

# Technologie výroby grafitových elektrod

Přemysl Chvilíček

---

Bakalářská práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Přemysl Chvilíček**

Osobní číslo: **T13070**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Technologie výroby grafitových elektrod**

Zásady pro vypracování:

- 1. Teoretická studie na dané téma**
- 2. Návrh tvaru grafitové elektrody**
- 3. Programování elektrody za pomoci software Siemens NX**
- 4. Výroba elektrody na tříosé CNC frézce**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**dle doporučení vedoucího práce**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství


Datum zadání bakalářské práce:

**8. ledna 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**20. května 2016**

Ve Zlíně dne 3. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 11.5.2016

*Chvilíček Přemysl*  
.....

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla za výdělkem jim dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělkem dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Bakalářské práce se zaměřuje na technologii výroby grafitových elektrod pro elektroerozivní obrábění (EDM). Hlavním cílem práce je vytvoření elektrody pro zadanou dutinu formy a programu pro CNC frézování uhlíkové elektrody pro EDM. Elektroerozivního obrábění se využívá zejména u takových výrobků, kde potřebujeme např. ostré hrany, které nelze běžnými konvenčními metodami vyrobit.

Klíčová slova: CNC obrábění, grafitová elektroda, CAD, CAM.

## **ABSTRACT**

Bachelor thesis focuses on the technology of production graphite electrodes for electrical discharge machining (EDM). The main aim is to create electrode for a given mold cavity and a program for CNC milling of carbon electrodes for EDM. EDM is used in particular for products which need e.g. sharp edges, which can not be produced by common conventional methods.

Keywords: CNC cutting, graphite electrode, CAD, CAM.

Na začátku bakalářské práce bych rád poděkoval panu Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a rady při vypracování této bakalářské práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
<b>1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ.....</b>	<b>12</b>
1.1 ELEKTROEROZIVNÍ METODY OBRÁBĚNÍ.....	13
1.1.1 Elektrojiskrové obrábění.....	14
1.1.2 Elektrokotáční obrábění.....	16
1.1.3 Anodomechanické obrábění.....	18
<b>2 FRÉZOVÁNÍ.....</b>	<b>20</b>
2.1 DRUHY FRÉZOVÁNÍ.....	20
2.2 NÁSTROJE.....	21
2.2.1 Nástrojové materiály.....	23
2.2.1.1 Rychlořezná ocel.....	24
2.2.1.2 Slinuté karbidy.....	24
2.2.1.3 Cermety.....	24
2.2.1.4 Keramické řezné materiály.....	25
2.2.1.5 Kubický nitrid boru (CBN).....	25
2.2.1.6 Polykrystalický diamant (PCD).....	25
2.2.2 Ostření fréz.....	25
2.2.3 Upínání nástrojů a obrobků.....	26
2.3 ČÍSLICOVĚ ŘÍZENÉ OBRÁBĚCÍ STROJE.....	27
2.4 ROZDĚLENÍ CNC FRÉZEK.....	29
2.4.1 Konzolové frézky.....	29
2.4.2 Rovinné frézky.....	30
2.4.3 Speciální frézky.....	30
2.5 ŘEZNÁ RYCHLOST A POSUV.....	31
<b>3 VÝROBA ELEKTROD PRO EDM.....</b>	<b>32</b>
3.1 MATERIÁLY PRO VÝROBU ELEKTROD.....	32
3.2 STANOVENÍ TVARU A ROZMĚRŮ ELEKTRODY.....	36
3.3 UPÍNÁNÍ NÁSTROJOVÝCH ELEKTROD.....	37
3.4 KVALITA POVRCHU.....	38
<b>4 CNC PROGRAMOVÁNÍ.....</b>	<b>39</b>
4.1 SOUŘADNICOVÝ SYSTÉM STROJE.....	39
4.2 STRUKTURA A TVORBA PROGRAMU.....	40
4.2.1 Absolutní programování.....	42
4.2.2 Přírůstkové programování (inkrementální).....	43
4.3 POUŽITÍ NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH FUNKCÍ G A M.....	43
<b>5 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE.....</b>	<b>45</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>46</b>
<b>6 MATERIÁL ELEKTRODY.....</b>	<b>47</b>
6.1 HK -15 (VÝKONNOSTNÍ GRAFIT).....	47
<b>7 CNC FRÉZKA HWT C-442 A POUŽITÉ NÁSTROJE.....</b>	<b>48</b>
7.1 POUŽITÉ NÁSTROJE.....	49
7.1.1 Frézy pro obrábění grafitu.....	49



7.1.1.1	Univerzální válcová fréza (15002D).....	50
7.1.1.2	Mikrofréza (15012D).....	50
7.1.1.3	Gravírovací fréza (29040).....	51
<b>8</b>	<b>MODELOVÁNÍ ELEKTRODY .....</b>	<b>52</b>
8.1	VÝBĚR MODELU ELEKTRODY .....	52
8.2	TVORBA MODELU ELEKTRODY .....	53
<b>9</b>	<b>PROGRAMOVÁNÍ A OBRÁBĚNÍ .....</b>	<b>54</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>59</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>64</b>

## ÚVOD

V současnosti je výroba pomocí elektroeroze velmi rozsáhlá především u výroby složitých tvarů, které nelze jinými metodami obrábění dosáhnout. Jediný omezující faktor elektroerozivního obrábění je vodivost některých obráběných materiálů. Na obrábění nemá vliv houževnatost, tvrdost, pevnost obráběného materiálu. Kvalita a rychlost obrábění je ovlivněna mnoha faktory. Přímou ovlivňující faktory jsou napětí, proud a délka impulzu. Naopak nepřímo ovlivňující faktory je doba hloubení mezi výplachy pohybem elektrody, délka přestávky nebo zvýšení přitlaku elektrody.

Úkolem bakalářské práce je navrhnout a vyrobit grafitovou elektrodu. Praktická část práce bude probíhat na tříosé frézce HWT C-442 pomocí NC programu vytvořeného v Siemens NX.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Rostoucí rozsah využívání nekonvenčních metod obrábění (dále jen NMO) je vyvolán novými poznatky ve vývoji a používání nových materiálů se zvýšenými fyzikálně mechanickými vlastnostmi. Jsou to např. materiály s vysokou pevností, tvrdostí, houževnatostí, materiály odolné vůči opotřebení apod., které nelze standardními metodami hospodárně obrábět.[3]

Obrábění těchto materiálů konvenčními metodami je velmi neproduktivní a prakticky také nemožné. Jedná se o např. řezné a tvářecí nástroje ze slinutých karbidů a speciálních ocelí nebo tvarové části technologických zařízení, hlavně nástroje pro zpracování plastů.[2]

**NMO jsou charakterizovány těmito skutečnostmi:**

1. rychlost, možnosti a výkonnost obrábění nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu
2. materiál nástroje nemusí být tvrdší než obráběný materiál
3. možnost provádění složitých technologických operací (výroba děr se zakřivenou osou, obrábění děr složitých tvarů a tvarových dutin)
4. možnost zavedení plné mechanizace a automatizace a tím včlenění dané operace do výrobní linky
5. možnost zvýšení technologičnosti konstrukce a sériovosti výroby se současným omezením výroby zmetků a snížení pracnosti daných operací
6. současně s výrobou tvaru dochází u některých NMO také ke změně vlastností povrchové vrstvy (zvýšení odolnosti proti korozi, zvýšení únavové pevnosti) [3]

**Nekonvenční metody obrábění podle podstaty oddělování třísky dělíme na:**

1. Elektrické metody (elektroerozivní, elektrokontaktní, anodomechanické)
2. Chemické metody
3. Elektro-chemické metody
4. Ultrazvukové metody
5. Paprskové metody [2]

Tab. 1 Technologické parametry vybraných NMO [3]

Metoda	Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Stupeň přesnosti IT	Hloubka ovlivněné vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]	Úběr [ $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ]	Měrná spotřeba energie [ $\text{kWh} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]
Elektrojiskrové obrábění	50 až 0,2	6 až 12	10 až 300	$10^{-4}$ až 0,6	0,1 až 1
Obrábění paprskem laseru	50 až 6,3		100	$10^{-4}$	8 až 13
Obrábění paprskem elektronů	50 až 6,3		beze změn	$10^{-2}$ až 0,4	
Obrábění paprskem plazmy			500 až 800	100	
Elektrochemické obrábění	2,5 až 1,6	9 až 12	beze změn	0,05 až 0,5	0,1 až 0,3
Elektrochemické broušení	0,8 až 0,2	6 až 9	beze změn	$10^{-2}$	0,04 až 0,08
Ultrazvukové obrábění	6,3 až 0,4	7 až 9	beze změn	$10^{-2}$ až 10	0,07 až 0,8

## 1.1 Elektroerozivní metody obrábění

Elektroerozivní obrábění patří mezi NMO využívající elektro-tepelných účinků úběru materiálu a je nejrozšířenější nekonvenční metodou obrábění. V mezinárodní literatuře se označuje zkratkou EDM (ELECTRO DISCHARGE MACHINING).[1]

Tento typ obrábění zahrnuje řadu metod, které mají jeden hlavní společný znak, úběr materiálu je vyvolán periodicky se opakujícími elektrickými nebo obloukovými výboji. Obrábění probíhá na dvou elektrodách, které jsou odděleny jiskrovou mezerou o velikosti 1 až 500 $\mu\text{m}$  ponořených v dielektriku (nejčastěji petrolej). Výboj mezi elektrodami vznikne v místě nejsilnějšího elektrického napětového pole, kde vytvoří vodivý kanál umožňující přechod jiskry mezi nástrojem a obrobkem. Při tomto jevu vznikají teploty až 10 000 °C a z povrchu obráběné plochy se odtavují částice materiálu. Délka výboje, jeho účinek i charakter jsou určeny elektrickými parametry generátoru a fyzikálními podmínkami v prostoru výboje. [2],[3]

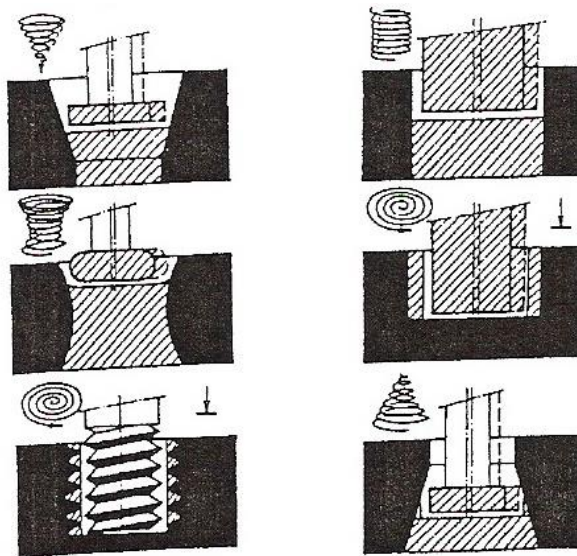
**V praxi uplatňujeme různé způsoby podle druhu elektrické eroze:**

- 1. elektrojiskrový** - využívající erozivních účinků elektrické jiskry v dielektriku bez dotyku elektrod
- 2. elektrokontaktní** - využívající tepelných účinků elektrických oblouků a s využitím mechanických účinků tření

**3. anodomechanický** - současné využití elektrochemických účinků s tepelnými účinky elektrického proudu. Odebírání materiálu probíhá erozí, chemický účinek je pouze ve vytváření nevodivé pasivační vrstvy. [2]

### 1.1.1 Elektrojiskrové obrábění

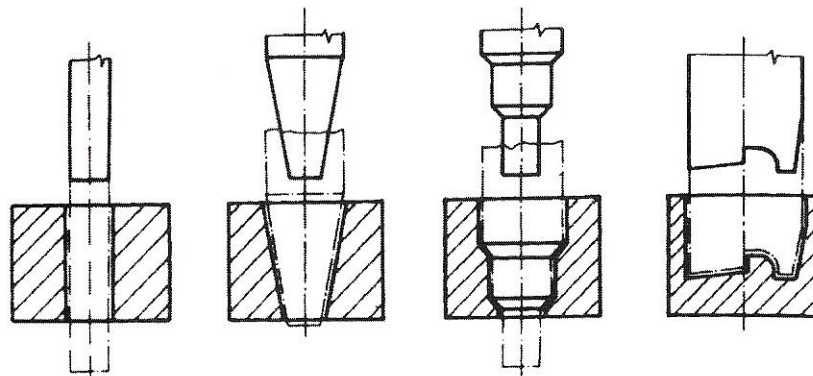
Elektrojiskrové obrábění představuje základní typ elektroerozivních metod. Je založeno na plynulém oddělování miniaturních třísek v důsledku vzniku elektrické jiskry, které nataví nebo vypaří třísku, která se dále dopravuje (ochlazuje) dielektrikem. Materiál (tříska) je odebírán postupným pomalým přímočarým posuvem elektrody (nástroje) do obráběné plochy. Díky této technologii můžeme vyrábět průchozí díry, tvarové otvory, formy pro lití, střížné nástroje, nástroje pro lisování plastů, dutiny (kovací zápustky, razidla, apod.) (Obr. 1). [2]



*Obr. 1 Elektrojiskrové obrábění - aplikace vychylovače a elektrod [3]*

Hloubení dutin se využívá při výrobě a obnově kovacích zápustek. Tato metoda je velmi účinná, protože kovací zápustky bývají opatřeny tvrdými návary nebo jsou přímo zhotoveny z těžko obrobitelných kovů.

Taky hloubení průchozích děr široce využívá elektrojiskrového obrábění. Výhodou je obrobitelnost děr velmi malých průměrů (od 0,5 mm výše). Využití je zejména při výrobě vstřikovacích trysek spalovacích motorů, dýz hořáků, v jemné mechanice apod. Tímto způsobem je možné vyrábět i otvory různých složitých průřezů, a to i do houževnatých a těžko obrobitelných materiálů (Obr. 2). Všechny otvory vyrobené hloubicí metodou jsou mírně kuželovité, což využijeme hlavně tam, kde je požadován úkos (střižnice a plastikářské formy). Kuželovitost lze částečně odstranit zavedením dielektrika proti směru hloubení. [2]

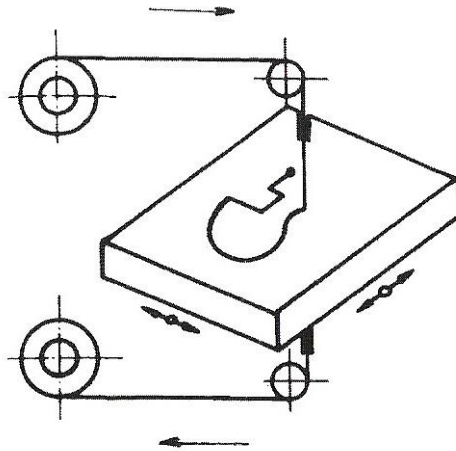


Obr. 2 Příklady prvků vyráběných elektrojiskrovou metodou [2]

Výroba střižnic je rozšířena v nářadovných plastikářských závodů a v elektrotechnickém průmyslu. Využití najde při výrobě lisovacích strojů, rotorových a statorových plechů elektromotorů, ve vakuové technice apod. Střižnice vyrobené elektrojiskrovým obráběním vykazují v porovnání s ocelovými až dvacetinásobnou životnost. [2]

Elektrojiskrové řezání drátovou elektrodou (Obr. 3) najde uplatnění zejména při výrobě střižnic a lisovacích strojů, kde je požadována minimální šířka řezu. Nástroj (elektrodu) vytváří tenký drát, který se odvíjí z jedné cívky na druhou a prochází přes vodící ústrojí místem řezu. Prostor mezi drátem a obrobkem je zaléván dielektrikem. Jako materiál pro drátové elektrody se volí měď, mosaz a molybdenový drát o průměru 0,03 -

0,07 mm. Pohyb je řízen CNC systémem s možným nakloněním drátové elektrody v rozsahu 0 až 30°. [3]



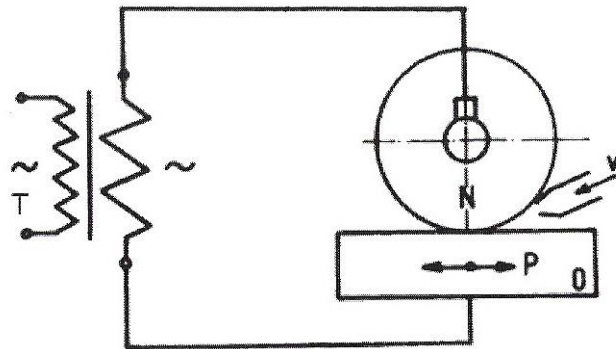
Obr. 3 Elektrojiskrové vyřezávání  
drátovou elektrodou [2]

### 1.1.2 Elektrokontaktní obrábění

Jak už název napovídá hlavním znakem této metody obrábění je, že mezi elektrodou a obrobkem při obrábění dochází ke kontaktu. Kontakt může být nepřetržitý (elektrofrikční pily, elektrofrikční soustružení) nebo intervalový, který slouží pouze k vytvoření výboje. Bez dotyku elektrody a obrobku se elektrokontaktní obrábění neuskuteční. Dalším rozdílem od elektrojiskrové metody je použití střídavého proudu.

Třetí odlišností je, že elektrické impulsy se vytvářejí přímo změnou povrchu stýkajících se elektrod za stálého připojení zdroje proudu. Po přiblížení elektrody k obrobku nastává krátkodobý oblouk. Současně na jiných místech dochází na povrchu elektrod ke kontaktu, materiál se natavuje, roste jeho odpor a uvolňuje velké množství tepla. Aby nedošlo ke svaření elektrod k sobě, musí se proti sobě pohybovat (rotační pohyb elektrody). Tímto pohybem ploch nastává přerušování kontaktů a na přerušovaných místech vzniká elektrický oblouk. Od elektrických oblouků vznikají jen malé tlakové vlny, které nestačí k odstranění roztaveného materiálu. Proto je nutné na elektrodě vytvořit malé výstupky, nebo do místa styku zavést stlačený vzduch nebo proud vody. Tím je zajištěno odstranění roztaveného materiálu. [2]





Obr. 4 Princip zařízení pro elektrokontaktní  
obrábění [2]

T- transformátor, N- nástroj, O- obrobek, V- přívod stlačeného vzduchu nebo vody pro chlazení, P- posuv obrobku

Velikost pracovního napětí bývá 12 až 25 V, případně i vyšší. Podle toho obrábění dělíme na nízkonapěťový proces s vyššími přitlačnými tlaky, kde převládají mechanicko-frikční účinky a proces s vyšším napětím, kde převládá účinek elektrické energie za použití nižších přitlačných tlaků. [2]

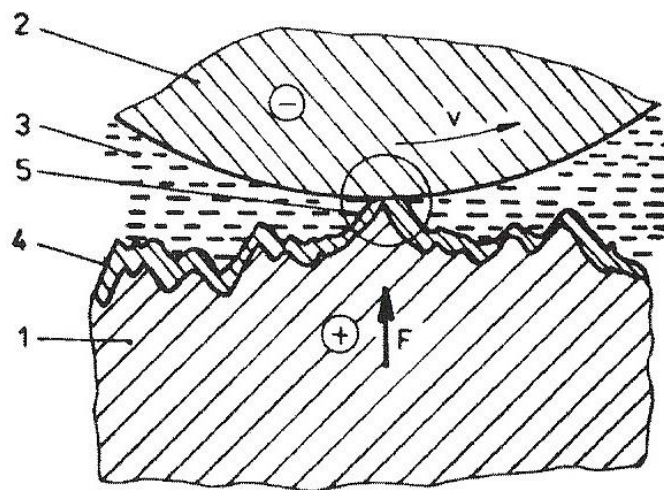
Obvodová rychlost kotouče (nástroje) se pohybuje mezi 20 až 60  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a dosahuje se drsnosti povrchu  $R_a = 6,3 \mu\text{m}$ . Úbytek kotouče nastává hlavně na jeho okrajích, což ovlivňuje přesnost, která bývá s odchylkou  $\pm 2 \text{ mm}$ , při dokončovacích operacích lze pracovat s odchylkou  $\pm 1 \text{ mm}$ . [2]

Nevýhodou je, že při obrábění v místě styku obrobku a nástroje na obrobku vznikají návary, které se také tvoří v místě ukončení posuvu. Tyto návary je možné omezit vhodným umístěním usměrněného proudu vzduchu nebo vody. Další nevýhodou je intenzivní hluk, rozstřikování kovů do okolí nebo světlo vznikajících oblouků, které obsahuje ultrafialové záření. Proto používáme různé druhy ochrany. [2]

Elektrokontaktní metodu obrábění je nejvýhodnější používat pro hrubovací práce a řezání na těžko obrobitelných materiálech. Výkon této metody je velmi efektivní, a to až  $30 \text{ cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$  při použití vzduchu a až  $200 \text{ cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$  při použití vody. Vzhledem k uvolnění velkého množství tepla je tato metoda vhodná zejména pro obrobky větších rozměrů, aby nedocházelo k jejich přehřátí a tepelným deformacím. [2]

### 1.1.3 Anodomechanické obrábění

Z hlediska odebrání materiálu je anodomechanické obrábění na rozhraní mezi elektroerozivním a elektrokontaktním obráběním. Při použití vyšších napětí a větších proudů je materiál ubírán elektrotermickým účinkem (elektroerozivní metoda), zatímco při použití nižších hodnot dochází k úběru materiálu elektrochemickým účinkem (elektrochemická metoda). Proces probíhá při vysokých teplotách, kde rozrušený materiál je z místa obrábění odváděn rotujícím povrchem nástroje (kotouče). Pracovní prostor je zaplaven kapalinou plnící funkci izolátoru s chladícím účinkem. V místě narušení izolační vrstvy nástrojem nastává výboj. Další složkou úběru materiálu je elektrochemické rozpouštění, protože jsou splněny podmínky elektrolýzy. Zdrojem energie je usměrňovač střídavého proudu s nízkým napětím a o výkonu desítek kW. [3]



Obr. 5 Elementární schéma anodomechanického obrábění [2]

- 1- obrobek, 2- nástroj, 3- elektrolyt, 4- pasivační vrstvička  $\text{SiO}_2$ ,  
5- místo elektrického výboje

Nejpoužívanějším elektrolytem je vodný roztok křemičitanu sodného (vodní sklo)  $\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$  měrné hmotnosti 1,27 až 1,32  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , do kterého se přidává glykol nebo glycerín pro zabránění tuhnutí. Pro anodomechanické broušení lze použít 1 až 1,5 % vodní roztok tetraboritanu sodného (borax). Podle použitého napětí 12 až 24 V dosáhneme požadované drsnosti povrchu. Nástrojem je většinou ocelový kotouč, pás nebo drát zapojen na katodu a součást na anodu. Čím vyšší je napětí, tím je výkon obrábění větší, ale současně se zvyšuje drsnost povrchu. Dosahovaná drsnost povrchu bývá  $R_a = 12 \mu\text{m}$  a obvodová rychlost kotouče je 8 až 11  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . [2],[3]

Dnes se anodomechanické obrábění používá zejména pro dělení houževnatých ocelí, cementovaných a kalených ocelí, nerezavějících ocelí pro chemický průmysl, žáruvzdorných a magnetických slitin hlavně v energetice, nebo také materiálů znečištěných nekovovými částicemi, jako ocelolitinových odlitků apod. Výhodou je řezání tenkostěnných profilů, které by se při řezání obvyklou metodou v důsledku řezných odporů deformovali. Tato metoda najde využití taky pro tvarové broušení nástrojů ze slinutých karbidů. [2]

## 2 FRÉZOVÁNÍ

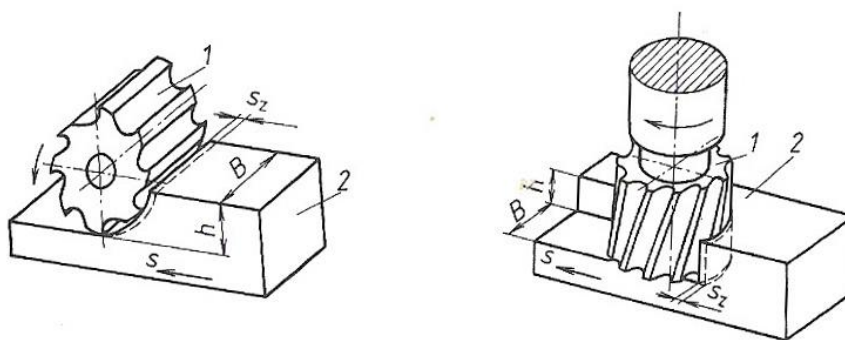
Frézování je nejpoužívanější metodou obrábění, ihned po soustružení. Při frézování odebírá třísku každý břit (zub) víceklínového nástroje. Nástroj (fréza) vykonává hlavní pohyb, vedlejší pohyb (posuv) většinou vykonává obrobek. Frézy jsou několikabřité nástroje, jejichž břity jsou uspořádány na válcové, kuželové nebo čelní ploše frézy. Rozeznáváme válcové, čelní a válcové, kotoučové, kuželové, tvarové, odvalovací a závitové frézy. Úběr materiálu je přerušovaný. Frézováním se vyrábí rovinné plochy, tvarové přímkové nebo tvarové zborcené plochy. Způsob záběru frézy do obrobku dělí frézování na válcové, čelní a okružovací. [2]

### 2.1 Druhy frézování

Během válcového frézování se odebírá z obrobku tříška pomocí břitů, které jsou uspořádány po obvodě frézy. Směr posuvu k ose frézy je kolmý. Výsledný řezný pohyb, tedy dráha břitu nástroje vzhledem k obrobku, je vytvořen otáčivým pohybem břitu nástroje a podélným, přímočarým pohybem obrobku. Podle směru posuvu obrobku vzhledem ke směru otáčení frézy rozeznáváme frézování sousledné a nesousledné (protisměrné), tím se mění průřez odebírané třísky od maxima do nuly nebo od nuly do maxima. [2]

Při čelním frézování je osa frézy kolmá k frézované ploše, z níž jsou oddělovány třísky břity na čele. Fréza však může oddělovat i třísky břity na obvodu, nebo jen na obvodu. Poté je opracovávaná plocha rovnoběžná s osou frézy a podle jejího tvaru to může být plocha rovinná nebo tvarová. [2]

Při okružovacím frézování se vícebřitý nástroj otáčí kolem obrobku, který se také otáčí. Frézováním tak můžeme vytvořit rotační plochy válcové i tvarové. Nejčastěji se používá na výrobu závitů. [2]



Obr. 6 Frézování obvodem válcové frézy a čelem čelní frézy [4]

1- fréza, 2- obrobek,  $s = f$  - posuv,  $s_z = f_z$ - posuv na zub

Tab. 2 Druhy frézování [7]

	Druhy frézování	Nástroj	Použití například:
1	Čelní frézování	Kotoučová fréza čelní – úhel $\kappa$ 45° (obvykle)	Frézování rovinných ploch
2	Čelní frézování do rohu	Kotoučová fréza čelní – úhel $\kappa$ 90°	Frézování ostrovů, výstupků
3	Kopírování (frézování tvarů)	Kulová fréza – náklon 10–15°; čelní s rádiusy	Např. formy na plasty, zápusky
4	Frézování dutin	Dlouhé, štíhlé nástroje, náročné technologie	Dutiny ve formách
5	Frézování kotoučovou frézou	Kotoučová fréza	Průběžná drážka
6	Rotační frézování	Frézování ve čtvrté ose (v děličce)	Rotační tvary na výrobku
7	Frézování závitů	Jednoučelové nástroje ve tvaru stopkové frézy	Závit v otvoru, na čepu
8	Dělení materiálu	Kotoučová fréza	Nahrazuje pilu
9	Frézování vysokým posuvem	Stopková fréza s VBD – $\kappa$ 10°, hrubování	Obrábění na plochách i v dutinách
10	Ponorné frézování	Štíhlá, dlouhá fréza – zapichování	Hluboké dutiny
11	Zahlubování	Stopková fréza – sjždění do hloubky (rampou)	Drážky, kapsy
12	Šroubová interpolace	Stopková fréza – pohyb ve třech osách	Kruhové obdélníkové kapsy
13	Kruhová interpolace	Čelní fréza – kruhový pohyb v osách X, Y	Frézování rovinných ploch

## 2.2 Nástroje

Frézy je možné dělit z mnoha hledisek, zejména podle umístění břitů, tvaru zubů, průběhu ostří, upínání a konstrukce (Obr. 7). Podle toho zda jsou břity fréz umístěny na válcové, rovinné, kuželové nebo tvarové ploše, se dělí na:

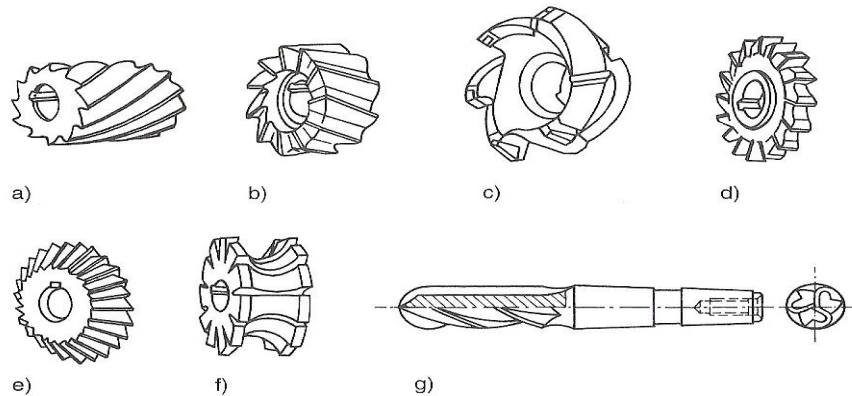
1. **válcové** - s břity na válcové ploše
2. **čelní** - s břity na válcové a čelní ploše

**3. kotoučové**- s břity na válcové a obou čelních plochách

**4. kuželové** - s břity na jedné nebo dvou kuželových plochách

**5. tvarové** - s břity na tvarových plochách (zaoblovací frézy, frézy na závity apod.)

[4]



Obr. 7 Příklad druhů fréz [4]

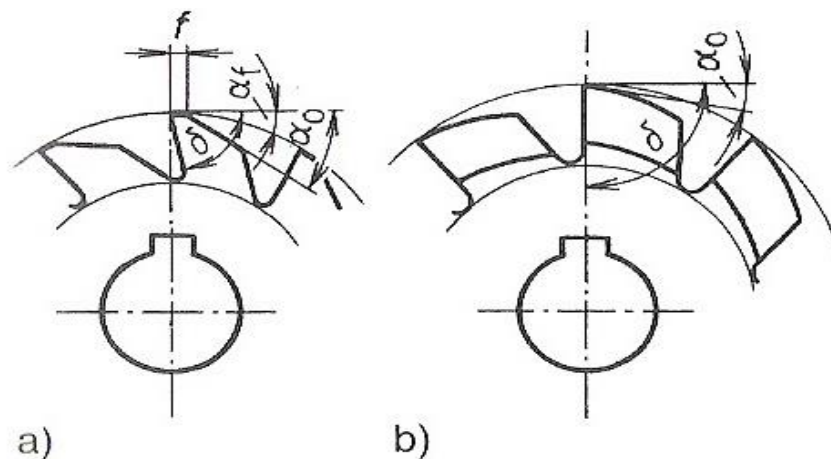
a) válcová, b) čelní, c) frézovací hlava, d) kotoučová, e) kuželová, f) tvarová,

g) stopková s kulovým čelem

**Podle tvaru zubů (Obr. 8):**

**1. s frézovanými zuby** - zubové mezery se frézují kuželovými frézami

**2. s podsoustruženými zuby** - hřbety zubů se obrábějí na podtáčecích soustruzích a mají tvar tzv. Archimédovy spirály (zejména tvarové frézy) [4]



Obr. 8 Zuby fréz - a) frézovaný zub, b) podsoustružený zub [4]

$\alpha_0$ - úhel hřbetu,  $\alpha_f$ - úhel hřbetu na fazetce,  $\delta$ - úhel řezu,  $f$ - šířka fazetky

**Podle průběhu ostří zubů:**

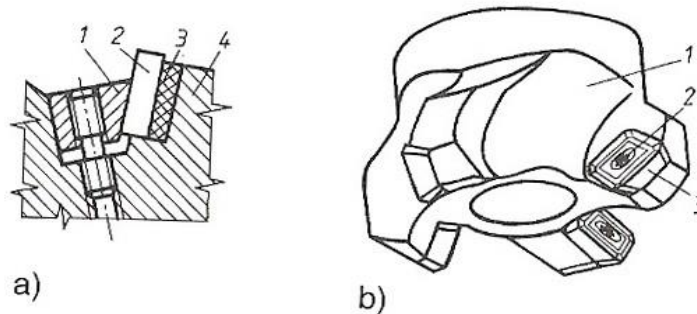
1. s **přímými zuby** - mají zuby rovnoběžné s osou
2. se **zuby do šroubovice** - pravotočivé nebo levotočivé [4]

**Podle upínání:**

1. **stopkové** - s kuželovou stopkou (kužel Morse, ISO) nebo válcovou stopkou
2. **nástrčné** [4]

**Podle konstrukce:**

1. **celistvé** (monolitní)
2. s **vyměnitelnými břitovými destičkami (Obr. 9)**-se zuby z rychlořezných ocelí, slinutých karbidů, řezné keramiky nebo polykrystalického kubického nitridu boru
3. **skládané** - z více samostatných fréz, používají se při frézování složitých tvarů [4]



Obr. 9 Příklady mechanického upnutí destiček na fríze [4]

a) klínem: 1- upínací klín se šroubem, 2- břitová destička, 3- podložka, 4- těleso frézky

b) šroubem: 1- těleso frézy, 2- upínací šroub, 3- břitová destička

**2.2.1 Nástrojové materiály**

Celistvé frézy se vyrábějí z rychlořezných ocelí buď přesným litím nebo obráběním, frézy menších rozměrů se vyrábějí ze slinutých karbidů. Frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami mají zuby tvořené vyměnitelnými destičkami z rychlořezných ocelí, slinutých karbidů, řezné keramiky nebo polykrystalického kubického nitridu boru. Těleso frézy je vyrobeno z konstrukční oceli o vyšší pevnosti. Břitové destičky jsou k tělesu buď připájeny nebo různě mechanicky upnuty. Pro obrábění litiny se



používají frézy s mechanicky upínanými keramickými břitovými destičkami, zatímco pro obrábění kalených ocelí lze použít destičky z polykrystalického kubického nitridu boru. [4]

Tab. 3 Základní mechanické vlastnosti řezných materiálů [5]

Řezný materiál	Tvrdost HV	Pevnost		Modul pružnosti (GPa)	Rázová houževnatost (J.cm <sup>-2</sup> )	Součinitel intenzity napětí $K_{tc}$ (MN.m <sup>-3/2</sup> )
		tlak (MPa)	ohyb (MPa)			
Rychlořezné oceli	800	3 600	2 500	220	8	14
	1 000	4 200	4 500	240	30	17
Slinuté karbidy	1 200	3 000	1 100	410	0,7	6
	1 900	5 000	2 200	690	4	10
Řezná keramika	2 200	3 500	500	380	0,3	1,5
Cermety	2 500	4 500	900	420	0,5	2,5
Kubický nitrid boru	4 500	3 000	600	720		1
	6 000	5 000	1 000			
Syntetický diamant	6 000	4 000	500	1 160		
	8 000	6 000	1 000			

### 2.2.1.1 Rychlořezná ocel

I když je v současnosti dokonalejší než dříve, její použití je minimální. Používá se hlavně tam kde je požadavek na houževnatost, ostrou řeznou hranu, nebo kvůli složitosti nástroje (vrtáky, závitníky), a to často s povlaky. Podíl je snižován ve prospěch slinutých karbidů. [7]

### 2.2.1.2 Slinuté karbidy

V současnosti jsou dominantním řezným materiálem. Výkon řezné hrany je ve srovnání s dobou kdy byly uváděny na trh několikanásobný. Povlakované jsou hlavním prostředkem ke zvyšování produktivity. Náklady na slinuté karbidy jsou malé, tvoří asi 3 % celkových výrobních nákladů na výrobek. Povlakované vícevrstvé materiály tvoří většinu spotřeby, nepovlakované se používají hlavně u opracovávání vysokopevnostních slitin a na výrobu nástrojů. Hrany nepovlakovaných mohou být ostřejších než povlakované. Současné trendy směřují k jednozrné struktuře a k více než desítkám povlaků. [7]

### 2.2.1.3 Cermety

Používají se především k dokončovacím operacím obrábění. Mimo všechny požadované vlastnosti mají navíc schopnost udržet ostrou hranu, což umožňuje dodržet



úzké tolerance opracovávaného tvaru, dosažení vysoké řezné rychlosti a kvality povrchu při vysoké životnosti nástroje. Obrábění je možné i bez použití řezné kapaliny. Nelze je používat pro obrábění neželezných kovů. Omezením v použitelnosti je jejich nižší houževnatost při zatížení břitu a schopnost vzdorovat tepelným rázům ve srovnání se slinutými karbidy. Vývoj vede k houževnatějším cermetům s povlaky pro možnosti středně těžkých operací. [7]

#### **2.2.1.4 Keramické řezné materiály**

Jsou na bázi kysličníku nebo nitridu křemíku. Očekávaný nárůst používání zabrzdil prudký nárůst výkonů slinutých karbidů. Pod názvem keramické řezné materiály se skrývá široká paleta neustále se vyvíjejících materiálů pro nové speciální uplatnění. Používá se například u obrábění slitiny, kde se dosahuje řezné rychlosti 700 až 1000 m.min<sup>-1</sup> a posuvu 0,05 mm, destička je povlakovaná nitridem titanu. Velkou konkurencí je kubický nitrid boru. [7]

#### **2.2.1.5 Kubický nitrid boru (CBN)**

Nejtvrdší materiál po diamantu, očekává se další rozvoj. Používá se při obrábění dílců vyrobených práškovou metalurgií, tvrdém obrábění, obrábění litiny s obsahem perlitu 95% a při dokončovacích operacích na obrocích z vysokolegovaných slitin. Břity jsou uchyceny na vyměnitelné břitové destičce. [7]

#### **2.2.1.6 Polykrystalický diamant (PCD)**

Nejtvrdší z řezných materiálů, ale proti ostatním nesnáší vysoké teploty (do 600 °C). Používá se pro lehké a středně těžké obrábění hliníkových slitin. Malé břity z polykrystalického diamantu jsou pevně uchyceny na vyměnitelné břitové destičce ze slinutého karbidu. [7]

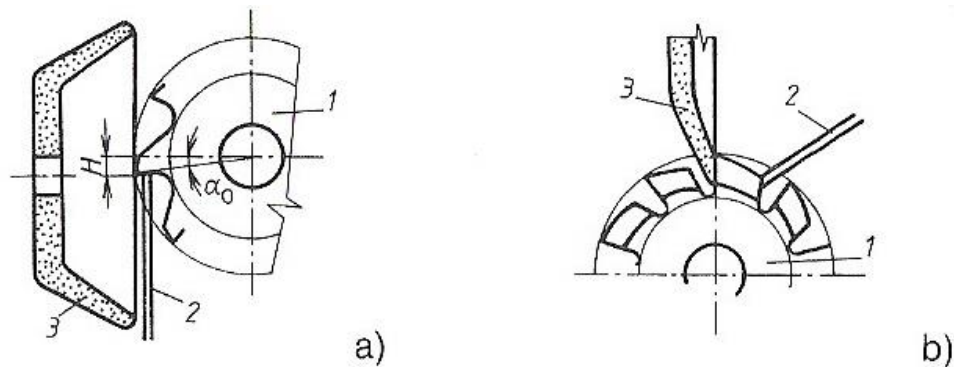
### **2.2.2 Ostření fréz**

Frézy s pájenými břity i frézy celistvé je třeba po otupení přestrojit. Frézy z rychlořezných ocelí se brousí pomocí klasických brusných kotoučů z oxidu hlinitého, zrnitosti 32 až 25, nebo brousícími kotouči z kubického nitridu boru. Pro ostření fréz ze slinutých karbidů se používají kotouče z karbidu křemíku, zrnitosti 40 až 25, nebo moderní diamantové brousící kotouče (PCD kotouče). [4]

Frézy s frézovanými zuby se ostří na hřbetě zuby hrncovým nebo miskovým brousícím nožem (Obr. 10). Při tomto broušení se zub opírá o opěrku, která je níže než osa frézy. Výškou opěrky se nastaví velikost úhlu hřbetu. Při ostření se fréza posouvá ve směru osy podél stojící opěrky a zub se k opěrce přitlačuje. Lze tak brousit i zuby ve šroubovici. [4]

Frézy s podsoustruženými zuby se ostří na čele zuby, (Obr. 10) tím je zachován tvar profilu frézy. U přímých zubů se ostří se talířovým brousícím kotoučem a u zubů do šroubovice kuželovou stranou kotouče. [4]

U moderních ostřících strojů s řízením CNC (ComputerNumericalControl) se používají obvykle kotouče PCD, které mají vysoký výkon a hlavně velmi vysokou životnost. Ostření ploch na těchto strojích je řízeno programem. [4]



Obr. 10 Ostření fréz a) s frézovanými zuby, b) s podsoustruženými zuby [4]

1- ostřená fréza, 2- opěrka zuby frézy, 3- brousící kotouč

### 2.2.3 Upínání nástrojů a obrobků

Důležitým kritériem kvalitního frézování je minimální axiální a radiální házení frézy. Axiální a radiální házení by se mělo pohybovat v setinách milimetrů. Upnutí nástroje musí zaručit maximální tuhost a minimální házení nástroje. [4]

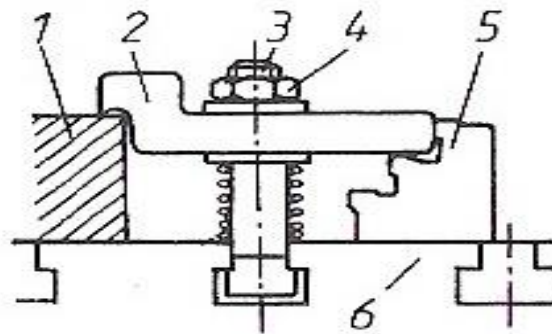
Nástrčné frézy se upínají na trn, který je ukončen kuzelem ISO nebo Morse. Ten přenáší točivý moment z vřetene třením a unášecími kameny. Točivý moment z upínacího trnu na frézu je přenášen perem nebo kameny. Frézy s válcovou stopkou se upínají do sklíčidla s upínací hlavou. Frézy s kuželovou stopkou ISO se upínají buď přímo nebo s redukcí do vřetene frézky. Upnutí je zajištěno šroubem, který prochází vrtáním vřetene.

Točivý moment se přenáší třením a unášecími kameny. Frézy se stopkou Morse se upínají a jistí stejně jako frézy se stopkou ISO. Točivý moment je přenášen pouze třením. [4]

Obrobek se upíná na pracovní stůl frézky. Upnutí obrobku musí být dostatečně tuhé, aby byla zaručena nehybnost obrobku a odolnost proti vzniku chvění. Upínací síla však nesmí být příliš velká, aby obrobek nedeformovala. Při navrhování upnutí je třeba vždy uvažovat předpokládaný směr působení řezné síly, její velikost a proměnlivost. [4]

**K upínání se používají:**

1. strojní svěráky - ruční, automatické, hydraulické
2. upínky- se šrouby a opěrkami (Obr. 11)
3. jednoúčelové upínací přípravky
4. stavebnicové upínací přípravky [4]



*Obr. 11 Upnutí obrobku pomocí upínky se šroubem a opěrkou [4]*

1- obrobek, 2- upínka, 3- šroub, 4- matice, 5- opěrka, 6- stůl

### 2.3 Číslicově řízené obráběcí stroje

Jsou to stroje, které opracovávají součásti některou z technologií obrábění (soustružení, vrtání, frézování, řezání závitů atd.) a jejich činnosti jsou řízeny automaticky zadáváním povelů v číselné podobě počítačového programu. Součást se musí ustavit do vhodné polohy, pevně upnout, do vřetene se musí upnout příslušný nástroj, spustí se hlavní řezný pohyb umožňující odebrání třísky a pohybuje se součástí nebo vřetenem stroje tak, aby v příslušné interakci nástroje se součástí bylo uskutečněno opracování požadovaných

ploch na předepsaný rozměr a tvar. Tento cyklus se automaticky opakuje v různých obměnách nástrojů, řezných podmínek, poloh obrobku apod. [6]

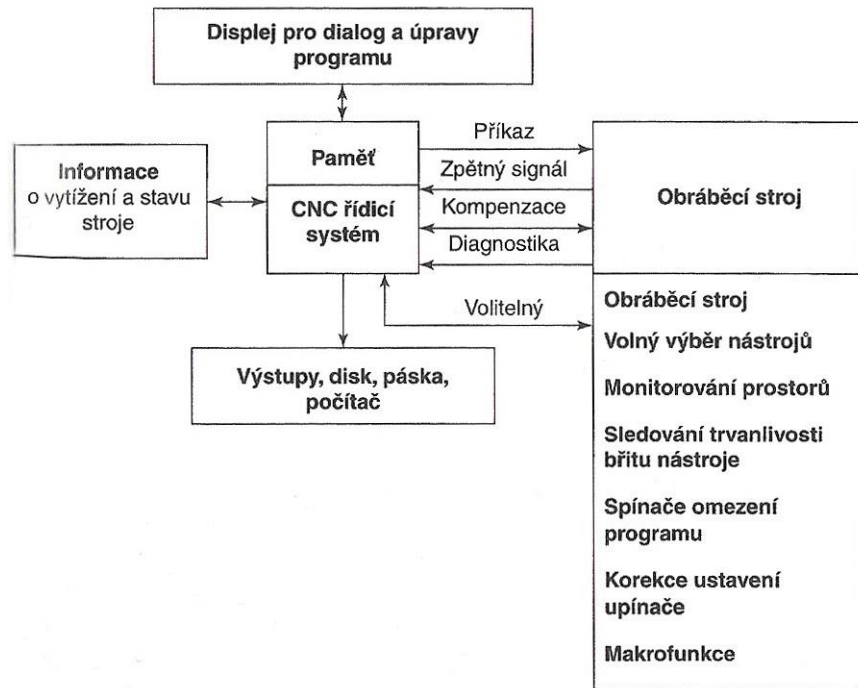
V současnosti počítačem řízené číslicové řízené obráběcí stroje (CNC) jsou natolik automatizované, že většina činností, které u konvenčního stroje vykonává obsluha je řízena automaticky počítačovým programem. Příkazem z programu jsou řízeny veškeré pohyby součásti či nástroje, změna řezných podmínek, výměna nástroje atd.

### **Výhody použití CNC obráběcích strojů:**

- 1. automatizace** - minimální vliv obsluhy na výrobní proces (většina výrobních cyklů může probíhat bez zásahu obsluhy), což snižuje počet chyb, stálost pracovního cyklu (zkrácení času výroby) a možnost obsluhy pouze zaškoleným pracovníkem
- 2. přesnost každého výrobku** - (měří se na mikrometry) závisí na kvalitě příslušného programu
- 3. pružnost** - změna výrobního sortimentu (přizpůsobení novému výrobku) je snadná, spočívá ve změně programu a vybavení vhodnými nástroji na upínači [6]

Základem CNC obráběcích strojů je řídicí systém, který zpracovává informace o pohybu nástroje a obrobku, o jejich rychlosti, o spuštění či zastavení pomocných funkcí atd. Pohyby břitů nástroje podle geometrie obráběného povrchu obrobku musí být automatické, přesné a návazné. CNC řídicí systém umožňuje okamžité opravy, úpravy a zásahy v programu i v průběhu jeho používání. [6]

Pohybové mechanismy všech typů CNC strojů mohou konat buď jeden nebo více pohybů v různých osách. Pohyby mohou být lineární (přímé) nebo otáčivé (kruhové). Pohon jednotlivých pohybových mechanismů je zajištěn řízeným servopohonem, který umožňuje pohyb po určité dráze, určitou rychlostí a do přesné polohy. [6]



Obr. 12 CNC řízení [6]

## 2.4 Rozdělení CNC frézek

Frézovací stroje se vyskytují ve velkém množství různých modifikací. Na zahraničním i tuzemském trhu je rozsáhlý výběr výrobců dodávající CNC frézky. Obvykle se dělí na konzolové, rovinné a speciální. [4]

### 2.4.1 Konzolové frézky

Jsou nejrozšířenější a jsou určeny k frézování tvarových a rovinných ploch na malých a středně velkých součástech v kusové a malosériové výrobě. Charakterizuje je svisle přestavitelná konzola, s níž lze obrobek nastavit do potřebné polohy se zřetelem k nástroji.

**Vyrábějí se ve třech provedeních:**

**1) Vodorovné konzolové frézky** - vřeteno je uloženo horizontálně, tedy rovnoběžně s rovinou pracovního stolu a kolmou na směr podélného stolu. Obrábějí se na nich hlavně drážky kotoučovými nebo tvarovými frézami, nebo i složité tvary skládanými frézami. Dají se na nich obrábět i drážky nebo rovinné plochy stopkovými frézami a frézovacími hlavami. [4]

**2) Svislé konzolové frézky** - mají osu pracovního vřetene kolmou k upínací ploše pracovního stolu. Vřeteno je uloženo ve svislé hlavě, která může být otočná kolem vodorovné osy a lze ji obvykle natočit o  $\pm 45^\circ$ . Obrábějí se na nich zejména rovinné plochy a drážky čelními frézami, frézovacími hlavami a stopkovými frézami. [4]

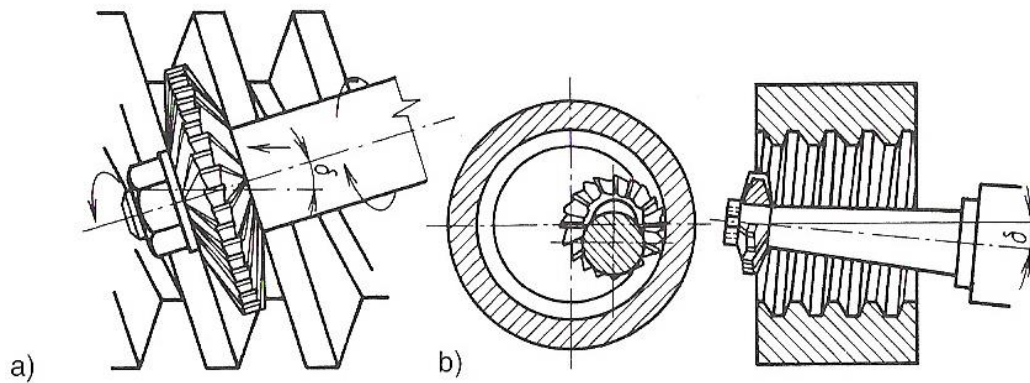
**3) Univerzální konzolové frézky** - mají podobnou konstrukci jako vodorovné a konzolové frézky. Liší se tím, že jejich pracovní stůl je ve vodorovné rovině otočný kolem svislé osy o  $\pm 45^\circ$ . Tato úprava umožňuje frézování šroubovic pomocí univerzálního dělicího přístroje. [4]

#### **2.4.2 Rovinné frézky**

Na rozdíl od konzolových se pracovní stůl pohybuje pouze v podélném směru po pevné loži. Po svislém stojanu frézky se pomocí pohybového šroubu pohybuje vřeteník. Jsou sestaveny z typizovaných dílů (loží, příčnicků, frézovacích vřeteníků, stojanů apod.). Je možné na nich obrábět velmi těžké a rozměrné obrobky nebo větší počet menších obrobků, které jsou obráběny společně. Vyznačují se vysokou produktivitou. [4]

#### **2.4.3 Speciální frézky**

Lze sem zařadit různé typy frézek určených pro speciální frézovací operace. Jsou to např. frézky na závity (Obr. 13), na držáky, na vačky, na drážky, pantografické frézky apod. Zejména pak frézky na výrobu ozubení. [4]



Obr. 13 Frézování závitů kotoučovou frézou [4]

a) vnějších závitů, b) vnitřních závitů

$\delta$  - úhel stoupání závitu

## 2.5 Řezná rychlost a posuv

**Řezná rychlost** - vztah je vždy platný, nyní se vztahuje k otáčející se fríze

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

**Posuv**

$$f = f_z \cdot z \cdot n = (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}) \quad (2)$$

### 3 VÝROBA ELEKTROD PRO EDM

Při řešení nástrojové elektrody je potřeba vzít v úvahu její materiál, výrobu a opotřebením během daného procesu. Náklady na výrobu elektrody činí 50 % celkových výrobních nákladů. Materiál elektrody by měl mít vysokou elektrickou vodivost, dobrou obrobitelnost, vysoký bod tavení a dostatečnou pevnost, aby se při vlastní práci nedeformoval (Tab.4). Na opotřebením elektrody má největší vliv teplota tavení použitého materiálu. U elektroerozivní metody obrábění se na elektrodě hodnotí opotřebením boků, opotřebením rohů a opotřebením konce elektrody. Z těchto druhů opotřebením je opotřebením rohů elektrody nejvýznamnější kritérium pro její úpravu (orování).

K základním metodám zhotovování nástrojových elektrod patří zejména obrábění, zápusťkové kování, lisování, lití, prášková metalurgie, stříkání kovu a galvanoplastika. [3]

#### 3.1 Materiály pro výrobu elektrod

Tab. 4 Materiály nástrojových elektrod pro elektroerozivní obrábění [3]

<b>Grafit</b>	Nejčastěji používaný materiál, je dobře obrobitelný a vykazuje dobré charakteristiky opotřebením. Nevýhodou grafitu je znečištění stroje
<b>Měď</b>	Má dobrou elektrickou vodivost a příznivé charakteristiky opotřebením. Tato elektroda nepracuje tak dobře jako grafit nebo mosaz. Je výhodná pro obrábění karbidu wolframu. Drsnost obrobeného povrchu je lepší než $Ra=0,5 \mu m$ .
<b>Měď – wolfram a stříbro - wolfram</b>	Jsou nákladné materiály. Používají se pro výrobu hlubokých drážek. Nejedná se o pravé slitiny. Wolfram je lisován a spékán s mědí nebo stříbrem. Tento materiál nemůže být tvarován po slinování, protože je velmi křehký.
<b>Měď - grafit</b>	Jedná se o grafit s mědí. Tento materiál je 1,5 až 2krát dražší než grafit, je výhodný pro obrábění karbidu wolframu.
<b>Mosaz</b>	Relativně levný a snadno obrobitelný materiál. Z hlediska opotřebením není výhodný.
<b>Wolfram</b>	Pro výrobu malých děr, tj. menších než 0,2 mm.

**Nástrojové elektrody lze vyrobit z materiálů, které mají:**

1. dobrou elektrickou vodivost
2. dobrou tepelnou vodivost a tepelnou kapacitu
3. vysoký bod tání a bod varu
4. odolnost proti elektrické erozi



5. vyhovující mechanickou pevnost
6. stálost tvarů a malou tepelnou roztažnost
7. dobrou obrobitelnost [6]

**To splňují následující materiály:**

1. **kovové:** elektrolytická měď, slitina wolframu a mědi, slitina wolframu a stříbra, ocel, slitina chromu a mědi, mosaz
2. **nekovové:** grafit
3. **kombinované:** kompozice grafitu a mědi [6]

Materiál nástrojové elektrody se volí podle materiálu obrobku, použitého stroje a relativního objemového opotřebení nástrojové elektrody. Úbytek materiálu elektrod závisí na elektrických parametrech výboje, polaritě generátoru a fyzikálních vlastnostech materiálu elektrody (teplota tání, elektrická a tepelná vodivost, měrné teplo). Příklady použití různých materiálů nástrojových elektrod v návaznosti na danou úlohu obrábění jsou uvedeny v Tab. 5. [6]



*Obr. 14 Polotovary grafitu pro výrobu elektrod [8]*

Tab. 5 Volba materiálu elektrody pro hrubování (H) a obrábění načisto (D) [6]

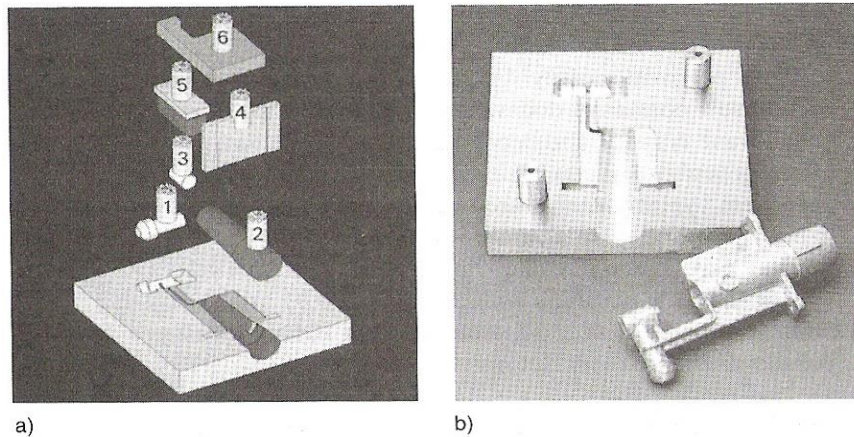
Materiál elektrody	Materiál obrobku	Operace obrábění	Jakost opracované plochy	Opotřebení elektrody	Poznámky
Wolfram – karbid	Ocel	H D	Střední Dobrá	Malé	Malý úběr
Hliník	Ocel	H D	Dobrá Špatná	Malé Velké	Stabilita oblouku u různých jakostí hliníku je nejistá
Mosaz	Ocel	H D	Dobrá Dobrá	Velké Velké	Vhodné pro výrobu malých otvorů
Mosaz	Stellit	H D	Špatná Střední	Velké Velké	Horší stabilita oblouku, přiměřený úběr.
Mosaz	Měď	H D	Dobrá Dobrá	Přiměřené Přiměřené	Pouze pro zvláštní účely.
Mosaz	Titan	H D	Dobrá Dobrá	Velké Velké	Přiměřený úběr
Měď	Hliník	H D	Dobrá Dobrá	Malé Malé	Malý úběr
Měď	Mosaz	H D	Dobrá Dobrá	Přiměřené Přiměřené	Pouze pro zvláštní účely
Měď	Litina	H D	Dobrá Dobrá	Malé Malé	Přiměřený úběr
Měď	Grafit	H D	Střední Střední	Přiměřené Přiměřené	Pouze pro zvláštní účely
Měď	Naimonic	H D	Dobrá Dobrá	Malé Přiměřené	Přiměřený úběr Dobrý úběr
Měď	Korozi-vzdorná ocel	H D	Střední Střední	Přiměřené Přiměřené	Stabilita oblouku u některých jakostí ocelí je nejistá

Pokračování Tab. 5

Materiál elektrody	Materiál obrobku	Operace obrábění	Jakost opracované plochy	Opotřebení elektrody	Poznámky
Měď	Wolfram – karbid	H D	Dobrá Dobrá	Velké Velké	Přiměřený úběr
Měď – wolfram	Ocel	H D	Dobrá Dobrá	Malé Malé	Vhodné pro malé vysoce přesné lisovací nástroje
Měď – wolfram	Wolfram – karbid	H D	Dobrá Dobrá	Přiměřené Přiměřené	Vhodné pro malé vysoce přesné lisovací nástroje
Slitina mědi	Wolfram – karbid	H D	Dobrá Dobrá	Střední Střední	Vhodná pro výrobky z karbidu wolframu
Grafit	Litina	H D	Dobrá Dobrá	Malé Střední	Vyšší úběr při záporné polaritě, ale větší opotřebení elektrody
Grafit	Měď	H D	Střední Střední	Přiměřené Přiměřené	Malý úběr
Grafit	Rychlo- řezná ocel	H D	Střední Střední	Přiměřené Přiměřené	Střední úběr Přiměřený úběr
Grafit	Korozi- vzdorná ocel	H D	Střední Střední	Střední Střední	Dobry úběr
Grafit	Ocel	H D	Dobrá Dobrá	Malé Malé	Dobry úběr Velký úběr
Grafit	Stelit	H D	Střední Střední	Přiměřené Přiměřené	Střední úběr
Grafit	Wolfram – karbid	H D	Střední Střední	Velké Velké	Střední úběr
Ocel	Ocel	H D	Špatná Špatná	Přiměřené Přiměřené	Malý úběr. Pouze pro zvláštní účely.

### 3.2 Stanovení tvaru a rozměrů elektrody

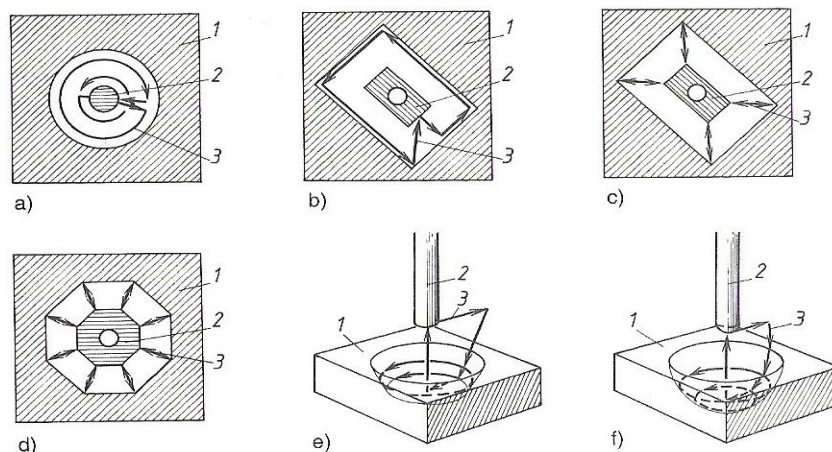
Výběru nástrojové elektrody je věnována velká pečlivost. U moderních elektroerozivních strojů s automatickou výměnou nástrojových elektrod je někdy výhodné rozdělit celkový tvar obráběné dutiny na jednodušší tvary (obdélníky, čtverce, kruhy apod.), které je přesnější a snadnější vyrobit (Obr. 15). [6]



Obr. 15 Skládání nástrojové elektrody [6]

a) jednotlivé díly skládané elektrody, b) vyrobená forma s výrobkem

Další zjednodušení tvaru nástrojové elektrody je možné provést pomocí CNC řídicího systému, který umožňuje vhodnou kombinací tvaru a pohybu elektrody vyrobit tvarově velmi složité dutiny. [6]



Obr. 16 Výroba dutiny kombinací tvaru a pohybu nástrojové elektrody [6]

a) kruhové, b), c) obdélníkové, d) osmihranné, e) kuželové, f) kulové

1 - obrobek, 2 - nástrojová elektrody, 3 - pracovní pohyb nástrojové elektrody

**Při stanovení rozměrů nástrojových elektrod se vychází z:**

**1. požadovaného rozměru dutiny**

**2. velikosti pracovní mezery** - je funkcí pracovních parametrů generátoru, je volena z normativů dodávaných výrobcem strojů

**3. požadované drsnosti obrobeného povrchu** - je funkcí pracovních parametrů generátoru a tvarové chyby, při výrobě ostrých rohů je nutná korekce tvaru nástrojové elektrody

**4. tloušťky narušeného povrchu** - má význam pouze při velkých energiích výbojů, obvykle se dosahuje hodnot 0,005 až 0,01 mm

**5. minimální hodnoty  $M_m$** , o kterou musí být nástroj menší pro dosažení požadovaného průměru dutiny [6]

### **3.3 Upínání nástrojových elektrod**

Způsoby upínání nástrojové elektrody a obrobku se volí tak, aby zajistily požadovanou přesnost výroby, operativnost (snadnou a rychlou výměnu), hospodárnost a systémovou použitelnost. [6]

**Systém upínání nástrojových elektrod (Obr. 17):**

**1.** na přírubu

**2.** za stopku

**3.** pomocí výměnných nástrojových držáků

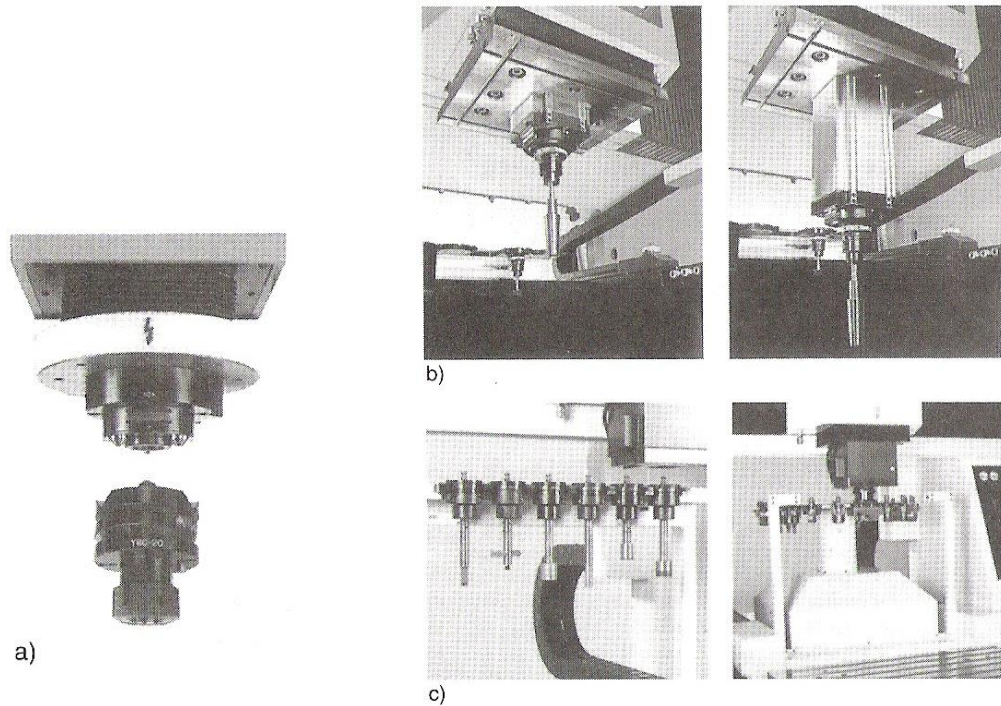
**4.** automatickou výměnou (opakovatelná přesnost polohy je  $3\mu\text{m}$ ) [6]

**Systém upínání obrobků:**

**1.** ruční - pomocí upínek nebo magnetickým upínačem

**2.** na palety [6]





Obr. 17 Upínání nástrojových elektrod [6]

a) na přírubu, b) za stopku, c) výměnné nástrojové držáky

### 3.4 Kvalita povrchu

Kvalita povrchu opracované plochy je dána její drsností a také jejím stavem (složením). Technologické parametry, tedy přesnost rozměrů a jakost obrobeného povrchu dosahované při elektroerozivním obrábění nalezneme v Tab. 6. Dosahovaný úběr materiálu obrobku činí 5% až 10 cm<sup>3</sup>. min<sup>-1</sup>. [6]

Tab. 6 Parametry dosahované elektroerozivním obráběním [6]

Způsob obrábění	Dosažitelná přesnost rozměrů (mm)	Dosažitelná jakost obrobeného povrchu Ra, R <sub>max</sub> (μm)
Opracování nahrubo pulzní zdroje velká energie výboje (hloubení)	±0,02 až ±0,5	Ra > 6 R <sub>max</sub> ~ 25
Normální opracování pulzní zdroje	±0,01 až ±0,02	Ra = 2 až 6 R <sub>max</sub> = 8 až 25
Jemné a velmi přesné obrábění, vysokofrekvenční zdroje řezání drátovou elektrodou	±0,005 až ±0,01	Ra = 0,8 až 2 R <sub>max</sub> < 6
Elektroerozivní leštění (přesné řezání drátovou elektrodou)	až ±0,002	Ra = 0,2 až 0,8 R <sub>max</sub> < 2,5 až 4

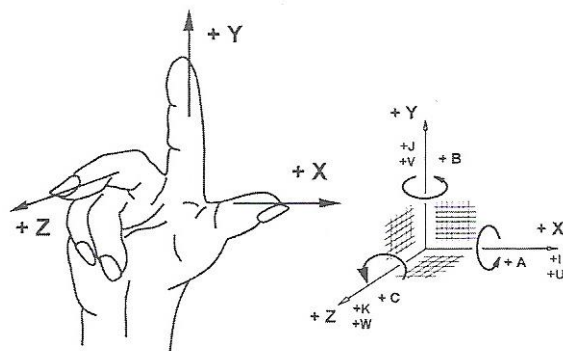
## 4 CNC PROGRAMOVÁNÍ

Principem CNC programování strojů je vytvoření programu pro pohyb nástroje vůči obrobku v daném souřadném systému a vztažným bodům CNC strojů. V následujících kapitolách se budu věnovat programování CNC obráběcích strojů, pracujících s instrukcemi G kódů (ISO).

### 4.1 Souřadnicový systém stroje

Výrobní stroje používají kartézský systém souřadnic. Definice je dána normou ČSN ISO (Terminologie os a pohybu). Systém je pravotočivý, pravoúhlý, se základními osami X, Y, Z. Dále se používají doplňkové osy I, J, K a U, V, W, jejichž osy jsou rovnoběžné s osami základními. Otáčivé pohyby kolem os X, Y, Z se označují A, B, C (Obr. 18). Platí, že osa Z je vždy ve směru osy vřetene, které přenáší řezný výkon. Hodnoty se používají i v záporném poli souřadnic. [7]

Kartézský systém souřadnic je potřebný pro sestavení programu a pro řízení stroje, nástroj se v něm pohybuje podle zadaných příkazů z řídicího panelu CNC stroje, nebo podle příkazů uvedených ve spuštěném CNC programu. Používá se také pro měření nástrojů. Podle potřeby lze souřadnicový systém posunovat, otáčet a také naklápět. V případě měření nástrojů je umístěn v bodě výměny nástroje nebo na špičce nástroje. [7]



Obr. 18 Definice kartézských souřadnic

*v pravotočivé rovině [7]*

Počátek souřadnic kartézského systému vkládá programátor do nejvýhodnějšího místa na obrobku, který se nazývá nulový bod obrobku. Ideální je jej umístit na takové místo, kde je co nejvíce zjednodušeno vyčítání jednotlivých geometrických bodů na obrobku. Zde záleží na konstruktérovi nakresleného výkresu, jak chápe technologičnost, aby ulehčil práci programátorovi a snížil tak riziko možných chyb. [7]

**Stanovení nulového bodu je ovlivněno :**

- 1. kótováním na výkrese** - nulový bod je stanoven na konstrukční základně. Pokud souhlasí se základnou technologickou, je programování usnadněno. Když nesouhlasí je potřeba kóty přepočítat, při čemž mohou nastat chyby
- 2. souměrností výrobku** - posunutím bodu 0 do osy souměrnosti obrobku (zrcadlení programu)
- 3. programátorskými zvyklostmi** - osa -Z směřuje do materiálu, pro frézování je také možné umístit nulový bod na spodní stranu obrobku (osa -Z směřuje do stolu, osa +Z do a nad materiál) [7]

Tab. 7 Značení a použití jednotlivých os [7]

Osy – druhy	↓	↓	↓	Určeno pro
Základní osy	X	Y	Z	Geometrie pohybu nástroje.
Rotační osy	A	B	C	Pokud konstrukce stroje umožňuje provádět přídavné rotační pohyby v osách, jsou tyto označeny jako A, B, C – např. u soustruhu, který používá přídavné rotační nástroje, je využita „osa“ C pro nastavení polohy obrobku vůči nástroji.
Doplňkové osy	I	J	K	Parametry interpolace, které vyjadřují např. určení středu poloměru oblouku na obrobku v souřadnicích, stoupání závitů v jednotlivých osách a další.
Sekundární doplňkové osy	U	V	W	Přídavné pohyby v osách, např. hloubka třísky.
Terciární doplňkové osy	P	Q	R	Většinou pro programování manipulátorů u strojů.

**4.2 Struktura a tvorba programu**

Na začátku vytvořeného programu je obvykle uvedeno číslo programu, případně poznámka pro programátora. Potřebné poznámky obvykle lze napsat i do každého bloku programu do závorek na jeho konci. V následujícím bloku zpravidla bývá vyjádřen tvar a velikost polotovaru (znázornění simulace obrábění). Poznámky i rozměry polotovaru je vhodné v programu uvádět kvůli pozdější identifikaci či úpravě programu. Třetí blok (G90, G91) nám oznamuje začátek programu. Čtvrtý blok je bod výměny nástroje (G00). Pátý blok reprezentuje nástroj. Šestý blok přiřadí k nástroji určité řezné podmínky, jako jsou velikost otáček, řezná rychlost nebo směr otáček. Následuje příjezd k materiálu a poté vlastní obrábění. [7]



Tab. 8 Složení programu v bloku [7]

Příklad				Název	Poznámka
N 40 G 00 X 100 Z-50				Blok (věta)	Doporučené pořadí adres jednotlivých slov ve větě je: <b>N G (M) X Y Z F S T D</b> . Toto se nemusí dodržovat, záleží na daném řídicím systému. Doporučuje se ale dodržovat pro větší přehlednost a kontrolu.
N 40	G 00	X 100	Z-50	Příkaz (slovo)	
N	G	X	Z	Adresa	
40		00		Významová část	
100		-50		Rozměrová část	

Tab. 9 Význam nejpoužívanějších adres [7]

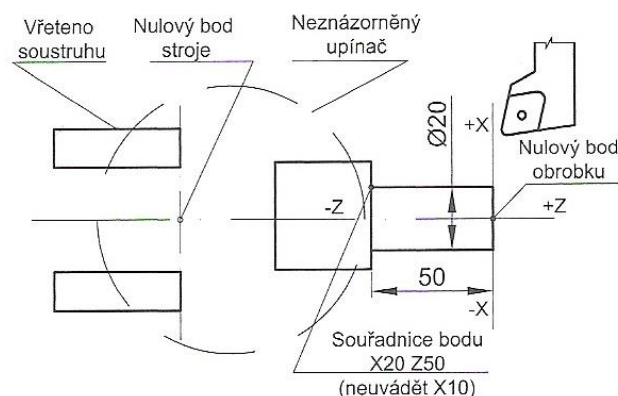
Písmeno	Význam	Poznámka
X Y Z	Základní osy souřadného systému – pohyby v osách.	Některá z uvedených písmen abecedy jsou pro výrobce řídicích systémů závazná, některá doporučená.
A B C	Rotace kolem základních os.	
I J K	Parametry kruhové interpolace (střed rádiusu), stoupání závitu ve směru os.	
P+ Q R	Pohyb paralelně podél základních os.	Neobsazená písmena abecedy jsou volná, výrobci je obsazují podle specifik svých řídicích systémů, tedy podle možností daných stroji, pro které jsou především určeny.
R	Rádus. Některé systémy používají R jako parametr v podprogramech.	
U V W	Druhý pohyb paralelně se základními osami.	
T	Nastroj.	
D	Paměť korekce nástrojů.	
G	Přípravná (geometrická) funkce.	
M	Pomocná (přídavná) funkce (strojní).	
N	Číslo bloku (věty).	
F	Posuv.	
S	Otáčky vřetene. Konstantní řezná rychlost. Omezující otáčky.	
L	Volání podprogramu.	

Tab. 10 Příklad a užití vět (bloku) [7]

Název a příklad	Užití
<b>Věta (blok), obvykle začíná písmenem N a číslem.</b> Příklad: N40 G00 X100 Z-50 N40 = číslo bloku	Čísluje se obvykle po desítkách, aby bylo možné dodatečné vložení dalších vět, například při opravě programu. Řídicí systém většinou řadí bloky podle čísel vzestupně a v tomto pořadí je čte (blok po bloku). Stroj tím vykonává zadané příkazy. Vzestupnost čísel slouží pro lepší orientaci programátora v programu a při hledání chyb. Hlášení chyby nastane v N cílovém bloku, ale kontrolujeme rovněž startovací blok. Pokud by následující věta (nebo věty) obsahovala některé stejné instrukce, ty se nemusí psát, mají platnost do té doby, než budou přepsány, jsou to modální funkce. (Modální = jsou to adresy jako např. G0, G1, G2, G3; F; X; Y; Z).
<b>Přípravné (hlavní) funkce G (Go)</b> Příklad: G00; G01; G42 Příklad: G0; G1; G42	Zpracovávají geometrické informace. Některé systémy připouštějí vložit i více G funkcí do jedné věty (z jiných skupin). Pokud je u dvojmístného čísla první číslice 0, lze psát pouze druhou číslici. Některé systémy používají více než dvojmístná čísla G a M.
<b>Pomocné funkce M (Machine)</b> Příklad: M04, také M4	Vyvolávají činnosti mechanismu stroje – často funkce M používá programovatelné automaty (řízení PLC), případně zajišťuje, že vymění nástroj až tehdy, kdy je vřetenem stroje zastaveno. Některé se týkají i řídicího systému, jiné jsou dány výrobcem stroje,
<b>Informace o dráze</b> Příklad: X20 Z-30	Jsou zadány cílovým bodem v souřadnicích absolutně (G90), nebo přírůstkem (G91).
<b>Funkce nástroje T (Tool)</b> Korekce nástroje D Příklad: T01 D01	Nástroj a jeho korekce lze u dalších řídicích systémů vyjádřit také jako T0101 (druhé dvojčíslí jsou korekce). Jiné přiřazují korekce k nástrojům v programu. Existují i další řešení.
<b>Posuvové funkce F (Feed)</b>	Velikost posuvů se zadává v mm za otáčku (představitel soustruh), [mm × ot. <sup>-1</sup> ], nebo v mm za minutu (představitel frézka), [mm × min. <sup>-1</sup> ].
<b>Funkce S (Speed)</b>	Vyjadřuje: velikost otáček za minutu [ot. <sup>-1</sup> ] nebo řeznou rychlost [m × min. <sup>-1</sup> ], případně bezpečnostní, omezující otáčky.

#### 4.2.1 Absolutní programování

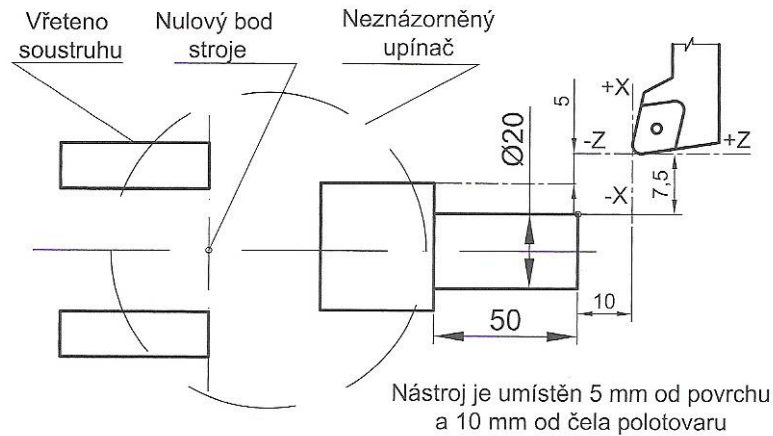
Při absolutním programování je koncová poloha bodu zadaná vzhledem k nulovému bodu programu (nulový bod obrobku, stroje) a je nezávislá od momentální polohy nástroje. Tím je myšleno, že těmito hodnotami je určené místo, kde je potřeba nástroj přesunout. [9]



Obr. 19 Princip absolutního programování [7]

### 4.2.2 Přírůstkové programování (inkrementální)

Řízením je možné zadat, jakým směrem a do jaké vzdálenosti je třeba nástroj přemístit. Tyto údaje se vždy vztahují na momentální polohu nástroje. Řízení rozpozná inkrementální formu polohy příkazem "G91" nebo podle dodatečného písmena "I" v označení příslušné osy. [9]



Obr. 20 Princip přírůstkového programování [7]

### 4.3 Použití nejdůležitějších funkcí G a M

Tab. 11 Použití nejdůležitějších funkcí G,M [7]

Označení funkce	Název funkce	Použití	
G00	Lineární interpolace	Rychloposuvy	
G01		Pracovní posuvy	
G02	Kruhová interpolace (zhotovení rádiusů)	Ve směru	
G03		Protiv směru	
hodinových ručiček			
U rádiusů je nutno rozlišit směr pohledu: soustruh – pohled za osu rotace, frézka – ze strany plusové osy Z (shora)			
G17	Pracovní rovina	X-Y	Určení roviny, ve níž se provádí pracovní posuvy a rychloposuvy (použití u frézek, soustruhů s poháněnými nástroji, u obráběcích center).
G18		Z-X	
G19		Y-Z	
G33	Řezání závitu	Programátor určuje v programu v bloku každou tříska její rozdílnou hloubkou.	
Autoři softwarů poskytují i cykly pro řezání závitů – programování je jednodušší, nabízí více vhodných strategií pro řezání závitů. Cykly a jejich způsob programování je různý podle jednotlivých autorů softwaru.			
G40	Zrušení korekcí	Vypnutí matematického aparátu výpočtu ekvidistanty.	
G41	Zapnutí korekce rádiusů	Výpočet dráhy nástroje, její ekvidistanty.	
G42		Ekvidistanta, nástroj vlevo od kontury.	
Ekvidistanta, nástroj vpravo od kontury.			
Určující je směr pohledu – dívat se ve směru pohybu nástroje.			
G45, 46, 47*	Tečné (tangenciální) nájezdy a odjezdy	Pro plynulý tečný (tangenciální) nájezd do požadovaného bodu na (vnější nebo vnitřní) kontuře obrobku a pro odjezd nástrojem – realizuje se v přímce, rádiusu, oblouku.	
G53	Zrušení posunu nulového bodu	Používá se tehdy, když za posledním posunem pokračuje pohyb v původních souřadnicích.	

Pokračování Tab. 11

G54–59*	Posuny nulového bodu		Posuny absolutně (dříve i přírůstkové), na začátku i v průběhu programu.		
<i>G540 až G599 se používá na přípravcích s více kusy – provádí se posun nulového bodu z jednoho kusu na další.</i>					
G90	Absolutní		Programování – popis drah nástroje v souřadnicové soustavě.		
G91	Přírůstkové		Programování – popis dráhy nástroje, o kolik se nástroj posune v osách X, Y, Z.		
G92*	Omezení otáček (podle řídicího systému)		Stanoví maximální velikost otáček, které neohrozí bezpečný chod stroje, v závislosti na konkrétním stroji, obrobku – použití spolu s G96.		
G96	Konstantní řezná rychlost		Je zadána řezná rychlost, mění se otáčky vřetene se změnou průměru, na kterém obrábí špička nástroje (užití při soustružení).		
G97	Přímé programování otáček		Ukončuje konstantní řeznou rychlost. Programuje se např. takto: G97 S1500 M4		
G94	Pracovní posuv v	mm × min <sup>-1</sup>	Neuvádí se, je dáno konfigurací	Frézka	Uvádí se u obráběcích center, kde se na rovinách G17–19 obrábí různými technologiemi.
G95		mm × ot. <sup>-1</sup>		Soustruh	
M00	Zastavení stroje, programu, otáček		Použití v samostatném bloku programu. Po stisknutí tlačítka Start obrábění pokračuje. Příklad: lze použít pro odstranění třísek.		
M03	Otáčky vřetene	CW	Ve směru hodinových ručiček.		Při pohledu do vřetene stroje (ze zadní strany), nikoli ze strany obsluhy.
M04		CCW	Proti směru hodinových ručiček.		
M05	Zastavení vřetene		Použití při ručním ovládní stroje, společně s M3, M4 – např. seřizování nástrojů – korekce.		
M06	Výměna nástroje		Používá se často při ruční výměně nástroje, v případě zásobníků nebývá povinná.		
M07, M08	Zapnutí čerpadla		Chlazení, mazání obrobku při obrábění (možnost použití více čerpadel).		
M09	Vypnutí čerpadla				
M17	Konec podprogramu		Vrací do hlavního programu (hlavní programy mohou používat podprogramy, v těchto je příslušnou funkcí příkaz na vyvolání podprogramu).		
M30	Konec hlavního programu		Návrat na začátek hlavního programu.		
G10, G11*	Polární souřadnice, rychloposuv a posuv		Z cílového bodu předchozí funkce se stanoví úhel a vzdálenost do cílového bodu.		
G110, G111*			Z nulového bodu se stanoví cílový bod nástroje – nástroj vykoná pohyb z předchozího CB.		

## **5 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE**

Hlavním úkolem teoretické části práce bylo seznámení se základními technologiemi výroby grafitových elektrod a materiály pro výrobu elektrod.

V první části práce jsou popsány nekonvenční metody obrábění, zejména pak metoda elektroerozivního obrábění, pro které je grafitová elektroda navržena. Dále je popsáno frézování a CNC programování, jelikož výroba elektrody bude uskutečněna na tříosé frézce HWT C-442. Tudiž bude potřeba volba různých nástrojů (fréz) a následné vytvoření programu. Materiál na výrobu elektrody je grafit.

Praktická část práce se bude zabývat třemi hlavními body. Vytvořením modelu elektrody z grafitu, naprogramováním pomocí softwaru NX Siemens a samotným obráběním grafitu na tříosé frézce neboli konečnou výrobou elektrody.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



## 6 MATERIÁL ELEKTRODY

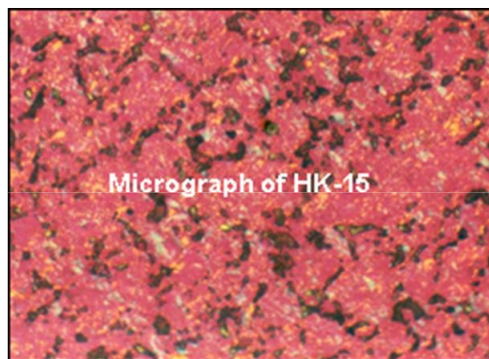
Grafit byl zakoupen od firmy TokaiCarbon. Obecně je známo, že grafit je daleko účinnější než kovové elektrody, ale úběr materiálu se silně mění podle třídy grafitu. Opatření elektrody nelze zcela zabránit, avšak správnou volbou materiálu elektrody, je možné ho výrazně minimalizovat. Dodaný polotovar měl rozměry 78x89x104 mm. [10]

### 6.1 HK -15 (Výkonnostní grafit)

Tento typ grafitu je ideální hlavně pro aplikaci výroby nástrojových forem, kde je požadována vysoká rychlost obrábění elektrodou a její nízké opotřebení. Kvalita povrchu je  $R_a = 2,2 \mu\text{m}$ . [10]

Tab. 12 Vlastnosti grafitu HK-15 [10]

Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Měrný odpor [ $\mu\Omega\text{m}$ ]	Pevnost v ohybu [MPa]	Shoreova tvrdost [-]	Průměrná velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ]
1,83	12,5	54	62	7



Obr. 21 Struktura grafitu pod mikroskopem [10]



Obr. 22 Zakoupený polotovar grafitu

## 7 CNC FRÉZKA HWT C-442 A POUŽITÉ NÁSTROJE

Frézka HWT C-442 (Obr. 23) je určena především k obrábění měkkých materiálů jako jsou grafit, plast, dřevo, neželezné kovy atd. Provedení PROFI má tužší konstrukci, výkonnější vřeteno, úplné zakrytování obráběcího prostoru a další volitelnou výbavu. Bližší technické specifikace viz Tab. 13. Uplatnění těchto frézek je hlavně při výrobě grafitových elektrod. Frézky HWT pomocí digitalizačních sond umožňují prostorovou digitalizaci modelů. [11]

Tab. 13 Parametry CNC frézky [11]

Pracovní zdvih (X,Y,Z)	400x400x200 mm
Velikost upínací plochy (X,Y)	500x500 mm; 8mm T-drážky
Posuvy plynule	3000 mm.min <sup>-1</sup>
Programovací jednotka	0,00625 ± 0,02 mm
Otáčky vřetena	2000-25000 min <sup>-1</sup>
Maximální upínací průměr nástroje	10 mm
Motor vřetena	1000 W univerzální
Řídící jednotka	PC
Napájení	230 V/50 Hz
Příkon	2300VA
Vnější rozměry (ŠxVxH)	1200x1400x1000 mm
Hmotnost	410 kg
Materiál obrobku	Plasty, dřevo, barevné kovy, grafit
Maximální zátěž stolu	20 kg





*Obr. 23 CNC frézka HWT C-442*

## **7.1 Použité nástroje**

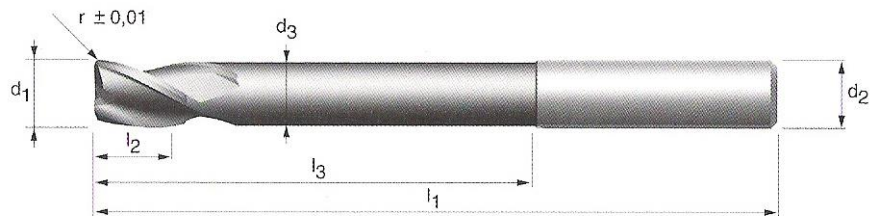
Nástroje jsou dodány od firmy K-TOOLS, která klade důraz na maximální úběr materiálu pro přesné rozměry obrobku, kvalitní povrch a dlouhou životnost. Jsou zhotoveny z jemnozrnného karbidu wolframu. [12]

### **7.1.1 Frézy pro obrábění grafitu**

Pro výrobu elektrody bude zapotřebí použít frézy pro obrábění grafitu. Použité typy jsou fréza univerzální (válcová), mikrofréza a gravírovací fréza.

**7.1.1.1 Univerzální válcová fréza (15002D)**

Doporučena pro hrubování, částečně dokončování. V praktické části byla využita pro hrubovací operaci.



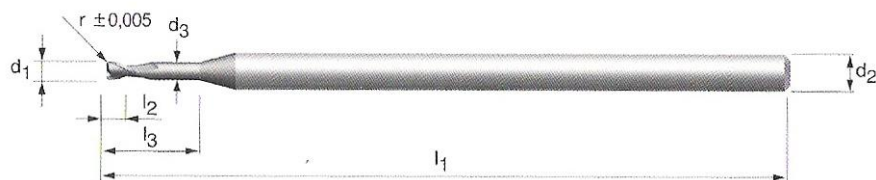
Obr. 24 Univerzální válcová fréza [12]

Tab. 14 Parametry univerzální válcové frézy [12]

$\varnothing d_1$ -0,01 -0,03 [mm]	$r$ $\pm 0,01$ [mm]	$\varnothing d_2$ [mm]	$\varnothing d_3$ [mm]	$l_2$ [mm]	$l_3$ [mm]	$l_1$ [mm]	$z$ [-]
6	1	6	5,7	10	45	80	3

**7.1.1.2 Mikrofréza (15012D)**

Výrobce doporučuje nástroj pro dokončování, méně vhodný je pro hrubování. Nástroj byl využit pro dohrubovací a dokončovací operaci.



Obr. 25 Mikrofréza [12]

Tab. 15 Parametry mikrofrézy [12]

$\varnothing d_1$ $\pm 0,005$ [mm]	$r$ $\pm 0,005$ [mm]	$\varnothing d_2$ h5 [mm]	$\varnothing d_3$ [mm]	$l_2$ [mm]	$l_3$ [mm]	$l_1$ [mm]	$z$ [-]
2,0	0,2	3	1,92	2,0	24	60	2

### 7.1.1.3 Gravírovací fréza (29040)

Doporučena pro gravírování grafitu, dřeva, plastů, hliníku a mosazi. V praktické části byl nástroj použit pro vygravírování textu na elektrodu (Obr. 32).



Obr. 26 Gravírovací fréza detail špičky (vpravo)

Tab. 16 Parametry gravírovací frézy [13]

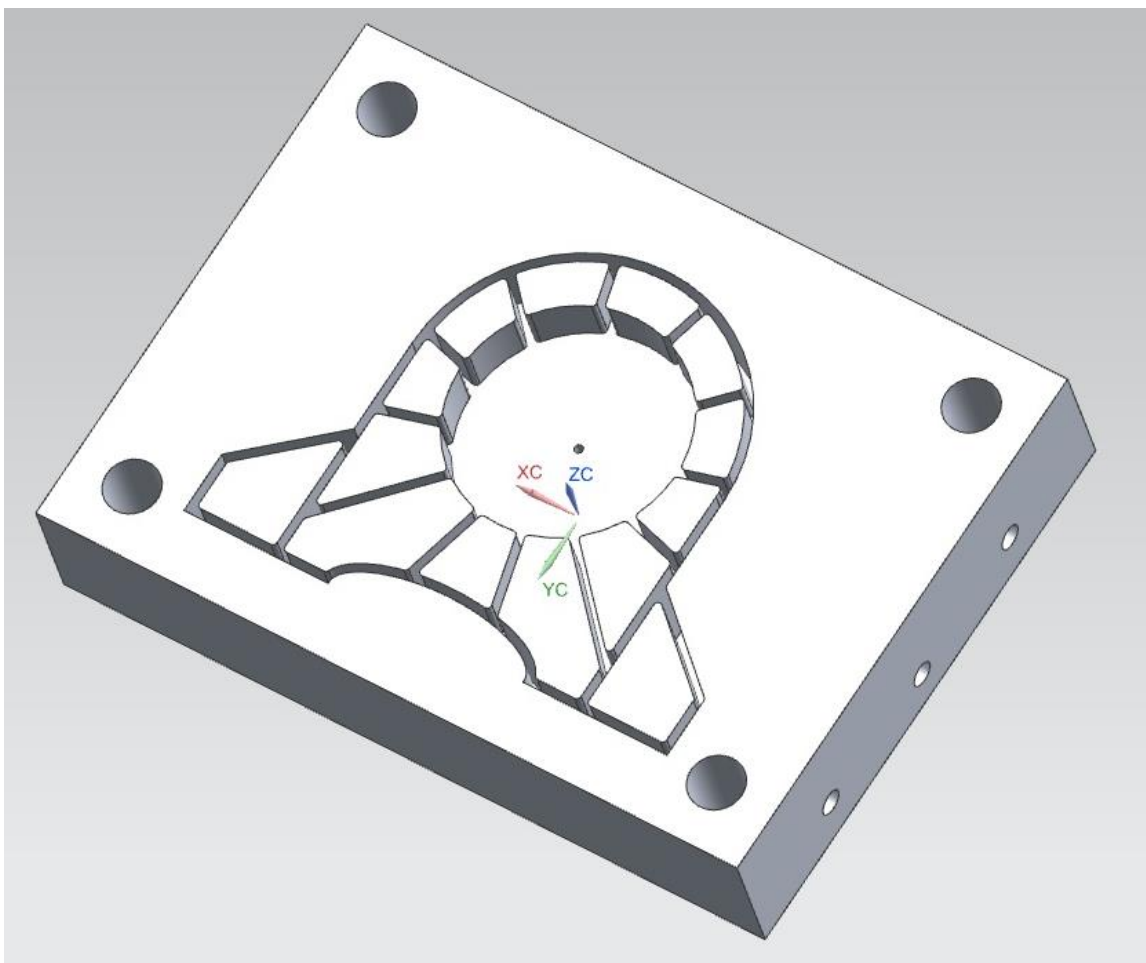
$D_c$ [mm]	$D$ [mm]	$a_p$ [mm]	$r$ [mm]	$l$ [mm]	$\kappa$ [°]	$z$ [-]
0,2	4	3	0	50	60	1

## 8 MODELOVÁNÍ ELEKTRODY

Prioritou při výběru EDM elektrody je to, co se bude pomocí EDM vyrábět. Většinou se musí elektroda rozdělit na více jednodušších součástí, jelikož nelze obrábět všechny plochy pomocí jedné elektrody.

### 8.1 Výběr modelu elektrody

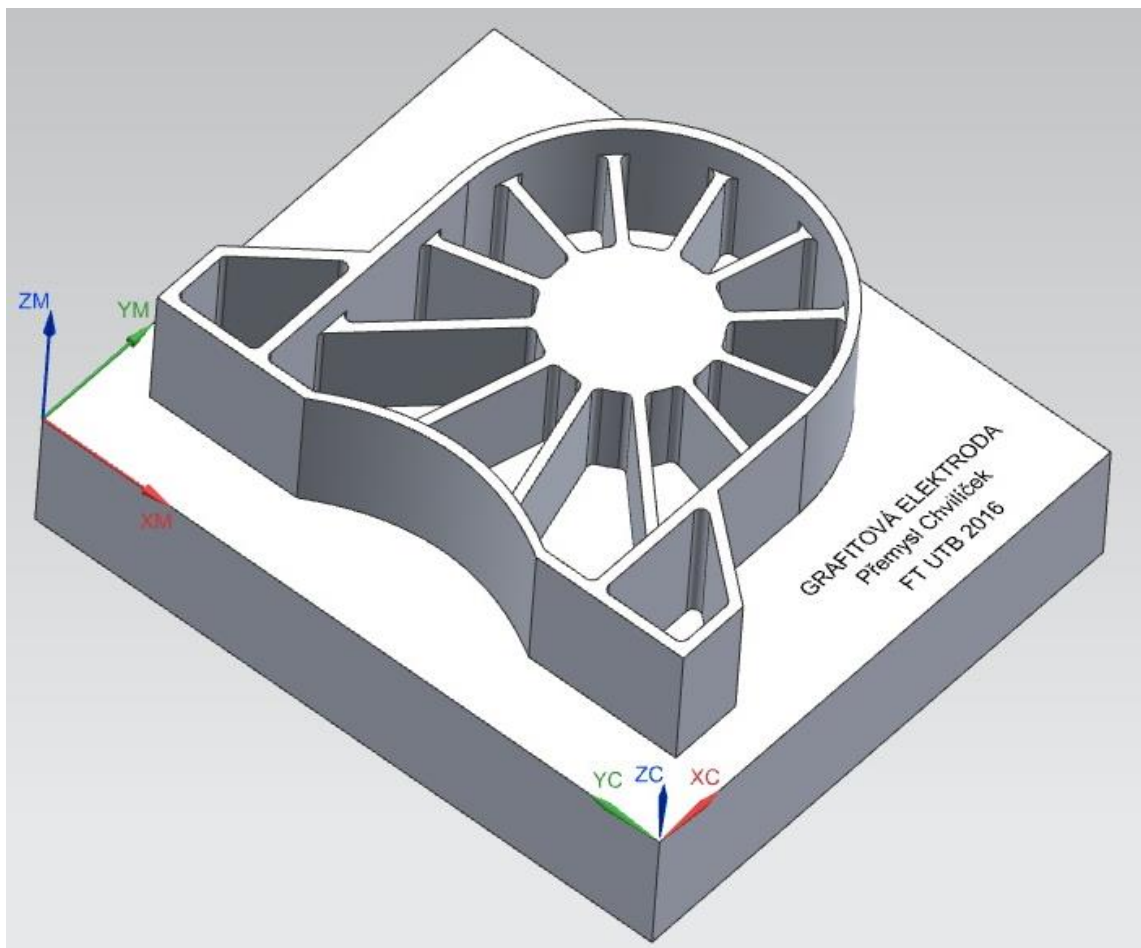
Elektroda byla zhotovena na dokončovací operaci výroby tvárnice vstříkovací formy podle Zbyňka Pavláta [14]. Tvárnice byla zvolena, protože je společně s tvárníkem tvarově, a tedy i na výrobu nejsložitější. Pouhým frézováním nám na výrobku zůstávají, i když minimální, ale i tak stále viditelné rádiusy. Pomocí EDM elektrody lze dosáhnout dokonale ostrých (kolmých) hran. Vybraná tvárnice slouží k výrobě podstavce pod ložiska.



Obr. 27 Model tvárnice

## 8.2 Tvorba modelu elektrody

Pro modelování byl použit software Siemens NX. Velikost elektrody byla ovlivněna daným polotovarem. Nástrojová EDM elektroda je negativem plochy obráběné elektroerozivním obráběním. Tudíž tvary, které nelze frézováním vyrobit, jsou v negativu pro frézování snadno vyrobitelné. V praxi toto můžeme nejčastěji najít tam, kde potřebujeme vytvořit vnitřní ostré hrany, což pomocí válcové frézy není možné. Podobný problém může nastat i u žeber, která jsou příliš hluboká a málo široká. Žebra tvárnice jsou různě zaoblená s různými hloubkovými přechody, kde je nutné zachovat ostré hrany. Celá elektroda byla zmenšena o podrozměr jiskrové vzdálenosti, který je 0,15 mm.



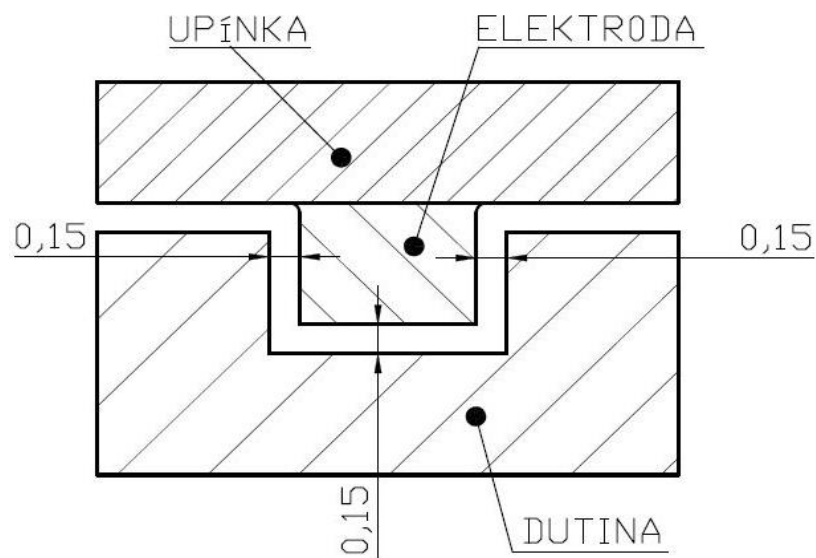
Obr. 28 Model elektrody

## 9 PROGRAMOVÁNÍ A OBRÁBĚNÍ

Po vytvoření modelu elektrody následovalo programování. Program byl vytvořen opět pomocí softwaru Siemens NX a celý byl rozdělen do čtyř menších částí. Jsou to hrubování, dohrubování, dokončování a gravírování. Jako první byl zadán polotovár a definována nula obrobku, dále byly vytvořeny všechny potřebné nástroje a pokračovalo se tvorbou programu. Bylo potřeba nadefinovat konkrétní řezné podmínky k jednotlivým nástrojům. Verifikace zřetelně ukázala všechny dráhy a pohyby nástrojů při obrábění, tudíž bylo možné eliminovat případné chyby v programu. Pro hrubování byl použit nástroj s průměrem 6 mm a rohovým rádiusem 1 mm (Obr. 30). Na stěnách byl ponechán přírůstek na dokončení, který činil 0,3 mm.

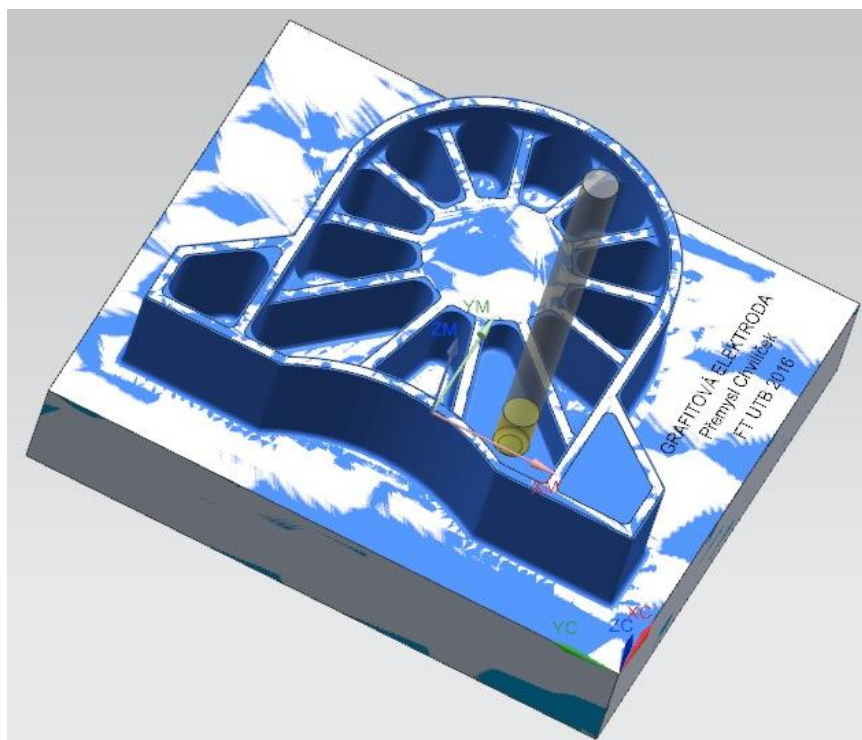
Tab. 17 Použité řezné podmínky ke konkrétním nástrojům [12]

Operace (funkce v NX)	Nástroj	$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	$a_p$ [mm]	$a_e$ [mm]	$v_f$ [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	$f_z$ [mm]
Hrubování (cavymill)	15002D	15 000	1,5	4,5	2 250	0,050
Dohrubování (rest milling)	15012D	18 000	0,4	0,4	900	0,025
Dokončování (Zlevel profile)	15012D	18 000	0,4	0,4	900	0,025
Gravírování (planar_text)	29040	18 000	0,2	-	2500	0,139



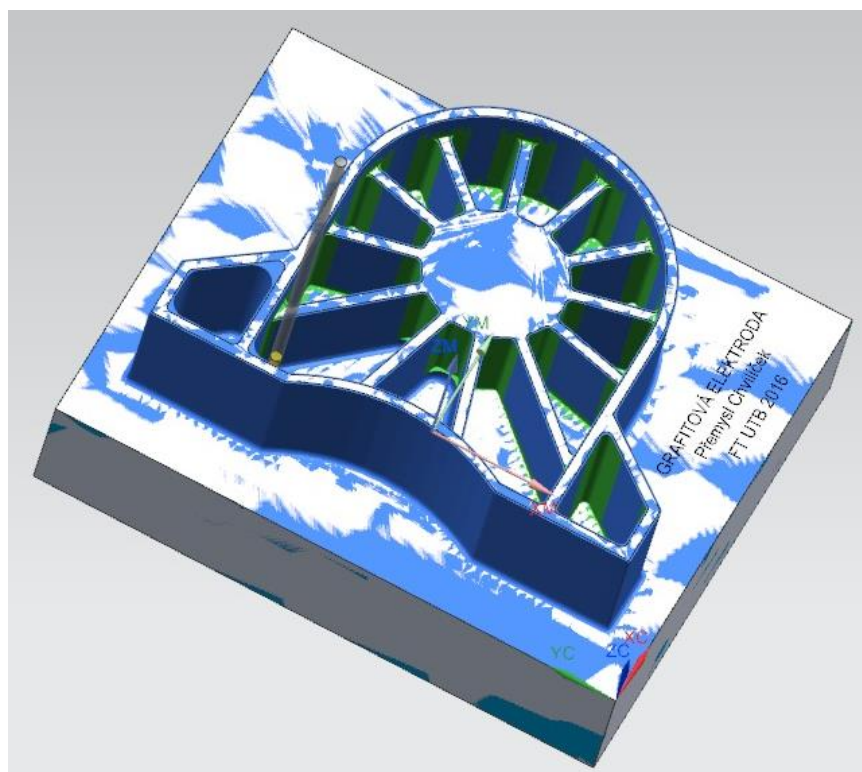
Obr. 29 Princip EDM





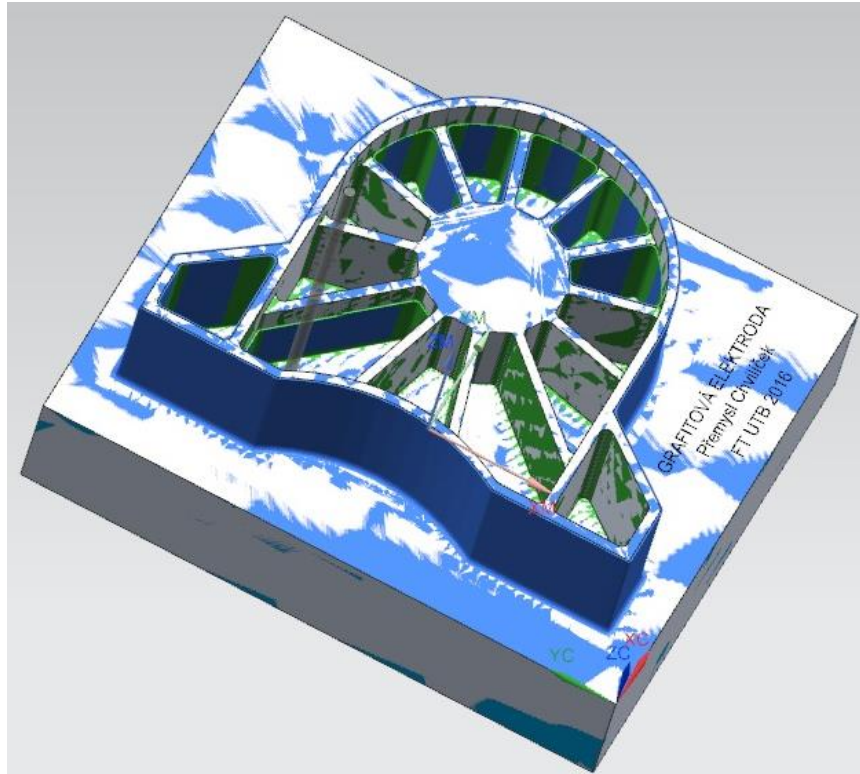
*Obr. 30 Simulace hrubování - verifikace*

Po hrubování následovala operace dohrubování (Obr. 30). Použitý nástroj byla mikrofréza o průměru 2 mm a s rohovým rádiusem 0,2 mm. Šlo hlavně o obrábění všech vnitřních rohů.



*Obr. 31 Simulace dohrubování - verifikace*

K dokončování byla použita stejná mikrofréza jako při dohrubování (Obr. 31). Při dokončování byla odebírána poslední vrstva materiálu uvnitř a po celém obvodu elektrody, blížící se svou velikostí přídávku na dokončení.



*Obr. 32 Simulace dokončování - verifikace*

Po poslední operaci (dokončování) následovalo gravírování. Na elektrodu byl vygravírován text s názvem školy FT UTB 2016 a jménem Přemysl Chvilíček. Použitý nástroj byla gravírovací fréza s obráběcím průměrem 0,2 mm.



*Obr. 33 Vygravírovaný text*



Celý obráběcí proces trval zhruba 1,5 hodiny. V tomto čase nebyl zahrnut čas potřebný na výměnu nástroje, rozjezd a dojezd nástroje, který celkem činil 2,5 hodiny. Také bylo potřeba připojit odsávání, protože při obrábění grafitu vznikala jemná tříška, která velmi prášila.

Name	Toolchange	Path	Tool	Tool Number	Time	Method
NC_PROGRAM					01:27:01	
Unused Items					00:00:00	
P1					00:23:28	
HRUBOVANI			T1_15002D	1	00:23:16	MILL_SEMI_FINISH
P2					01:02:51	
DOHRUBOVÁNÍ			T2_15012D	2	00:09:38	METHOD
DOK			T2_15012D	2	00:53:01	MILL_FINISH
GRAV					00:00:41	
PLANAR_TEXT			UTB_GRAV...	0	00:00:29	METHOD

Obr. 34 Popis NC programu



Obr. 35 Konečný výrobek - grafitová elektroda

## ZÁVĚR

V této bakalářské práci byla popsána a řešena technologie výroby grafitové elektrody pro elektroerozivní obrábění. Celkem se dělí na dvě části, a to na část teoretickou a na část praktickou. V teoretické části byly popsány základní druhy nekonvenčních metod obrábění, hlavně metoda elektroerozivního obrábění elektrojiskrového, pro které je elektroda vyrobena. Dále bylo zmiňováno frézování a CNC programování, protože elektroda byla vyrobena na CNC frézce, tudíž bylo potřeba vytvořit program.

V praktické části práce byl nejprve popsán materiál, z kterého byla elektroda vyrobena. Je to výkonnostní grafit HK-15. Jako dutina byla zadána tvárnice vstříkovací formy. Následovalo modelování samotné elektrody. Po vymodelování elektrody bylo zapotřebí vytvořit program pro CNC frézku. Celý program byl rozdělen na čtyři hlavní části. Po vytvoření programu následovala návštěva školní dílny, kde probíhal celý obráběcí proces výroby grafitové elektrody. Celková doba obráběcího procesu byla asi 5 hodin, včetně výměny nástrojů. Na závěr byl na elektrodu vygravírován text. Upínka byla nalakována bezbarvým lakem, aby při manipulaci nedocházelo ke znečištění osob. Vyrobena elektroda bude sloužit k demonstraci ve výuce strojírenské a nekonvenčních technologií.

Závěrem lze zhodnotit, že celá výroba proběhla bez problémů. Z hlediska praxe je nutné zhodnotit, zda je výroba grafitových elektrod ekonomicky výhodná.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění* . 2. vyd. Plzeň : Západočeská univerzita, 1999. 102 s.
- [2] BÍLEK, Ondřej, LUKOVICS, Imrich. *Výrobní inženýrství a technologie* . 1. vyd. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2014. 173 s.
- [3] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění* . 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, sr.o., 2011. 330 s.
- [4] ŘASA, Jaroslav, GABRIEL, Vladimír. *Strojírenská technologie 3 - 1. díl* . 2. vyd. Praha : Scientia, spol. s r.o., 2005. 256 s.
- [5] ŘASA, Jaroslav, HANĚK Václav, KAFKA Jindřich. *Strojírenská technologie 4* . 1. vyd. Praha : Scientia, spol. s r. o., 2003. 505 s.
- [6] ŘASA, Jaroslav, POKORNÝ, Přemysl, GABRIEL, Vladimír. *Strojírenská technologie 3 - 2. díl* . 2. vyd. Praha : Scientia, spol. s r. o., 2005. 221 s.
- [7] ŠTULPA, Miloslav. *CNC programování obráběcích strojů*. 1. vyd. Praha : Tiskárny Havlíčkův Brod, a.s., 2015. 244 s.
- [8] EDM grafit. Interspark Praha, spol s r. o. [online]. 2016. Dostupné z: <http://www.interspark.cz/edm-grafit-1.html>
- [9] ŠTUPLA, Miloslav. *CNC obráběcí stroje*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 126 s.
- [10] TOKAI CARBON. Pfingstner s r. o. [online]. 2016. Dostupné z: <http://en.tokaicarbon.eu/>
- [11] AZK. Ing. Zbyněk Kaiser – AZK [online]. 2016. Dostupné z: <http://www.azk.cz/>
- [12] K-TOOLS. Ing. Zdeněk Krátký [online]. 2016. Dostupné z: <http://www.k-tools.cz/>
- [13] SECO TOOLS [online]. 2016. Dostupné z: <https://www.store.secotools.com/>
- [14] PAVLÁT, Z. *Aplikační možnosti elektroerozivního obrábění při výrobě forem*. Zlín, 2013. Diplomová práce. UTB ve Zlíně. Vedoucí diplomové práce Libuše Sýkorová

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<b>Značka</b>	<b>Popis [jednotky]</b>
$v_c$	řezná rychlost [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]
$D$	průměr frézy [mm]
$n$	otáčky nástroje [ $\text{min}^{-1}$ ]
$f$	posuv [mm]
$f_z$	posuv na zub [mm]
$v_f$	velikost posuvu [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]
$z$	počet zubů frézy
$D_c$	obráběcí průměr [mm]
$a_p$	hloubka řezu [mm]
$a_e$	pracovní záběr [mm]
$\kappa$	hlavní úhel břitu [ $^\circ$ ]
$l$	celková délka nástroje [mm]
$r$	zaoblení špičky, rohový rádius [mm]
EDM	Electro Discharge Machining
NC	Numerical Control
CNC	Computer Numerical Control
NMO	Nekonvenční metody obrábění
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1 Elektrojiskrové obrábění - aplikace vychylovače a elektrod [3] .....</i>	14
<i>Obr. 2 Příklady prvků vyráběných elektrojiskrovou metodou [2] .....</i>	15
<i>Obr. 3 Elektrojiskrové vyřezávání drátovou elektrodou [2] .....</i>	16
<i>Obr. 4 Princip zařízení pro elektrokontaktní obrábění [2] .....</i>	17
<i>Obr. 5 Elementární schéma anodomechanického obrábění [2] .....</i>	18
<i>Obr. 6 Frézování obvodem válcové frézy a čelem čelní frézy [4] .....</i>	21
<i>Obr. 7 Příklad druhů fréz [4] .....</i>	22
<i>Obr. 8 Zuby fréz - a) frézovaný zub, b) podsoustružený zub [4] .....</i>	22
<i>Obr. 9 Příklady mechanického upnutí destiček na fréze [4] .....</i>	23
<i>Obr. 10 Ostření fréz a) s frézovanými zuby, b) s podsoustruženými zuby [4] .....</i>	26
<i>Obr. 11 Upnutí obrobku pomocí upínky se šroubem a opěrkou [4] .....</i>	27
<i>Obr. 12 CNC řízení [6] .....</i>	29
<i>Obr. 13 Frézování závitů kotoučovou frézou [4] .....</i>	31
<i>Obr. 14 Polotovary grafitu pro výrobu elektrod [8] .....</i>	33
<i>Obr. 15 Skládání nástrojové elektrody [6] .....</i>	36
<i>Obr. 16 Výroba dutiny kombinací tvaru a pohybu nástrojové elektrody [6] .....</i>	36
<i>Obr. 17 Upínání nástrojových elektrod [6] .....</i>	38
<i>Obr. 18 Definice kartézských souřadnic .....</i>	39
<i>Obr. 19 Princip absolutního programování [7] .....</i>	42
<i>Obr. 20 Princip přírůstkového programování [7] .....</i>	43
<i>Obr. 21 Struktura grafitu pod mikroskopem [10] .....</i>	47
<i>Obr. 22 Zakoupený polotovar grafitu .....</i>	47
<i>Obr. 23 CNC frézka HWT C-442 .....</i>	49
<i>Obr. 24 Univerzální válcová fréza [12] .....</i>	50
<i>Obr. 25 Mikrofréza [12] .....</i>	50
<i>Obr. 26 Gravírovací fréza detail špičky (vpravo) .....</i>	51
<i>Obr. 27 Model tvárnice .....</i>	52
<i>Obr. 28 Model elektrody .....</i>	53
<i>Obr. 29 Princip EDM .....</i>	54
<i>Obr. 30 Simulace hrubování - verifikace .....</i>	55
<i>Obr. 31 Simulace dohrubování - verifikace .....</i>	55
<i>Obr. 32 Simulace dokončování - verifikace .....</i>	56

---

<i>Obr. 33 Vygravírovaný text .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 34 Popis NC programu.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 35 Konečný výrobek - grafitová elektroda .....</i>	<i>57</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Technologické parametry vybraných NMO [3].....</i>	13
<i>Tab. 2 Druhy frézování [7] .....</i>	21
<i>Tab. 3 Základní mechanické vlastnosti řezných materiálů [5].....</i>	24
<i>Tab. 4 Materiály nástrojových elektrod pro elektroerozivní obrábění [3].....</i>	32
<i>Tab. 5 Volba materiálu elektrody pro hrubování (H) a obrábění načisto (D) [6] .....</i>	34
<i>Tab. 6 Parametry dosahované elektroerozivním obráběním [6].....</i>	38
<i>Tab. 7 Značení a použití jednotlivých os [7] .....</i>	40
<i>Tab. 8 Složení programu v bloku [7] .....</i>	41
<i>Tab. 9 Význam nejpoužívanějších adres [7] .....</i>	41
<i>Tab. 10 Příklad a užití vět (bloku) [7] .....</i>	42
<i>Tab. 11 Použití nejdůležitějších funkcí G,M [7] .....</i>	43
<i>Tab. 12 Vlastnosti grafitu HK-15 [10] .....</i>	47
<i>Tab. 13 Parametry CNC frézky [11] .....</i>	48
<i>Tab. 14 Parametry univerzální válcové frézy [12].....</i>	50
<i>Tab. 15 Parametry mikrofrézy [12].....</i>	51
<i>Tab. 16 Parametry gravírovací frézy [13].....</i>	51
<i>Tab. 17 Použité řezné podmínky ke konkrétním nástrojům [12] .....</i>	54

## **SEZNAM PŘÍLOH**

**CAD SOUBOR MODELU**  
**CAD SOUBOR ELEKTRODY**  
**PRT SOUBOR Z CAMU**  
**CNC PROGRAMY**