěna experimentálně a při hloubce řezu vyšší než 15 mm lze maximálně použít 0,5 mm. Časy se tudíž výrazně prodloužily, a tím vzrostly i náklady oproti použitelné optimalizaci řádkového hrubování. Obráběcí čas se zvýšil přibližně dvojnásobně. Díky tomu jsou i náklady na výrobu dvakrát vyšší.

Tab. 49 Porovnání –  $A_e$  20 % a 5 % průměru nástroje (malá tvarová elektroda) [autor]

|             | Optimalizace  | Optimalizace  |
|-------------|---------------|---------------|
| $A_p$ [mm]  | 20            | 20            |
| $A_e$ [mm]  | 2             | 0,5           |
| Čas [min:s] | 02:16 (03:24) | 04:33 (06:50) |

#### 6.4.3.2. Tvarová elektroda velkých rozměrů – obrábění celou délkou břitu

U velké tvarové elektrody je nejvíce využito stylu obrábění celým břitem nástroje, kdy při použití této strategie značně klesne obráběcí čas, viz tabulka níže. Opět je do výsledného obráběcího času započtena i dohrubovací operace.

Tab. 50: Porovnání – Tvarová elektroda velkých rozměrů (obrábění celou délkou břitu) [autor]

|               | Stávající stav    | Optimalizace      |
|---------------|-------------------|-------------------|
| $A_p$ [mm]    | 2                 | 20                |
| $A_e$ [mm]    | 4                 | 2                 |
| Čas [h:min:s] | 0:18:27 (0:27:41) | 0:16:12 (0:24:18) |

$$N_{OV3} = HRS * t_{OV3} = 800 \times 0,27 = 216 \text{ Kč} \quad \mathbf{28}$$

$$N_{COV3} = N_{OV3} * 2 = 216 \times 2 = 432 \text{ Kč} \quad \mathbf{29}$$

$$N_{UV3} = N_{COV2} - N_{COV3} = 736 - 432 = 304 \text{ Kč} \quad \mathbf{30}$$

Zde se také značně projeví omezující podmínka z pohledu obráběcích sil. Opět se hrubovací čas značně prodloužil, a tudíž je opět výhodnější použít optimalizovaného řádkovacího hrubování. V této optimalizaci je boční krok snížen pouze na 10 % průměru nástroje.

Tab. 51 Porovnání –  $A_e$  20 % a 10 % průměru nástroje (velká tvarová elektroda) [autor]

|               | Optimalizace       | Optimalizace      |
|---------------|--------------------|-------------------|
| $A_p$ [mm]    | 20                 | 20                |
| $A_e$ [mm]    | 2                  | 1                 |
| Čas [h:min:s] | 0:16:12 (00:24:18) | 0:29:19 (0:43:58) |

#### 6.4.3.3. Elektroda pro obrábění žeber – obrábění celou délkou břitu

Stejně jako u velké tvarové elektrody je zmíněný způsob hrubování vhodný i pro elektrodu sloužící k obrábění žeber. I zde je vidět značná úspora času po zavedení této optimalizace. V celkovém čase je započteno i potřebné dohrubování.

Tab. 52: Porovnání – Elektroda pro tvorbu žeber (obrábění celou délkou břitu) [autor]

|             | Stávající stav | Optimalizace  |
|-------------|----------------|---------------|
| $A_p$ [mm]  | 2              | 20            |
| $A_e$ [mm]  | 5              | 2             |
| Čas [min:s] | 2:25 (3:38)    | 01:33 (02:20) |

$$N_{Ož3} = HRS * t_{Ož3} = 800 \times 0,026 = 20,80 \text{ Kč} \quad \mathbf{31}$$

$$N_{COž3} = N_{Ož3} * 2 = 20,80 \times 2 = 41,60 \text{ Kč} \quad \mathbf{32}$$

$$N_{Už3} = N_{COž2} - N_{COž3} = 97,60 - 41,60 = 56 \text{ Kč} \quad \mathbf{33}$$

Opět musel být snížen boční krok kvůli omezující silové podmínce. Obráběcí čas znovu stoupl, a díky tomu je optimalizace nepoužitelná i u žebrové elektrody, viz tabulka níže.

Tab. 53 Porovnání –  $A_e$  20 % a 5 % průměru nástroje (Elektroda pro obrábění žeber) [autor]

|             | Optimalizace  | Optimalizace  |
|-------------|---------------|---------------|
| $A_p$ [mm]  | 20            | 20            |
| $A_e$ [mm]  | 2             | 0,5           |
| Čas [min:s] | 01:33 (02:20) | 03:37 (04:59) |

#### 6.4.4. Změna upínacího systému – náklady na polotovary

Změna upínacího systému byla řešena už v předešlé kapitole. Pokud by se elektrody začaly frézovat upnuté ve svěráku, tak by odpadla omezující podmínka z hlediska maximální obráběcí síly. To by umožnilo použití obrábění celou délkou břitu nástroje.

Ovšem změna upnutí by zapříčinila i to, že by se vyfrézované elektrody musely upínat do držáků od hloubícího stroje pomocí šroubů. To znamená, že je nutné z druhé strany polotovaru vyřezat závity pro šrouby. Čas této operace je v porovnání se samotným frézováním zanedbatelný, ale je nutné počítat s větší velikostí polotovaru, kdy se specificky jedná o výšku polotovaru. V tuto chvíli jsou na venkovní rozměry přídávky 5 mm. Pokud by se zavedlo frézování ve svěráku, tak by na výšku polotovaru musel být přírůstek min. 15 mm (o 10 mm větší).

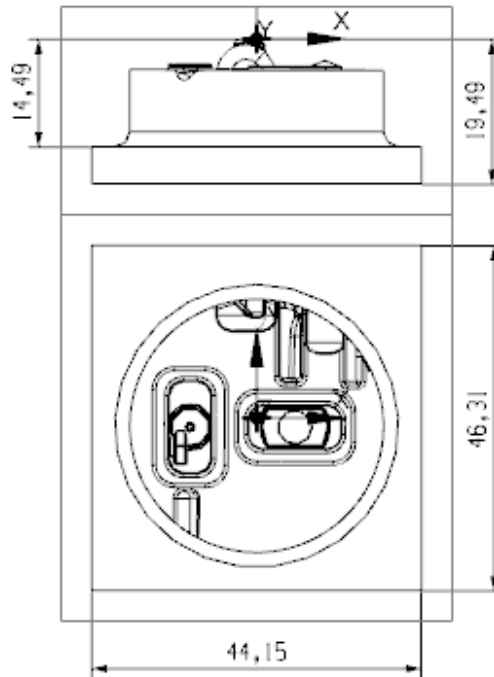
V kapitole je vypočteno o kolik by změna upínacího systému zvýšila náklady na výrobu jedné sady grafitových elektrod. Změna polotovaru se týká pouze malé tvarové elektrody a elektrody pro obrábění žeber. Velká tvarová elektroda je již tímto způsobem upnuta do svěráku hloubícího stroje.

##### 6.4.4.1. Malá tvarová elektroda – výpočet polotovaru

V této kapitole je vypočtena cena původního polotovaru a porovnána s novým polotovarem.

Tab. 54: Cena a rozměry původního polotovaru – malá tvarová elektroda [autor]

| Cena grafitu [ $\frac{Kč}{dm^3}$ ] | A [mm] | B [mm] | C [mm] |
|------------------------------------|--------|--------|--------|
| 1500                               | 44,15  | 46,31  | 19,49  |



Obrázek 145: Rozměry malé tvarové elektrody [autor]

Tab. 55: Rozměry s přídávky – malá tvarová elektroda [autor]

| $A_{PM}$ [mm] | $B_{PM}$ [mm] | $C_{PM}$ [mm] | $C_{OM}$ [mm] |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 49,15         | 51,31         | 24,49         | 34,49         |

$$V_{PM} = \frac{(A_P \cdot B_P \cdot C_P)}{1\,000\,000} = \frac{(49,15 \cdot 51,31 \cdot 24,49)}{1\,000\,000} = 0,062 \text{ dm}^3 \quad 34$$

$$V_{OM} = \frac{(A_P \cdot B_P \cdot C_P)}{1\,000\,000} = \frac{(49,15 \cdot 51,31 \cdot 34,49)}{1\,000\,000} = 0,087 \text{ dm}^3 \quad 35$$

$$P_{PM} = 0,062 \cdot 1500 = 92,64 \text{ Kč} \quad 36$$

$$P_{OM} = 0,087 \cdot 1500 = 130,47 \text{ Kč} \quad 37$$

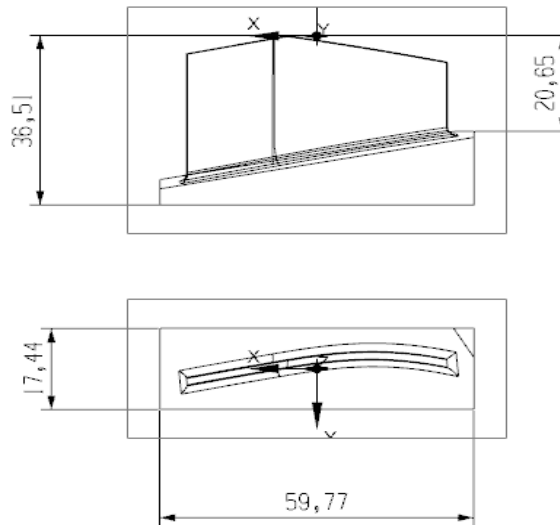
$$P_{ZNM} = 130,47 - 92,60 = 37,83 \text{ Kč} \quad 38$$

#### 6.4.4.2. Elektroda pro výrobu žeber – výpočet polotovaru

Kapitola shrnuje veškeré výpočty týkající se elektrody pro obrábění žeber.

Tab. 56: Cena a rozměry původního polotovaru – Elektroda pro výrobu žeber [autor]

| Cena grafitu [ $\frac{Kč}{dm^3}$ ] | A [mm] | B [mm] | C [mm] |
|------------------------------------|--------|--------|--------|
| 1500                               | 59,77  | 17,44  | 36,51  |



Obrázek 146: Rozměry žebrové elektrody [autor]

Tab. 57: Rozměry s přídávky – Elektroda pro výrobu žeber [autor]

| $A_{Pž}$ [mm] | $B_{Pž}$ [mm] | $C_{Pž}$ [mm] | $C_{Ož}$ [mm] |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 64,77         | 22,44         | 41,51         | 51,51         |

$$V_{Pž} = \frac{(A_P * B_P * C_P)}{1\,000\,000} = \frac{(64,77 * 22,44 * 41,51)}{1\,000\,000} = 0,060 \text{ dm}^3 \quad 39$$

$$V_{Ož} = \frac{(A_P * B_P * C_P)}{1\,000\,000} = \frac{(64,77 * 22,44 * 51,51)}{1\,000\,000} = 0,075 \text{ dm}^3 \quad 40$$

$$P_{Pž} = 0,060 * 1500 = 90,50 \text{ Kč} \quad 41$$

$$P_{Ož} = 0,075 * 1500 = 112,30 \text{ Kč} \quad 42$$

$$P_{ZNž} = 112,30 - 90,50 = 21,80 \text{ Kč} \quad 43$$

#### 6.4.5. Ekonomický propoččet – změna nástroje

V této kapitole je řešena varianta, kdy byla válcová monolitní fréza o průměru 10 mm vyměněna za plátkovou frézu o průměru 12 mm. Jelikož se jedná o plátkovou frézu, tak nemohly být použity tak velké hloubky řezu jako u monolitní frézy, ale byly použity větší posuvy a rychlosti.

Opět je optimalizace propočítána pro všechny tři typy elektrod a následně porovnána se zbylými optimalizacemi. Také je potřeba zmínit, že změna nástroje z monolitního na plátkový s sebou přináší i výhodu ve formě snížení nákladu na nástroj. Bohužel tento fakt nelze v tuto chvíli komplexně zahrnout do výpočtů, protože k tomu není dostatečný počet dat. Z praktických zkušeností získaných v kratším časovém úseku bylo zjištěno, že plátková fréza s krabičkou plátku má obvykle stejnou trvanlivost jako monolitní válcová fréza. Z tohoto předpokladu jsou rozpočítány náklady na nástroj na jednotlivé měsíce.

##### 6.4.5.1. Tvarová elektroda malých rozměrů – změna nástroje

Kapitola pojednává o ekonomickém výpočtu optimalizace, kdy byl klasický monolitní nástroj vyměněn za plátkový nástroj.

Tab. 58 Porovnání – Tvarová elektroda malých rozměrů (změna nástroje) [autor]

|             | Optimalizace (řádkování) | Optimalizace (celý břit) | Optimalizace (změna nástroje) |
|-------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| $A_p$ [mm]  | 2                        | 20                       | 0,75                          |
| $A_e$ [mm]  | 5                        | 2                        | 6                             |
| Čas [min:s] | 2:21 (3:31)              | 02:16 (03:24)            | 05:30 (08:15)                 |

$$N_{OM4} = HRS * t_{OM4} = 800 \times 0,1375 = 110 \text{ Kč} \quad \mathbf{44}$$

$$N_{COM4} = N_{OM4} * 2 = 110 \times 2 = 220 \text{ Kč} \quad \mathbf{45}$$

##### 6.4.5.2. Tvarová elektroda velkých rozměrů – změna nástroje

Ekonomické hodnocení bylo provedeno i u druhého typu elektrody. Řezné podmínky zůstaly stejné jako u malé tvarové elektrody.

Tab. 59: Porovnání – Tvarová elektroda velkých rozměrů (změna nástroje) [autor]

|               | Optimalizace (řádkování) | Optimalizace (celý břit) | Optimalizace (změna nástroje) |
|---------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| $A_p$ [mm]    | 2                        | 20                       | 0,75                          |
| $A_e$ [mm]    | 4                        | 2                        | 6                             |
| Čas [h:min:s] | 00:18:27 (0:27:41)       | 0:16:12 (0:24:18)        | 27:16 (40:54)                 |

$$N_{OV4} = HRS * t_{OV4} = 800 \times 0,682 = 545,60 \text{ Kč} \quad \mathbf{46}$$

$$N_{COV4} = N_{OV4} * 2 = 545,60 \times 2 = 1\,091,20 \text{ Kč} \quad \mathbf{47}$$

### 6.4.5.3. Elektroda pro výrobu žeber změna – nástroje

Jako poslední byla provedená změna nástroje vyhodnocená u elektrody pro výrobu žeber. Řezné podmínky opět zůstaly stejné jako u předešlých optimalizací.

Tab. 60: Porovnání – Elektroda pro výrobu žeber (změna nástroje) [autor]

|             | Optimalizace (řádkování) | Optimalizace (celý břit) | Optimalizace (změna nástroje) |
|-------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| $A_p$ [mm]  | 2                        | 20                       | 0,75                          |
| $A_e$ [mm]  | 5                        | 2                        | 6                             |
| Čas [min:s] | 2:25 (3:38)              | 01:33 (02:20)            | 06:52 (10:18)                 |

$$N_{O\check{Z}4} = HRS * t_{O\check{Z}4} = 800 \times 0,114 = 91,20 \text{ Kč} \quad \mathbf{48}$$

$$N_{COV4} = N_{O\check{Z}4} * 2 = 91,20 \times 2 = 182,40 \text{ Kč} \quad \mathbf{49}$$

### 6.4.6. Ekonomicky propoččet – pětiosé obrábění

Jelikož praktický experiment nemohl být proveden, tak byly pouze vytvořeny simulace obrábění. Pomocí obráběcích času ze simulací a předpokládané HRS byly vypočteny náklady na jednu elektrodu a na jeden set těchto elektrod.

Předpokládaná výše HRS u pětiosé frézky byla odhadnuta z již fungujícího stroje ve firmě. Velikost HRS u zmíněného stroje je 1 500 Kč/h. K této částce bylo připočteno 300 Kč/h. Toto navýšení by mělo pokrýt potřebné úpravy stroje, aby mohl být využit k výrobě grafitových elektrod.

Jedním z dalších předpokladů je to, že nejvyšší výhoda pětiosého frézování se projeví až při dokončovacích operacích. Proto jsou tyto ekonomické výpočty pouze předběžné. Je to z toho důvodu, že se práce zabývá pouze optimalizací hrubovacích operací. Optimalizací dokončovacích operací by se mohla zabývat další práce.

Opět byly vybrány tři typy elektrod, kdy jedna z nich je atypických rozměrů. První dvě by měly pokrýt většinu frézovaných elektrod (kromě elektrod pro výrobu žeber). Poslední je elektroda atypicky velkých rozměrů, kdy nastal velký problém tuto elektrodu na tříosé frézce vyrobit.

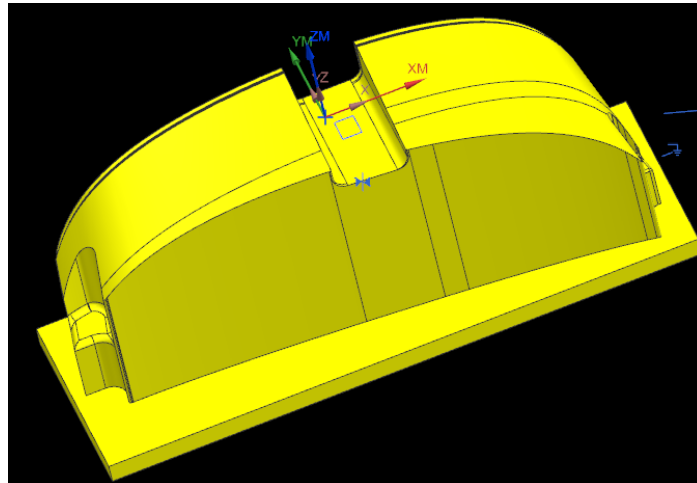
Pro výrobu elektrod bylo využito především indexovaného pětiosého frézování. Indexované frézování bylo využito především kvůli tomu, že bylo možné použít kratší nástroje.

Další výhoda, kterou přinese pětiosé obrábění je ta, že při větších a tvarově složitějších elektrodách není nutné používat delší nástroje nebo elektrodu obrábět z více poloh (nutnost přeupnutí).

#### 6.4.6.1. Tvarová elektroda malých rozměrů – pětiosé frézování

První ekonomický propočít se zabývá touto elektrodou. Díky její výšce bylo nutno použít delší nástroje, a tudíž použít i horší řezné podmínky. Styl obrábění byl už popsán v předešlé kapitole.

Z ekonomického zhodnocení lze zjistit, že i při navýšení HRS klesly náklady na výrobu grafitových elektrod. U malé tvarové elektrody nebylo nutné najíždění z více stran, a tudíž není třeba připočítávat přeupínací čas.



Obrázek 147: Tvarová elektroda malých rozměrů – pětiosé frézování [autor]

Tab. 61: Ekonomický propočít – tvarová elektroda malých rozměrů (pětiosé frézování) [autor]

| Čas hrubování – tříosé frézování [min:s] | Čas hrubování – pětiosé frézování [min:s] |
|--|---|
| 27:13 (40:50)                            | 12:32 (15:03)                             |

$$N_{TM} = HRS * t_{TM} = 800 \times 0,681 = 544,80 \text{ Kč} \quad 50$$

$$N_{CTM} = N_{TM} * 2 = 544,80 \times 2 = 1\,089,60 \text{ Kč} \quad 51$$

$$N_{PM} = HRS * t_{PM} = 1\,800 \times 0,251 = 451,80 \text{ Kč} \quad 52$$

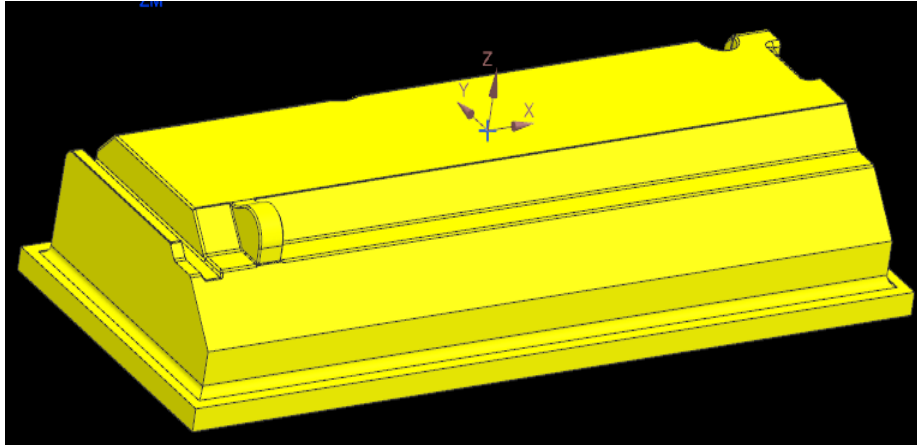
$$N_{CPM} = N_{TM} * 2 = 544,80 \times 2 = 903,60 \text{ Kč} \quad 53$$

$$N_{UPTM} = N_{CTM} - N_{CPM} = 1\,089,60 - 903,60 = 186 \text{ Kč} \quad 54$$



#### 6.4.6.2. Tvarová elektroda velkých rozměrů – pětiosé frézování

Typ elektrody byl už řešen v předchozích kapitolách, kdy se dosáhlo nejlepší optimalizace pomocí řádkovacího hrubování. Pomocí pětiosého frézování se povedlo obráběcí čas snížit ještě o více jak polovinu, viz tabulka níže.



Obrázek 148: Tvarová elektroda velkých rozměrů – pětiosé obrábění [autor]

Tab. 62: Ekonomický propočet – tvarová elektroda velkých rozměrů (pětiosé frézování) [autor]

| Čas hrubování – tříosé frézování [min:s] | Čas hrubování – pětiosé frézování [min:s] |
|--|---|
| 0:16:12 (0:24:18)                        | 08:10 (9:48)                              |

$$N_{TV} = HRS * t_{TV} = 800 \times 0,405 = 324 \text{ Kč} \quad 55$$

$$N_{CTV} = N_{TV} * 2 = 324,8 \times 2 = 648 \text{ Kč} \quad 56$$

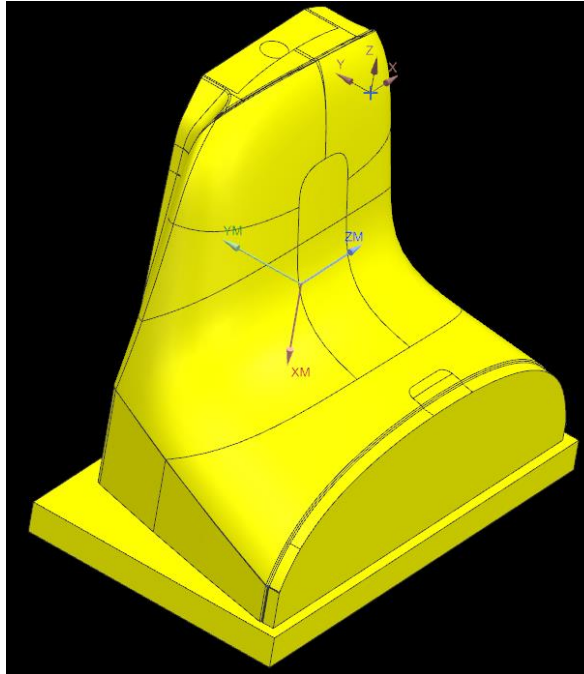
$$N_{PV} = HRS * t_{PV} = 1\,800 \times 0,163 = 294 \text{ Kč} \quad 57$$

$$N_{CPV} = N_{TV} * 2 = 294 \times 2 = 588 \text{ Kč} \quad 58$$

$$N_{UPTV} = N_{CTV} - N_{CPV} = 737,60 - 588 = 149,60 \text{ Kč} \quad 59$$

#### 6.4.6.3. Tvarová elektroda atypických rozměrů – pětiosé frézování

Atypická elektroda byla odlišná tím, že se při frézování musela několikrát přeupínat a k její výrobě byla potřeba extrémně dlouhé nástroje. Díky tomu se její výroba značně prodloužila. Konkrétní cena sady těchto elektrod je spočtena níže.



Obrázek 149: Tvarová elektroda atypických rozměrů – pětiosé obrábění [autor]

Tab. 63: Ekonomický propoččet – tvarová elektroda atypických rozměrů (pětiosé frézování) [autor]

| Čas hrubování – tříosé frézování [h:min:s] | Čas hrubování – pětiosé frézování [h:min:s] |
|--|---|
| 04:15:39 (06:23:24)                        | 0:39:25 (0:47:18)                           |

$$N_{TA} = HRS * t_{TA} = 800 \times 6,39 = 5\,112 \text{ Kč} \quad 60$$

$$N_{CTA} = N_{TA} * 2 = 5\,112 \times 2 = 10\,224 \text{ Kč} \quad 61$$

$$N_{PA} = HRS * t_{PA} = 1\,800 \times 0,788 = 1\,418 \text{ Kč} \quad 62$$

$$N_{CPA} = N_{TA} * 2 = 1\,418 \times 2 = 2\,836 \text{ Kč} \quad 63$$

$$N_{UPTA} = N_{CTA} - N_{CPA} = 10\,224 - 2\,836 = 7\,388 \text{ Kč} \quad 64$$

#### 6.4.7. Ekonomické porovnání optimalizačních variant

V kapitole jsou shrnuty veškeré poznatky, které byly zjištěny z předchozích ekonomických propočtů. Jsou vyhodnoceny nejlepší optimalizační varianty z hlediska ušetřených nákladů na výrobu hrubovacích a dokončovacích elektrody.

##### 6.4.7.1. Shrnutí ušetřených nákladů – malá tvarová elektroda

V tabulce se nachází veškeré ušetřené náklady, kterých bylo dosaženo s využitím optimalizací. Optimalizace jsou číslované tak, jak jsou řazeny v ekonomickém propočtu, kdy první je hrubování řádkováním a poslední je změna nástroje.

Z ušetřených nákladů je zřejmé, že nejlépe vychází kombinace prvních tří optimalizací, kdy se zkombinuje obrábění celou délkou břitů s optimalizovaným řádkovacím hrubováním. Při zavedení tohoto obrábění by na sadě takovýchto elektrod bylo ušetřeno 388,80 Kč.

Jak ale bylo řečeno v předešlých kapitolách, tak by s tímto způsobem obrábění ještě musel být zaveden jiný styl upínání polotovaru do stroje. Musel by se pořídit svěrák, aby byla eliminována omezující silová podmínka. Zároveň by ale stouply náklady na polotovar. U malé tvarové elektrody by zvýšení bylo ve výši 37,83 Kč.

V tuto chvíli tedy lze zavést pouze kombinaci optimalizací 1 a 2. Po zavedení by se na výrobě sady elektrod ušetřilo 385,60 Kč.

V případě poslední provedené optimalizace vyšla ve sloupci 4 záporná hodnota, což znamená, že by oproti nejlepší možné variantě byly náklady o 128,80 Kč vyšší. Stále je ale o 260,00 Kč výhodnější než původní stav. Do této hodnoty ještě není započteno ušetření nákladu na pořizování nových nástrojů. Tento problém bude ještě řešen v jedné z následujících kapitol.

Tab. 64: Souhrn ušetřených nákladů – malá tvarová elektroda [autor]

|                          | Původní stav | 1. optimalizace | 2. optimalizace | 3. optimalizace | 4. optimalizace |
|--------------------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Náklady – jeden kus [kč] | 240          | 65,60           | 47,20           | 45,60           | 110             |
| Náklady – dva kusy [kč]  | 480          | 131,20          | 94,40           | 91,20           | 220             |
| Ušetřené náklady [kč]    | -            | 348,80          | 36,80           | 3,20            | -128,80         |

#### 6.4.7.2. Shrnutí ušetřených nákladů – velká tvarová elektroda

V případě velké tvarové elektrody byla opět vytvořena tabulka s ušetřenými náklady.

Jak je vidět z tabulky níže, tak u tohoto typu elektrody je úspora nákladů daleko výraznější. Opět jako nejlepší varianta vychází kombinace prvních tří optimalizací. Při použití by se náklady na výrobu sady velkých tvarových elektrod snížily o 2 832 Kč.

Díky omezující podmínce ale nelze použít poslední variantu, kdy se jedná o obrábění celým břitem nástroje. Došlo by totiž k porušení omezující silové podmínky a k následné destrukci polotovaru.

Lze tedy použít pouze kombinaci prvních dvou optimalizací, kdy by celkové ušetřené náklady na výrobu tohoto typu elektrod byly ve výši 2 528 Kč.

Náklady na změnu nástroje vychází v mínusových hodnotách stejně jako u malé tvarové elektrody. Stejně tak zde nejsou zahrnuty úspory na pořizování nových nástrojů. I když oproti nejlepší optimalizační variantě vychází ušetřené náklady v záporných číslech, tak díky tomuto způsobu lze ušetřit oproti původnímu stylu obrábění 2 172,80 Kč.

Tab. 65: Souhrn ušetřených nákladů – velká tvarová elektroda [autor]

|                                 | <b>Původní stav</b> | <b>1. optimalizace</b> | <b>2. optimalizace</b> | <b>3. optimalizace</b> | <b>4. optimalizace</b> |
|---------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Náklady – jeden kus [kč]</b> | 1 632               | 544                    | 368                    | 216                    | 545,60                 |
| <b>Náklady – dva kusy [kč]</b>  | 3 264               | 1 088                  | 736                    | 432                    | 1 091,20               |
| <b>Ušetřené náklady [kč]</b>    | -                   | 2 176                  | 352                    | 304                    | -659,20                |

#### 6.4.7.3. Shrnutí ušetřených nákladů – elektroda pro výrobu žeber

Kompletní výpis ušetřených nákladů se nachází v tabulce níže. I u žebrové elektrody lze pozorovat výraznější snížení nákladu než u malé tvarové elektrody.

Nejvíce lze ušetřit na výrobě jedné sady elektrod pomocí kombinace prvních tří variant. Jedná se o optimalizované hrubování řádkováním, které slouží k dohrubování a obrábění celým břitem nástroje. Tímto způsobem obrábění dojde ke snížení nákladů o 475,20 Kč.

Jelikož se i zde nachází omezující silová podmínka, tak výše zmíněnou variantu nelze použít, ale i při použití prvních dvou úprav se náklady výrazně zmenší. Výše snížených nákladů po optimalizaci je 420 Kč.

Čtvrtý styl obrábění, kdy se změní obráběcí nástroj, vyjde nákladově znovu v mínusových číslech. Při porovnání s původní variantou je snížení nákladu i tak dost výrazné. Při obrábění plátkovou frézou se oproti původnímu stavu ušetří 334,40 Kč.

*Tab. 66: Souhrn ušetřených nákladů – elektroda pro výrobu žeber [autor]*

|                                 | <b>Původní stav</b> | <b>1. optimalizace</b> | <b>2. optimalizace</b> | <b>3. optimalizace</b> | <b>4. optimalizace</b> |
|---------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Náklady – jeden kus [kč]</b> | 258,40              | 67,20                  | 48,80                  | 20,80                  | 91,20                  |
| <b>Náklady – dva kusy [kč]</b>  | 516,80              | 134,40                 | 97,60                  | 41,60                  | 182,40                 |
| <b>Ušetřené náklady [kč]</b>    | -                   | 382,40                 | 36,80                  | 56                     | -140,80                |

#### 6.4.7.4. Shrnutí ušetřených nákladů – změna nástroje

V předešlých kapitolách bylo zmíněno, že změna nástroje s sebou přináší i výhodu, která spočívá v ceně samotného nástroje. Jelikož obrábění pomocí plátkové frézy bylo ve firmě Bronas zavedeno poměrně nedávno, tak k dispozici ještě nejsou kompletní data opotřebení a trvanlivosti plátek nástroje.

V současnosti jsou k analýze dostupná pouze částečná data, kdy víme, že plátková fréza s krabičkou náhradních plátek má obvykle přibližně stejnou trvanlivost jako fréza monolitní. Trvanlivost obou fréz činí přibližně jeden měsíc.

Cena monolitní frézy, která je povlakována diamantem od firmy Karnasch, činí v tuto chvíli cca 4 665 Kč. Krabička s plátkou pro plátkovou frézu stojí 800 Kč. Za předpokladu, že plátková fréza má stejnou trvanlivost jako monolitní fréza, tak pořízení sady náhradních řezných plátek je o 3 865 Kč levnější.

Při rozpočítání těchto nákladů na celý rok dojdeme k závěru, že pokud by firma Bronas frézovala pouze plátkovou frézou, tak by ušetřené náklady na nástrojích byly ve výši 46 380 Kč.

Jak už bylo řečeno, tak do této částky nevstupují veškeré parametry. Je to z toho důvodu, že není znám jejich kompletní vliv na ušetřené náklady. Mezi parametry se například řadí fakt, že většina monolitních fréz je po vyřazení z frézky na grafitové elektrody ještě používána na hrubování kovových dílu.

*Tab. 67: Cena nástrojů [autor]*

| <b>Cena – monolitní fréza [Kč]</b> | <b>Cena – plátková fréza [Kč]</b> |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| 4 665                              | 800                               |

*Tab. 68: Změna nástroje – ušetřené náklady [autor]*

| <b>Ušetřené náklady – měsíc [Kč]</b> | <b>Ušetřené náklady – rok [Kč]</b> |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| 3 865                                | 46 380                             |

#### 6.4.7.5. Shrnutí ušetřených nákladů – pětiosé frézování

Jelikož se jednalo pouze o teoretický experiment, tak výpočty nelze podložit praktickými zkušenostmi. I tak tyto informace mohou posloužit k pořízení pětiosého frézovacího stroje, jelikož použitím tohoto typu obrábění lze dosáhnout značných časových úspor i v porovnání s již optimalizovanými obráběcími strategiemi.

Jsou zde shrnuty všechny tři typy elektrod, na kterých byl teoretický experiment prováděn. Jejich řazení začíná od malé tvarové elektrody, přes velkou tvarovou elektrodu až po elektrodu atypických rozměrů.

Je také potřeba myslet na fakt, že velké množství uspořené času lze dosáhnout až při dokončovacím obrábění, jelikož lze snížit náklady pětiosým obráběním už při hrubování. Je tedy patrné, že by pořízení tohoto stroje mělo velký přínos z hlediska snížení nákladů při výrobě grafitových elektrod.

*Tab. 69: Náklady – malá tvarová elektroda (pětiosé obrábění) [autor]*

|                                 | <b>Třiosé obrábění</b> | <b>Pětiosé obrábění</b> |
|---------------------------------|------------------------|-------------------------|
| <b>Náklady – jeden kus [kč]</b> | 544,80                 | 451,80                  |
| <b>Náklady – dva kusy [kč]</b>  | 1 089,60               | 903,60                  |
| <b>Ušetřené náklady [kč]</b>    | -                      | 186                     |

*Tab. 70: Náklady – velká tvarová elektroda (pětiosé obrábění) [autor]*

|                                 | <b>Třiosé obrábění</b> | <b>Pětiosé obrábění</b> |
|---------------------------------|------------------------|-------------------------|
| <b>Náklady – jeden kus [kč]</b> | 324                    | 294                     |
| <b>Náklady – dva kusy [kč]</b>  | 648                    | 588                     |
| <b>Ušetřené náklady [kč]</b>    | -                      | 60                      |

*Tab. 71: Náklady – elektroda atypických rozměrů (pětiosé obrábění) [autor]*

|                                 | <b>Třiosé obrábění</b> | <b>Pětiosé obrábění</b> |
|---------------------------------|------------------------|-------------------------|
| <b>Náklady – jeden kus [kč]</b> | 5 112                  | 1 418                   |
| <b>Náklady – dva kusy [kč]</b>  | 10 224                 | 2 836                   |
| <b>Ušetřené náklady [kč]</b>    | -                      | 7 388                   |

## 7. Závěr

Diplomová práce se zabývala optimalizací hrubovacího obrábění grafitových elektrod v CAM ve firmě Bronas s.r.o. V první části práce byla vypracována rešerše použití grafitových elektrod, stručný popis vstřikovacích forem a vstřikovacích lisů.

Následně byla provedena analýza současného stavu, kdy byla nejprve popsána tvorba grafitových elektrod od modelování až po usazení polotovaru do tříosé frézky. Také bylo provedeno zkušební frézování, které odhalilo nedokonalosti stroje. Mezi tyto nedokonalosti se primárně řadilo nedořezávání a podřezávání tvarových ploch.

V praktické části byly vybrány tři typy elektrod, které by měly obsáhnout veškeré možné typy obráběných dílů. Na těchto elektrodách byly prováděny jednotlivé optimalizační kroky, kdy se nejprve měnily řezné parametry, následovaly obráběcí strategie a jako poslední byl změněn obráběcí nástroj. Poté byly vypracovány ekonomické propočty nejlépe hodnocených variant, kdy byly vypočteny náklady na výrobu dvou kusů grafitových elektrod.

Pro účely změny stroje byl vytvořen teoretický experiment, který má sloužit jako základ pro porovnání tříosé a pětiosé frézky. V teoretickém experimentu byla tříosá frézka nahrazena frézku pětiosou. Byly vytvořeny simulace obrábění, ze kterých byly získány obráběcí časy. Tyto časy byly opět použity pro vypracování ekonomických propočtů. Veškeré poznatky získané ohledně pětiosého obrábění byly následně porovnány s obráběním tříosým.

Po zpracování veškerých informací získaných při tvorbě této práce bylo zjištěno, že v tuto chvíli by bylo nejlepší používat optimalizované řádkovací hrubování v kombinaci s obráběním celým břitem nástroje. Po zavedení této optimalizace by bylo možné ušetřit při výrobě MTE 388,80 Kč, při výrobě VTE 2 832 Kč a při výrobě ŽE 475,20 Kč. Bohužel se ukázalo, že obráběcí proces byl omezen maximální řeznou silou, a tudíž bylo za nejlepší variantu zvoleno samotné optimalizované řádkovací hrubování, pomocí kterého při výrobě MTE ušetříme 385,60 Kč, při výrobě VTE 2 528 Kč a při výrobě ŽE 419,20 Kč. Omezující podmínka vyplývá z maximální únosnosti používaného lepidla. Pokud by však do ekonomických kalkulací byly započteny i ušetřené náklady na obráběcí nástroje, tak by bylo možné považovat za optimální variantu změnu nástroje, kdy změna nástroje by mohla dokázat ročně ušetřit až 46 380 Kč. Omezující podmínka by mohla být odstraněna pořízením svěráku, jehož cena se pohybuje okolo 23 000 Kč.

Dále byla řešena otázka, zda by nebyla výhodnější výměna tříosé frézky za pětiosou frézku. Z vypracovaných simulací a ekonomických propočtů vychází, že už jenom při hrubování by bylo možné snížit mnohem více hrubovací obráběcí časy, než bylo možné na tříosé frézce, kdy jsme schopni snížit náklady na výrobu u podobné MTE z 544,80 Kč na 451,80 Kč, náklady na výrobu VTE o dalších 60 Kč a náklady na výrobu atypické elektrody z 10 224 Kč na 2 836 Kč. Do ekonomického zhodnocení nebyly zahrnuty dokončovací operace, ale už teď by z hlediska nákladu bylo lepší pořídit pětiosou frézku.



Zároveň je třeba dbát při výběru pětiosého frézovacího stroje na skutečnost, že veškeré obráběcí časy byly sníženy o více než 70 %. Je možné, že při současné produkci firmy Bronas s.r.o. by nemusel být využit plný potenciál tohoto stroje. Při současné produkci by bylo vhodné zakoupit nové tříosé frézovací centrum s vyšší tuhostí.

Veškeré cíle stanovené na začátku diplomové práce byly splněny, nyní bude následovat rozhodnutí vedení firmy Bronas s.r.o. zdali využijí těchto poznatků.



## 8. Seznam zdrojů

- [1] <http://cz.aberyplastics.com/injection-molding/plastic-mold-injection/professional-p20-mold-base-plastic-injection.html> Abery. *Abery.cz* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <http://cz.aberyplastics.com/injection-molding/plastic-mold-injection/professional-p20-mold-base-plastic-injection.html>
- [2] HYNEK, Martin. *Vstřikovací lisy* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: [https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK\\_PU/KA\\_05\\_publikace/KA05\\_Vstrikovaci\\_lisy.pdf](https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Vstrikovaci_lisy.pdf)
- [3] [http://www.download.polympart.ir/polympart/ebook/Understanding Injection Molds.pdf](http://www.download.polympart.ir/polympart/ebook/Understanding%20Injection%20Molds.pdf) PRUNER, Harry a Wolfgang NESCH. *Understanding Injection Molds* [online]. 1. Germany, Munich: Carl Hanser Verlag [cit. 2022-03-03]. ISBN 978-1-56990-535-7. Dostupné z: <http://www.download.polympart.ir/polympart/ebook/Understanding%20Injection%20Molds.pdf>
- [4] *Plastic portal* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.cz/image/firmy/1490/8584.jpg>
- [5] SVOBODA [online]. [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://www.jansvoboda.cz/SGDE-stopy-na-vstrikovanem-dilu-o34783>
- [6] *Svoboda* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.jansvoboda.cz/Kaleny-s-valcovou-hlavou-plochy-d1782745?cid=73101>
- [7] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 1. Svitavy: Publi.cz, 2016 [cit. 2022-03-03]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [8] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 1. Svitavy: Publi.cz, 2016 [cit. 2022-03-03]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/07.html>
- [9] *Cecho* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://eshop.cecho.cz/produkty/cumsa-vyhazovaci-systemy/trubkovy-vyhazovac-bez-hlavy>
- [10] HYNEK, Martin. *Studené a živé vtokové systémy* [online]. 13 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: [https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK\\_PU/KA\\_05\\_publikace/KA05\\_Studene\\_a\\_zive\\_vtokove\\_systemy.pdf](https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Studene_a_zive_vtokove_systemy.pdf)



- [11] HYNEK, Martin. *Horké vtoky* [online]. 13 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: [https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK\\_PU/KA\\_05\\_publikace/KA05\\_Studene\\_a\\_zive\\_vtokove\\_systemy.pdf](https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Studene_a_zive_vtokove_systemy.pdf)
- [12] *Frézy pro obrábění grafitu* [online]. 2021 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: [https://www.pm-tech.cz/wp-content/uploads/2018/10/PM-TECH\\_frezy\\_GRAFIT\\_WEB\\_210906.pdf](https://www.pm-tech.cz/wp-content/uploads/2018/10/PM-TECH_frezy_GRAFIT_WEB_210906.pdf)
- [13] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *Nekonvenční metody obrábění* [online]. 19.07.2021 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>
- [14] *Nekonvenční metody obrábění* [online]. 8 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: [https://coptel.cz/pluginfile.php/16439/mod\\_resource/content/1/10%20Nekonven%C4%8Dn%C3%AD%20metody%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%281%29.pdf](https://coptel.cz/pluginfile.php/16439/mod_resource/content/1/10%20Nekonven%C4%8Dn%C3%AD%20metody%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%281%29.pdf)
- [15] *Market prospect* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.market-prospects.com/articles/electrical-discharge-machining>
- [16] *SLF* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.market-prospects.com/articles/electrical-discharge-machining>
- [17] ABBAS, Norliana Mohd, Darius G. SOLOMON a Md. Fuad BAHARI. *A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)* [online]. 1214-1228 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695506002148>
- [18] NOVÁK, Pavel. *Elektroerozivní obrábění (podstata, zákonitosti, veličiny popisující výboje, typy a generátory výbojů, řízení, pracovní podmínky, opotřebení, polarita eroze)* [online]. In: . [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/403444/mod\\_resource/content/0/02%20%20elektroerozivn%C3%AD%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%20%231.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/403444/mod_resource/content/0/02%20%20elektroerozivn%C3%AD%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%20%231.pdf)
- [19] *Komas* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.komas.cz/cs/elektroerozivni-dratove-rezani/a-98/>
- [20] NOVÁK, Pavel. *Elektroerozivní obrábění (materiál elektrod, postupy výroby elektrod, dielektrikum a výplach pracovní mezery, environmentální problematika, technologické aplikace)* [online]. In: . [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/405010/mod\\_resource/content/0/03%20%20elektroerozivn%C3%AD%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%20%232.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/405010/mod_resource/content/0/03%20%20elektroerozivn%C3%AD%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%20%232.pdf)



- [21] TOMÍČEK, Jan. *Programování obrábění na CNC strojích* [online]. In: . [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/315114/mod\\_resource/content/3/2021\\_11\\_Programov%C3%A1n%C3%AD%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%20na%20CNC%20stroj%C3%ADch%20-%20v%C3%BDvoj%20CAD-CAM%20a%20PLM.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/315114/mod_resource/content/3/2021_11_Programov%C3%A1n%C3%AD%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%20na%20CNC%20stroj%C3%ADch%20-%20v%C3%BDvoj%20CAD-CAM%20a%20PLM.pdf)
- [22] SCHROETER, Rolf Bertrand, Rafael KRATOCHVIL a Jefferson de Oliveira GOMES. *High-speed finishing milling of industrial graphite electrodes* [online]. 20. října 2006, 128-132 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606002202>
- [23] JASPAR, Jiří. *Nástroje pro obrábění grafitu* [online]. 11. října 2006 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-grafitu>
- [24] *Dassault systemes: What's New in SOLIDWORKS CAM 2018* [online]. 4. října 2017 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2017/10/whats-new-solidworks-cam-2018.html>
- [25] *CAD studio: Konstrukce, výroba a kontrola elektrod* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.powershape.cz/konstrukce-a-vyroba-elektrod/>
- [26] *Siemens: Electrode Design* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/cz/products/manufacturing-planning/electrode-design.html>
- [27] *NC mind* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.ncmind.de/en/cnc-machines/ncg-560/>
- [28] *WT precious clamping systems* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://w-technology.cz/produkt/wt-002-100/>
- [29] <https://karnasch.tools/en/all-products/milling-tools/end-mills/diamond-coated-solid-carbide-3-306551-p/> *Karnasch professional tools* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://karnasch.tools/en/all-products/milling-tools/end-mills/diamond-coated-solid-carbide-3-306551-p/>
- [30] HUO, Dehong, Chao LIN a Kenneth DALGARNO. *An experimental investigation on micro machining of fine-grained graphite*. 11. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5730>



- [31] *GF machining solution* [online]. [cit. 2022-04-26]. Dostupné z:  
<https://www.gfms.com/en-nl/machines/milling/5-axis/mikron-mill-s-u-series.html>
- [32] *VABEX Zlín s.r.o.* [online]. [cit. 2022-04-26]. Dostupné z:  
<https://www.shop.strojniveraky.cz/produkty/modularni-sverak-vmp-6-detail>
- [33] HAVLOVÁ, Božena. *Teorie třískového obrábění: 2016* [online]. In: . s. 9 [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10193369-Teorie-triskoveho-obrabeni.html>
- [34] *SEMCO carbon* [online]. In: . [cit. 2022-04-26]. Dostupné z:  
<https://www.semcoarbon.com/blog/five-keys-to-success-when-machining-graphite>
- [35] *Karnasch professional tools* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z:  
<https://karnasch.tools/en/all-products/milling-tools/end-mills/306572-p-graphite-roughing-end-mill/>

## 9. Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1: Forma pro vstříkovací lis [1] .....                                  | 13 |
| Obrázek 2: Popis vstříkovacího lisu [2] .....                                   | 14 |
| Obrázek 3: Doprava taveniny pomocí šneku [2].....                               | 14 |
| Obrázek 4: Doprava taveniny pomocí pístu [2] .....                              | 14 |
| Obrázek 5: Kombinovaná forma [2].....   | 14 |
| Obrázek 6: Horizontální lis [2] .....   | 15 |
| Obrázek 7: Vertikální lis [2].....  | 15 |
| Obrázek 8: Popis formy pro vstříkovací lis (přeloženo pro potřeby DP) [3] ..... | 15 |
| Obrázek 9: Schéma pohyblivé strany formy (přeloženo pro potřeby DP) [3].....    | 16 |
| Obrázek 10: Schéma pevné části formy (přeloženo pro potřeby DP) [3] .....       | 17 |
| Obrázek 11: Stopa po vyhazovači [5].....  | 17 |
| Obrázek 12: Pohled na vyhazovače a vratné kolíky [4] .....                      | 18 |
| Obrázek 13: Detail vyhazovače [6] .....   | 18 |
| Obrázek 14: Ukázka pohyblivého jádra [autor] .....                              | 18 |
| Obrázek 15: Detail trubkového vyhazovače [9].....                               | 19 |
| Obrázek 16: Ukázka žebrové elektrody [autor] .....                              | 20 |
| Obrázek 17: Příklad tvarově složitě elektrody [autor] .....                     | 21 |
| Obrázek 18: Příklad velké tvarové elektrody [autor] .....                       | 21 |
| Obrázek 19: Příklad vyplachovacích otvorů [autor].....                          | 22 |
| Obrázek 20: Detail vyštípnuté elektrody-1 [autor] .....                         | 23 |
| Obrázek 21: Detail vyštípnuté elektrody-2 [autor].....                          | 23 |
| Obrázek 22: Typy povlakovaných fréz [12].....                                   | 23 |
| Obrázek 23: Ukázka fréz používaných k frézování grafitu [autor] .....           | 24 |
| Obrázek 24: příklad EDM hloubení [15] .....                                     | 25 |
| Obrázek 25: Příklad EDM řezání [16] .....                                       | 25 |
| Obrázek 26: Schéma EDM hloubení [14] .....                                      | 25 |
| Obrázek 27: Parametry výboje [18] .....   | 26 |
| Obrázek 28: Reálný průběh výboje [18] .....                                     | 26 |
| Obrázek 29: Schéma drátového řezání [19] .....                                  | 27 |
| Obrázek 30: Závislost jednotlivých parametrů na objemovém výkonu [18] .....     | 27 |
| Obrázek 31: Model dílu v Inventoru z předmětu POCS [autor] .....                | 29 |
| Obrázek 32: Model dílu v PowerMillu z předmětu POCS [autor] .....               | 29 |
| Obrázek 33: Ukázka Solidworks CAM [24].....                                     | 30 |
| Obrázek 34: Ukázka Siemens NX [autor] .....                                     | 30 |
| Obrázek 35: Ukázka programu Powershape [25] .....                               | 31 |
| Obrázek 36: Ukázka modulu pro Siemens NX [26] .....                             | 31 |
| Obrázek 37: Frézka NCG Mind 560 [autor].....                                    | 32 |
| Obrázek 38: Detail zásobníku na nástroje [autor] .....                          | 33 |
| Obrázek 39: Pracovní prostor frézky [autor] .....                               | 33 |
| Obrázek 40: Ukázka modelu elektrody 1 [autor].....                              | 34 |
| Obrázek 41: Ukázka modelovací historie v programu NX [autor] .....              | 34 |
| Obrázek 42: Ukázka modelu elektrody 2 [autor].....                              | 34 |
| Obrázek 43: Dráhy nástroje [autor].....   | 35 |
| Obrázek 44: Simulace obrábění [autor].....                                      | 35 |
| Obrázek 45: Pásová pila [autor].....  | 36 |
| Obrázek 46: Grafitové desky a použité elektrody [autor] .....                   | 36 |
| Obrázek 47: Ruční pilka [autor] .....   | 37 |
| Obrázek 48: Paleta WT 002.100 [28] .....  | 37 |
| Obrázek 49: Ukázka upevněných elektrod [autor] .....                            | 38 |
| Obrázek 50: Kyanakrylátové lepidlo [autor] .....                                | 38 |
| Obrázek 51: Detail kostky [autor].....  | 38 |
| Obrázek 52: Multimetr [autor] .....   | 39 |



|   |    |
|---|----|
| Obrázek 53: Model pro zkušební frézování [autor] .....                    | 39 |
| Obrázek 54: Skutečná součást [autor] .....                                | 39 |
| Obrázek 55: Válcová 10 30.6573 [29] .....                                 | 40 |
| Obrázek 56: Kulová 3 30.6551 [29] .....                                   | 40 |
| Obrázek 57: Kulová 1 30.6551 [29] .....                                   | 40 |
| Obrázek 58: 0. fáze obrábění [autor] .....                                | 41 |
| Obrázek 59: 1. fáze obrábění [autor] .....                                | 41 |
| Obrázek 60: 2. fáze obrábění [autor] .....                                | 41 |
| Obrázek 61: 3. fáze obrábění [autor] .....                                | 41 |
| Obrázek 62: Finální analýza [autor] .....                                 | 41 |
| Obrázek 63: Souřadnicový měřicí stroj [autor] .....                       | 42 |
| Obrázek 64: Odchylka – Rozměry rámečku [autor] .....                      | 42 |
| Obrázek 65: Odchylka – Horní čtverec [autor] .....                        | 42 |
| Obrázek 66: Odchylka – Obvod hvězdice (horní křivka) [autor] .....        | 43 |
| Obrázek 67: Odchylka – Obvod hvězdice (dolní křivka) [autor] .....        | 43 |
| Obrázek 68: Odchylka – Vrchní drážka 1 [autor] .....                      | 43 |
| Obrázek 69: Odchylka – Vrchní drážka 2 [autor] .....                      | 43 |
| Obrázek 70: Odchylka – Rovinné plochy [autor] .....                       | 43 |
| Obrázek 71: Odchylka – rozměry rámečku 2 [autor] .....                    | 44 |
| Obrázek 72: Odchylka – horní čtverec 2 [autor] .....                      | 44 |
| Obrázek 73: Odchylka – obvod hvězdice (horní křivka 2) [autor] .....      | 44 |
| Obrázek 74: Odchylka – obvod hvězdice (dolní křivka 2) [autor] .....      | 44 |
| Obrázek 75: Odchylka – vrchní drážka 1-2 [autor] .....                    | 44 |
| Obrázek 76: Odchylka – vrchní drážka 2-2 [autor] .....                    | 44 |
| Obrázek 77: Odchylka – rovinné plochy [autor] .....                       | 44 |
| Obrázek 78: Rozměry malé tvarové elektrody [autor] .....                  | 46 |
| Obrázek 79: Model malé tvarové elektrody [autor] .....                    | 46 |
| Obrázek 80: Změna hloubky řezu 1 [autor] .....                            | 47 |
| Obrázek 81: Změna hloubky řezu 2 [autor] .....                            | 47 |
| Obrázek 82: Změna hloubky řezu 3 [autor] .....                            | 48 |
| Obrázek 83: Změna hloubky řezu 4 [autor] .....                            | 48 |
| Obrázek 84: Změna bočního kroku 1 [autor] .....                           | 49 |
| Obrázek 85: Změna bočního kroku 2 [autor] .....                           | 49 |
| Obrázek 86: Změna bočního kroku 3 [autor] .....                           | 50 |
| Obrázek 87: Tvarová elektroda malých rozměru – výsledný díl [autor] ..... | 51 |
| Obrázek 88: Model tvarové elektrody větších rozměrů [autor] .....         | 51 |
| Obrázek 89: Rozměry tvarové elektrody [autor] .....                       | 52 |
| Obrázek 90: Simulace s počátečními podmínkami [autor] .....               | 52 |
| Obrázek 91: Změna hloubky řezu u velké tvarové elektrody [autor] .....    | 53 |
| Obrázek 92: Změna bočního kroku u velké tvarové elektrody [autor] .....   | 53 |
| Obrázek 93: Dokončená velká tvarová elektroda [autor] .....               | 54 |
| Obrázek 94: Model žebrové elektrody [autor] .....                         | 55 |
| Obrázek 95: Rozměry žebrové elektrody [autor] .....                       | 55 |
| Obrázek 96: Změna hloubky řezu – 1.1 [autor] .....                        | 55 |
| Obrázek 97: Změna hloubky řezu – 1.2 [autor] .....                        | 55 |
| Obrázek 98: Změna hloubky řezu – 2.1 [autor] .....                        | 56 |
| Obrázek 99: Změna hloubky řezu – 2.2 [autor] .....                        | 56 |
| Obrázek 100: Změna hloubky řezu – 3.1 [autor] .....                       | 56 |
| Obrázek 101: Změna hloubky řezu – 3.2 [autor] .....                       | 56 |
| Obrázek 102: Změna bočního kroku – 1.1 [autor] .....                      | 57 |
| Obrázek 103: Změna bočního kroku – 1.2 [autor] .....                      | 57 |
| Obrázek 104: Změna bočního kroku – 2.1 [autor] .....                      | 57 |
| Obrázek 105: Změna bočního kroku – 2.2 [autor] .....                      | 57 |
| Obrázek 106: Změna bočního kroku – 3.1 [autor] .....                      | 58 |



|   |    |
|---|----|
| Obrázek 107: Změna bočního kroku – 3.2 [autor].....   | 58 |
| Obrázek 108: Vyfrézované žebrované elektrody [autor] .....  | 58 |
| Obrázek 109: Malá tvarová elektroda – dráhy před úpravou [autor] .....  | 60 |
| Obrázek 110: Malá tvarová elektroda – dráhy po úpravě [autor].....  | 60 |
| Obrázek 111: Velká tvarová elektroda – dráhy před úpravou [autor] .....                                       | 61 |
| Obrázek 112: Velká tvarová elektroda – dráhy po úpravě [autor] .....  | 61 |
| Obrázek 113: Žebrované elektrody – dráhy před změnou (hrubování) [autor] .....                                | 62 |
| Obrázek 114: Žebrované elektrody – dráhy po změně (hrubování) [autor].....                                    | 62 |
| Obrázek 115: Žebrované elektrody – dráhy před změnou (zbytkové hrubování) [autor].....                        | 62 |
| Obrázek 116: Žebrované elektrody – dráhy po změně (zbytkové hrubování) [autor] .....                          | 62 |
| Obrázek 117: Dráhy frézování celou délkou břitu – malá tvarová elektroda [autor].....                         | 63 |
| Obrázek 118: Simulace frézování celou délkou břitu – malá tvarová elektroda [autor] .....                     | 63 |
| Obrázek 119: Dráhy zbytkového frézování – malá tvarová elektroda [autor] .....                                | 63 |
| Obrázek 120: Simulace zbytkového frézování – malá tvarová elektroda [autor].....                              | 63 |
| Obrázek 121: Dráhy frézování celou délkou břitu – velká tvarová elektroda [autor] .....                       | 64 |
| Obrázek 122: Simulace frézování celou délkou břitu – velká tvarová elektroda [autor] .....                    | 64 |
| Obrázek 123: Dráhy zbytkového frézování – velká tvarová elektroda [autor] .....                               | 64 |
| Obrázek 124: Simulace zbytkového frézování – velká tvarová elektroda [autor] .....                            | 65 |
| Obrázek 125: Dráhy frézování celou délkou břitu – žebrované elektrody [autor] .....                           | 65 |
| Obrázek 126: Simulace frézování celou délkou břitu – žebrované elektrody [autor] .....                        | 65 |
| Obrázek 127: Dráhy zbytkového frézování – žebrované elektrody [autor].....                                    | 66 |
| Obrázek 128: Simulace zbytkového frézování – žebrované elektrody [autor].....                                 | 66 |
| Obrázek 129: Ukázka a anglický popis strategie „Plunge milling“ v programu Siemens NX [autor] .....           | 67 |
| Obrázek 130: Ukázka plátkové frézy [autor] .....  | 68 |
| Obrázek 131: Simulace obrábění pomocí plátkové frézy a celkový čas – malá tvarová elektroda [autor]<br>.....  | 69 |
| Obrázek 132: Simulace obrábění pomocí plátkové frézy a celkový čas – velká tvarová elektroda [autor]<br>..... | 69 |
| Obrázek 133: Simulace obrábění pomocí plátkové frézy a celkový čas – žebrované elektrody [autor] .....        | 70 |
| Obrázek 134: Strojní modulární svěrák VMP – 6 [32].....   | 71 |
| Obrázek 135: Pětiosá frézka Mikron S U Series [31].....   | 72 |
| Obrázek 136: Pětiosé obrábění – elektroda č. 1 [autor].....   | 73 |
| Obrázek 137: Pětiosé obrábění – elektroda č. 2 [autor].....   | 73 |
| Obrázek 138: Pětiosé obrábění – elektroda č. 3 [autor].....   | 73 |
| Obrázek 139: Simulace obrábění elektrody 1 [autor].....   | 74 |
| Obrázek 140: Analýza obrábění elektrody 1 [autor].....  | 74 |
| Obrázek 141: Simulace obrábění elektrody 2 [autor].....   | 75 |
| Obrázek 142: Analýza obrábění elektrody 2 [autor].....  | 75 |
| Obrázek 143: Simulace obrábění elektrody 3 [autor].....   | 76 |
| Obrázek 144: Analýza obrábění elektrody 3 [autor].....  | 76 |
| Obrázek 145: Rozměry malé tvarové elektrody [autor] .....   | 84 |
| Obrázek 146: Rozměry žebrované elektrody [autor] .....  | 85 |
| Obrázek 147: Tvarová elektroda malých rozměrů – pětiosé frézování [autor] .....                               | 88 |
| Obrázek 148: Tvarová elektroda velkých rozměrů – pětiosé obrábění [autor].....                                | 89 |
| Obrázek 149: Tvarová elektroda atypických rozměrů – pětiosé obrábění [autor].....                             | 90 |

## 10. Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tab. 1: Fyzikální parametry jednotlivých materiálů [20] .....  | 28 |
| Tab. 2: Technické parametry frézky [27] .....  | 33 |
| Tab. 3: Rozměry V10 [29] .....   | 40 |
| Tab. 4: Rozměry K3 [29].....   | 40 |
| Tab. 5: Rozměry K1 [29].....   | 40 |
| Tab. 6: Řezné podmínky V10 – výchozí stav [autor] .....  | 45 |
| Tab. 7: Řezné podmínky V3 a K3 – výchozí stav [autor] .....  | 46 |
| Tab. 8: Současný stav posuvu na zub [autor] .....  | 50 |
| Tab. 9: Stav po změně posuvu na zub [autor] .....  | 50 |
| Tab. 10: Původní řezné podmínky pro tvarovou elektrodu [autor].....  | 52 |
| Tab. 11: Počáteční řezné podmínky – žebrová elektroda [autor].....   | 55 |
| Tab. 12: Tvarová elektroda malých rozměrů – výsledky 1 [autor] .....   | 59 |
| Tab. 13: Tvarová elektroda malých rozměrů – výsledky 2 [autor] .....   | 59 |
| Tab. 14: Tvarová elektroda velkých rozměrů – výsledky [autor].....   | 59 |
| Tab. 15: Žebrová elektroda – výsledky hrubování 1 [autor].....   | 59 |
| Tab. 16: Žebrová elektroda – výsledky hrubování 2 [autor].....   | 59 |
| Tab. 17: Žebrová elektroda – výsledky dohrubování 1 [autor].....   | 59 |
| Tab. 18: Žebrová elektroda – výsledky dohrubování 2 [autor].....   | 60 |
| Tab. 19: Porovnání časů – změna směru frézování u malé tvarové elektrody [autor].....  | 60 |
| Tab. 20: Porovnání časů – změna směru frézování u velké tvarové elektrody [autor] .....  | 61 |
| Tab. 21: Porovnání časů – změna směru frézování u žebrové elektrody (hrubování)[autor] .....                                   | 62 |
| Tab. 22: Porovnání časů – změna směru frézování u žebrové elektrody (zbytkové hrubování) [autor] .                             | 62 |
| Tab. 23: Čas frézování celou délkou břitu – malá tvarová elektroda [autor] .....   | 63 |
| Tab. 24: Čas zbytkového frézování – malá tvarová elektroda [autor] .....   | 63 |
| Tab. 25: Čas frézování celou délkou břitu – velká tvarová elektroda [autor].....   | 64 |
| Tab. 26: Čas zbytkového frézování – velká tvarová elektroda [autor] .....  | 65 |
| Tab. 27: Čas frézování celou délkou břitu – žebrová elektroda [autor].....   | 65 |
| Tab. 28: Čas zbytkového frézování– žebrová elektroda 1 [autor] .....   | 66 |
| Tab. 29: Čas zbytkového frézování– žebrová elektroda 2 [autor] .....   | 66 |
| Tab. 30: Čas hrubování po úpravě bočního kroku [autor] .....   | 66 |
| Tab. 31: Celkové časy po úpravě bočního kroku [autor] .....  | 66 |
| Tab. 32: Porovnání celkových časů po změně směru obrábění [autor].....   | 68 |
| Tab. 33: Porovnání celkových časů řádkového hrubování a hrubování celým břitem nástroje<br>(doporučené podmínky) [autor] ..... | 68 |
| Tab. 34: Porovnání celkových časů řádkového hrubování a hrubování celým břitem nástroje (použitelné<br>podmínky) [autor].....  | 68 |
| Tab. 35: Řezné podmínky pro plátkovou frézu [autor].....   | 69 |
| Tab. 36: Souhrn výsledků – plátková fréza [autor] .....  | 70 |
| Tab. 37: Porovnání časů tříosého a pětiosého obrábění – elektroda 1 [autor] .....  | 74 |
| Tab. 38: Porovnání časů tříosého a pětiosého obrábění – elektroda 2 [autor] .....  | 75 |
| Tab. 39: Porovnání časů tříosého a pětiosého obrábění – elektroda 3 [autor] .....  | 76 |
| Tab. 40: HRS – obráběcí stroje [autor] .....   | 77 |
| Tab. 41: Válcová 10 – podmínky před optimalizací [autor] .....   | 77 |
| Tab. 42: Porovnání – tvarová elektroda malých rozměrů [autor] .....  | 78 |
| Tab. 43: Porovnání – tvarová elektroda velkých rozměrů [autor].....  | 78 |
| Tab. 44: Porovnání – Elektroda pro tvorbu žeber[autor] .....   | 79 |
| Tab. 45 Porovnání – Tvarová elektroda malých rozměrů (změna směru obrábění) [autor] .....                                      | 79 |
| Tab. 46: Porovnání – Tvarová elektroda velkých rozměrů (změna směru obrábění) [autor].....                                     | 80 |
| Tab. 47: Porovnání – Elektroda pro tvorbu žeber[autor] .....   | 80 |
| Tab. 48 Porovnání – Tvarová elektroda malých rozměrů (obrábění celou délkou břitu) [autor] .....                               | 81 |
| Tab. 49 Porovnání – $A_e$ 20 % a 5 % průměru nástroje (malá tvarová elektroda) [autor] .....                                   | 81 |
| Tab. 50: Porovnání – Tvarová elektroda velkých rozměrů (obrábění celou délkou břitu) [autor] .....                             | 82 |





|  |    |
|--|----|
| Tab. 51 Porovnání – $A_e$ 20 % a 10 % průměru nástroje (velká tvarová elektroda) [autor] .....       | 82 |
| Tab. 52: Porovnání – Elektroda pro tvorbu žeber (obrábění celou délkou břitu) [autor] .....          | 82 |
| Tab. 53 Porovnání – $A_e$ 20 % a 5 % průměru nástroje (Elektroda pro obrábění žeber) [autor] .....   | 83 |
| Tab. 54: Cena a rozměry původního polotovaru – malá tvarová elektroda [autor] .....                  | 83 |
| Tab. 55: Rozměry s přídatky – malá tvarová elektroda [autor] .....                                   | 84 |
| Tab. 56: Cena a rozměry původního polotovaru – Elektroda pro výrobu žeber [autor] .....              | 85 |
| Tab. 57: Rozměry s přídatky – Elektroda pro výrobu žeber [autor] .....                               | 85 |
| Tab. 58 Porovnání – Tvarová elektroda malých rozměrů (změna nástroje) [autor] .....                  | 86 |
| Tab. 59: Porovnání – Tvarová elektroda velkých rozměrů (změna nástroje) [autor] .....                | 86 |
| Tab. 60: Porovnání – Elektroda pro výrobu žeber (změna nástroje) [autor] .....                       | 87 |
| Tab. 61: Ekonomický propočet – tvarová elektroda malých rozměrů (pětiosé frézování) [autor] .....    | 88 |
| Tab. 62: Ekonomický propočet – tvarová elektroda velkých rozměrů (pětiosé frézování) [autor] .....   | 89 |
| Tab. 63: Ekonomický propočet – tvarová elektroda atypických rozměrů (pětiosé frézování) [autor] .... | 90 |
| Tab. 64: Souhrn ušetřených nákladů – malá tvarová elektroda [autor] .....                            | 91 |
| Tab. 65: Souhrn ušetřených nákladů – velká tvarová elektroda [autor] .....                           | 92 |
| Tab. 66: Souhrn ušetřených nákladů – elektroda pro výrobu žeber [autor] .....                        | 93 |
| Tab. 67: Cena nástrojů [autor] .....   | 93 |
| Tab. 68: Změna nástroje – ušetřené náklady [autor] .....   | 93 |
| Tab. 69: Náklady – malá tvarová elektroda (pětiosé obrábění) [autor] .....                           | 94 |
| Tab. 70: Náklady – velká tvarová elektroda (pětiosé obrábění) [autor] .....                          | 94 |
| Tab. 71: Náklady – elektroda atypických rozměrů (pětiosé obrábění) [autor] .....                     | 94 |



## 11. Seznam příloh

Příloha 1: Část katalogu s řeznými podmínkami pro Válcovou frézu [35]