

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**



## **Diplomová práce**

**Porovnání vybraných druhů EDM drátových elektrod v  
závislosti na parametrech obrábění**

**Bc. Bartoloměj Kubát**

**© 2023/2024 ČZU v Praze**

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bartoloměj Kubát

Inženýrství údržby

Název práce

**Porovnání vybraných druhů EDM drátových elektrod v závislosti na parametrech obrábění**

Název anglicky

**Comparison of selected types of EDM wire electrodes depending on machining parameters**

---

### Cíle práce

Diplomová práce poskytne teoretickou rešerši týkající se problematiky EDM obrábění. Literární rešerše bude zaměřena především na technologii EDM, popsání principu EDM, povrchovou vrstvu po EDM obrábění a materiály, které se používají jako nástrojové elektrody. Hlavním cílem diplomové práce bude porovnat různé druhy elektrod elektroerozivního drátového řezání a jejich vliv na vybrané parametry obrábění. Na základě výsledků experimentální části budou vyhodnoceny závěry s důrazem na posílení know-how výrobního podniku, ve kterém bude výzkum prováděn. Součástí experimentu bude i ekonomické porovnání jednotlivých variant.

### Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.

**Doporučený rozsah práce**

cca 60 stran

**Klíčová slova**

elektroerozivní drátové řezání, nástrojová elektroda, technologické parametry, technologie obrábění

---

**Doporučené zdroje informací**

Časopis: *Materials Today*, *Journal of the European Ceramic*, *Materials*, *Precision Engineering*, *Journal of Manufacturing Processes*, *Journal of Cleaner Production*, *Manufacturing Technology*, *International Journal of Solids and Structures*, *Journal of Materials Processing Technology*, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *Wear*, *Tribology International* atd.

EL-HOFY, H.: *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. New York: McGraw-Hill, 2005.

ELMAN, C.J.: *Electrical Discharge Machining*. Society of Manufacturing Engineers, 2001.

Firemní literatura a sborníky z konferencí

GAMBLIN, R.: *Machine tools: specification, purchase, and installation*. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

JAHAN, M.P.: *Electrical Discharge Machining (EDM): Types, Technologies and Applications*. Manufacturing Technology Research. Nova: 2015.

KURIACHEN, B. et al.: *Electric Discharge Hybrid-Machining Processes*. New York: CRC Press, 2022.

SHYHA, I.S.E.M., DEHONG, H.: *Advances in machining of composite materials: conventional and non-conventional processes*. Cham, Switzerland: Springer, 2021.

1906

---

**Předběžný termín obhajoby**

2023/2024 LS – TF

**Vedoucí práce**

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 7. 1. 2023

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 23. 03. 2024

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Porovnání vybraných druhů EDM drátových elektrod v závislosti na parametrech obrábění“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 30.3.2024

---

### **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval panu prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D. za cenné rady, které mi poskytl v průběhu vypracování této diplomové práce. Oběma jednatelům firmy Zach-nástrojárna s.r.o. za možnost realizace experimentu u nich v podniku. Jiřímu Michálkovi za ochotu a pomoc s drátovým řezáním. Dále Matějovi za výrobu polotovaru a Martinovi Jandovi při měření na CMM.

# Porovnání vybraných druhů EDM drátových elektrod v závislosti na parametrech obrábění

## Abstrakt

V úvodních kapitolách se diplomová práce věnuje teorii elektroerozivního obrábění. Konkrétně se zabývá kategorizací EDM, principem elektroeroze, charakterem elektroerozivních výbojů, povrchovou vrstvou po EDM a podrobně popisuje technologii drátového řezání. Hlavní část práce tvoří popis experimentu, který systematicky zkoumal parametry, jako je rychlost řezání, spotřeba drátu a přesnost řezu v závislosti na použité drátové elektrodě. Společně s cenou daného drátu bylo nakonec provedeno i ekonomické porovnání jednotlivých variant. Na základě výsledků experimentální části diplomové práce byly vyvozeny závěry s cílem posílení výrobně – ekonomického know-how podniku. Závěr experimentální části obsahuje vyhodnocení konkrétních variant drátových elektrod a vhodnost jejich aplikací.

**Klíčová slova:** elektroerozivní drátové řezání, drátová elektroda, obráběcí parametry, technologie obrábění

# **Comparison of selected types of EDM wire electrodes depending on machining parameters**

## **Abstract**

In the introductory chapters, the thesis is devoted to the theory of electroerosive machining. Specifically, it deals with the categorization of EDM, the principle of electroerosion, the nature of electroerosive discharges, the surface layer after EDM machining and describes the technology of wire cutting in detail. The main part of the work is a description of an experiment that systematically investigated parameters such as cutting speed, wire consumption and cutting accuracy depending on the wire electrode used. Together with the price of the given wire electrode, an economic comparison of the individual variants was finally carried out. Based on the results of the experimental part of the thesis, conclusions were drawn with the aim of focusing on the economic and machining know-how of the company. The conclusion of the experimental part contains the evaluation of specific variants of wire electrodes and the suitability of their applications.

**Keywords:** Wire electrical discharge machining, wire electrode, machining parameters, machining technology

# Obsah

<b>1 Úvod .....</b>	<b>12</b>
<b>2 Nekonenční metody obrábění, kategorizace EDM .....</b>	<b>13</b>
2.1 Rozdělení nekonvenčních metod a jejich stručná charakteristika .....	13
<b>3 Elektroerozivní obrábění (EDM) .....</b>	<b>14</b>
3.1 Princip elektroerozivního obrábění .....	15
3.2 Fáze elektroerozivního výboje .....	16
3.3 Vliv polarity .....	18
3.4 Charakteristika výboje .....	18
3.4.1 Fyzikální charakter výbojů .....	19
3.4.2 Rozdělení výbojů dle časového průběhu .....	21
3.5 Charakter povrchové vrstvy po EDM .....	22
3.5.1 Drsnost povrchu po EDM .....	23
3.6 EDM technologie .....	24
3.7 Drátové řezání WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) .....	25
3.7.1 Hlavní části EDM drátové řezačky .....	26
3.7.2 Drátové elektrody .....	28
3.7.3 Dielektrikum .....	31
<b>4 Metodika experimentu .....</b>	<b>32</b>
4.1 Popis a charakteristika použité drátové řezačky Fanuc Robocut $\alpha$ -C600iC .....	33
4.1.1 Údržba použité drátové řezačky .....	33
4.2 Vybrané drátové elektrody .....	36
4.3 Testovací polotovar .....	36
4.4 Programování EDM drátové řezačky .....	37
4.4.1 Výběr technologie .....	39
<b>5 Naměřená data a sledované parametry .....</b>	<b>40</b>
5.1 Čas obrábění drátových elektrod .....	40
5.2 Rychlost řezu drátových elektrod .....	43
5.3 Výpočet nákladů na výrobu pomocí WEDM .....	45
5.3.1 Čas potřebný pro výrobu součásti .....	45
5.3.2 Náklady na hodinu provozu stroje .....	45
5.4 Stanovení hodinových nákladů pro jednotlivé varianty .....	48
5.5 Stanovení nákladů pro jednotlivé výšky řezu .....	49



<b>6</b>	<b>Rozměrová kontrola vzorkových dutin.....</b>	<b>51</b>
6.1	Rozměrové vyhodnocení dutiny vyříznuté drátem 0,25 Betterbrassone:9.....	52
6.2	Rozměrové vyhodnocení dutiny vyříznuté drátem 0,25 BFcut-Tx.....	53
6.3	Rozměrové vyhodnocení dutiny vyříznuté drátem 0,3 Penta CUT-P.....	54
6.4	Rozměrové vyhodnocení diskuse.....	55
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>58</b>
<b>9</b>	<b>Příloha 1 – Seřizovací list frézování polotovaru .....</b>	<b>60</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 1	Schéma elektroerozivního procesu (1) .....	16
Obrázek 2	Fáze výboje (7).....	17
Obrázek 3	Vliv polarity na úběr materiálu (7).....	18
Obrázek 4	Kráter vzniklý elektroerozí (6).....	19
Obrázek 5	Časové využití výboje (6).....	21
Obrázek 6	Povrchová vrstva po EDM (9) .....	22
Obrázek 7	Referenční etalon pro normu VDI 3400 (10) .....	23
Obrázek 8	Závislost drsnosti povrchu na době výboje (11) .....	24
Obrázek 9	Schéma drátové rezačky (15).....	25
Obrázek 10	Čerpací a filtrační systém dielektrika (7).....	28
Obrázek 11	Diagnostický manažer stroje .....	34
Obrázek 12	Monitoring stavu filtru.....	35
Obrázek 13	Ballbarova diagnostika .....	35
Obrázek 14	CAD model testovacího polotovaru .....	37
Obrázek 15	Programování kontury v programu PEPS.....	37
Obrázek 16	Výběr technologie řezu.....	39
Obrázek 17	Technologie obrábění .....	40
Obrázek 18	CMM měřicí stroj Mitutoyo CRYSTA-Apex S 574 (22).....	51
Obrázek 19	CMM výsledky Betterbrassone:9 .....	52
Obrázek 20	CMM výsledky BFcut-Tx.....	53
Obrázek 21	CMM výsledky Penta Cut-P .....	54

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Převodní tabulka mezi Ra, Rz a VDI 3400 (10).....	23
Tabulka 2 Technické specifikace Robocut $\alpha$ -C600iC (21) .....	33
Tabulka 3 Průměrná rychlost posuvu.....	43
Tabulka 4 Náklady na spotřebovaný drát .....	46
Tabulka 5 Vyčíslení celkových průměrných hodinových nákladů pro jednotlivé drátové elektrody .....	49
Tabulka 6 Celkové náklady na provoz drátové řezačky pro konkrétní výšky.....	49
Tabulka 7 Rozměrové vyhodnocení Betterbrassone:9 .....	52
Tabulka 8 Rozměrové vyhodnocení BFcut-Tx.....	53
Tabulka 9 Rozměrové vyhodnocení Penta Cut-P .....	54
Tabulka 10 Přehled odchylek od CAD modelů .....	55

## Seznam grafů

Graf 1 Porovnání předpovědi a reálného doby řezu Betterbrassone:9 .....	41
Graf 2 Porovnání předpovědi a reálného doby řezu BFcut-Tx.....	41
Graf 3 Porovnání předpovědi a reálného doby řezu Penta Cut-P .....	42
Graf 4 Porovnání reálné doby řezu jednotlivých drátových elektrod .....	43
Graf 5 Porovnání rychlosti řezu jednotlivých drátových elektrod.....	44
Graf 6 Procentuální podíl dílčích hodinových nákladů na provoz stroje .....	48

## Seznam použitých zkratk

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
EDM	[-]	Electrical Discharge Machining
WEDM	[-]	Wire Electrical Discharge Machining
USM	[-]	Ultrasonic Machining
WJM	[-]	Water Jet Machining
AWJT	[-]	Abrasive Water Jet Machining
PBM	[-]	Plasma Beam Machining
LBM	[-]	Laser Beam Machining
EBM	[-]	Elektron Beam Machining
ECM	[-]	Electro Chemical Machining
CM	[-]	Chemical Machining
GAP	[mm]	Mezielektrodová (pracovní) mezera
$V_i$	[mm <sup>3</sup> ]	Objem odebraného materiálu
K	[-]	Součinitel souměrnosti
$W_i$	[J]	Energie výboje
$t_i$	[s]	Doba impulsu
$t_0$	[s]	Doba pausy
$t_D$	[s]	Doba zpoždění výboje
$t_e$	[s]	Doba výboje
$T$	[s]	Doba periody
$U_Z$	[V]	Napětí na prázdko
$I$	[A]	Pracovní proud výboje
$I_e$	[A]	Střední vybíjecí proud
$U_e$	[V]	Střední vybíjecí napětí
$U_K$	[V]	Napětí při zhasnutí výboje
$Q_V$	[mm/s]	Celkové množství odebraného materiálu za jednotku času
q	[-]	Časové využití periody výboje
VDI 3400	[-]	Norma pro převod drsnosti
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti
Rz	[μm]	Výška nerovnosti povrchu určená z 10 bodů
CNC	[-]	Computer Numeric Control
CAD	[-]	Computer Aided Design
$T_f$	[s]	Doba řezu kontury
$l_k$	[mm]	Délka kontury
$v_s$	[mm/min]	Střední rychlost posuvu
$N_{SD}$	[Kč/hod]	Hodinové náklady na spotřebovaný drát
$N_O$	[Kč/hod]	Ostatní hodinové náklady na provoz stroje
$N_{EE}$	[Kč/hod]	Hodinové náklady na spotřebovanou elektrickou energii
$N_{HM}$	[Kč/hod]	Náklady na hodinovou mzdu obsluhy
$N_R$	[Kč/hod]	Hodinové režijní náklady
$N_c$	[Kč/hod]	Celkové hodinové náklady na provoz stroje

# 1 Úvod

Elektroerozivní obrábění (EDM z anglického Electric Discharge Machining) a zejména jeho odnož, drátové EDM řezání, představují klíčovou technologií pro precizní odstraňování materiálu z tvrdých a obtížně opracovatelných materiálů. V rámci tohoto rozsáhlého oboru se drátové EDM řezání (WEDM) etablovalo jako klíčová technologie, která nabízí jedinečné možnosti pro výrobu složitých geometrických tvarů s vysokou přesností a opakovatelností. (1)

Technologie elektroerozivního drátového řezání spadá do skupiny tzv. nekonvenčních metod obrábění. Pro odebrání materiálu totiž nevyužívá klasického mechanického principu. Úběru materiálu je dosahováno pomocí elektro-tepelného jevu známého jako elektroeroze. (2)

Práce si klade za cíl nejenom poskytnout přehled o základních principech drátového EDM řezání, ale i provést experimentální studii, která je zaměřena na zkoumání různých druhů EDM drátových elektrod. Experiment systematicky zkoumal parametry, jako je rychlost řezání, spotřeba drátu a přesnost řezu v závislosti na použité drátové elektrodě. Společně s cenou daného drátu bylo nakonec provedeno i ekonomické porovnání jednotlivých variant. Na základě výsledků experimentální části diplomové práce byly vyvozeny závěry s cílem posílení výrobně – ekonomického know-how podniku.

Experiment byl proveden firmou Zach nástrojárna s.r.o., která se zabývá konstrukcí, výrobou a údržbou trvalých forem pro vstřikování plastů a tlakové lití slitin zinku a hliníků. Součástí těchto forem jsou tvarové části, které jsou zhotoveny ze zakalené nástrojové oceli. Tyto dílce velmi často obsahují složité geometrické tvary a také dutiny s minimálními vnitřními rádiusy. Mimo jiné jsou na díly kladeny přísné rozměrové a tvarové tolerance. Takto náročné požadavky na výrobu nejsou schopni splnit pomocí konvenčních metod obrábění, a proto je nutné aplikovat EDM technologie.

## 2 Nekonvenční metody obrábění, kategorizace EDM

Nekonvenční metody obrábění tvoří skupinu technologií, které se odlišují od tradičních postupů tím, že nepoužívají klasické nástroje pro obrábění nebo dělení materiálu. Tyto metody odebírají materiál na základě využití různých fyzikálních nebo chemických jevů. V těchto procesech nedochází k fyzickému kontaktu mezi nástrojem a obráběným materiálem, a tak na sebe nepůsobí žádnými vzájemnými silami.

Tyto technologie vznikly především kvůli potřebě obrábět materiály s vysokou tvrdostí, pevností, nebo houževnatostí, či jinou vlastností, která způsobuje obtížnou obrobitelnost materiálu. Obecně lze říci, že nekonvenční metody obrábění se používají v momentě, kdy klasické třískové obrábění nestačí. (3)

### 2.1 Rozdělení nekonvenčních metod a jejich stručná charakteristika

Nekonvenční metody obrábění lze podle principu odebírání materiálu rozdělit do následujících skupin:

- a) Oddělování materiálu mechanickým působením.
  1. *Ultrazvukové obrábění (Ultrasonic Machining – USM)*  
Pro obrábění se používá energie ultrazvukových vln. Nejběžnější metody jsou ultrazvukové rázové broušení, které se používá pro obrábění křehkých materiálu jako je sklo, nebo keramika.
  2. *Obrábění paprskem vody (Water Jet Machining – WJM)*  
Tato technologie obrábění je založena na využívání abrazivních účinků vodního proudu. Řezným nástrojem je proud vody vstříkovaný pod vysokým tlakem (až 350 MPa) a tím i vysokou rychlostí (téměř 1500 m/s). Proud vody vychází z trysky nad obrobkem. Za největší výhodu můžeme považovat tepelně neovlivněnou oblast místa řezu.
  3. *Obrábění abrazivním paprskem vody (Abrasive Water Jet Machining – AWJT)*  
Stejná technologie jako je WJM, rozdíl spočívá v přidání jemného brusiva do vody pro zvýšení abrazivního účinku.  
(1) (4)
- b) Oddělování materiálu tepelným působením.
  4. *Elektroerozivní obrábění (Electric Discharge Machining – EDM)*  
Tato technologie bude podrobněji popsána v dalších kapitolách.
  5. *Plazmové obrábění (Plasma Beam Machining – PBM)*  
Základní princip plazmového obrábění spočívá v tavení a následném odpařování materiálu obrobku při teplotách v rozmezí 10 000 až 30 000 °C. Jako pracovní plyn se obvykle používá vzduch, argon, vodík, dusík nebo jejich směsi.

6. *Laserové obrábění (Laser Beam Machining – LBM)*

K úbytku materiálu dochází působením úzkého paprsku silného monochromatického světla, který je zaměřen na velmi malou plochu. Světelný paprsek při dopadu na jednotlivé vrstvy materiálu přemění svou energii na teplo, přičemž teplota dosahuje kolem 10 000 °C.

7. *Obrábění elektronovým paprskem (Elektron Beam Machining–EBM)*

K obrábění se využívá soustředěný, zrychlený svazek elektronů, který přenáší částicím svou kinetickou energii. Při dopadu na materiál se kinetická energie přemění do tepelné energie. Dochází tak k lokálnímu přehřátí, roztavení a případně i následnému odpaření tohoto materiálu.

(1) (4)

c) Oddělování materiálu elektronickým, či elektrochemickým způsobem.

8. *Elektrochemické obrábění (Electro Chemical Machining – ECM)*

K separaci materiálu dochází anodickým rozpuštěním v elektrolytickém roztoku, tj. elektrolyzou, kde katodou je nástroj a anodou je obrobek. Při této technologii se používá stejnosměrný proud nízkého napětí rozpouští materiál obrobku.

9. *Chemické obrábění (chemical Machining – CM)*

Principem je řízené odleptávání vrstev materiálu o velmi malé tloušťce, ta se pohybuje v rozmezí od několika desítek mikrometrů až po několik milimetrů od povrchu obrobku. Proces je založen na využívání vzájemných chemických reakcí mezi materiálem obrobku a pracovním prostředím, kterým je nejčastěji kyselina nebo hydroxid.

(1) (4)

### 3 Elektroerozivní obrábění (EDM)

Elektroerozivní obrábění, též elektrojiskrové obrábění tvoří z hlediska průmyslového nasazení nejrozšířenější podskupinu nekonvenčních metod obrábění. Od klasického obrábění se liší tím, že odebírání materiálu není založeno na mechanickém procesu, nýbrž na procesu elektro-tepelném. (5)

Velmi zjednodušeně lze princip vysvětlit tak, že při vzájemném přiblížení obrobku a elektrody (na kterou je přivedeno elektrické napětí), dojde k elektrickému výboji. Elektrický výboj způsobí vysoký lokální ohřev, což způsobí odtavení mikročástic na obou elektrodách. Ty se následně odplavují pomocí dielektrika (kapalina s malou elektrickou vodivostí), ve které se obrobek i elektroda po celou dobu elektroeroze nachází. Opakováním tohoto procesu dochází k samotnému obrábění, nebo dělení materiálu. Podrobněji se tomuto procesu věnuji v další kapitole.

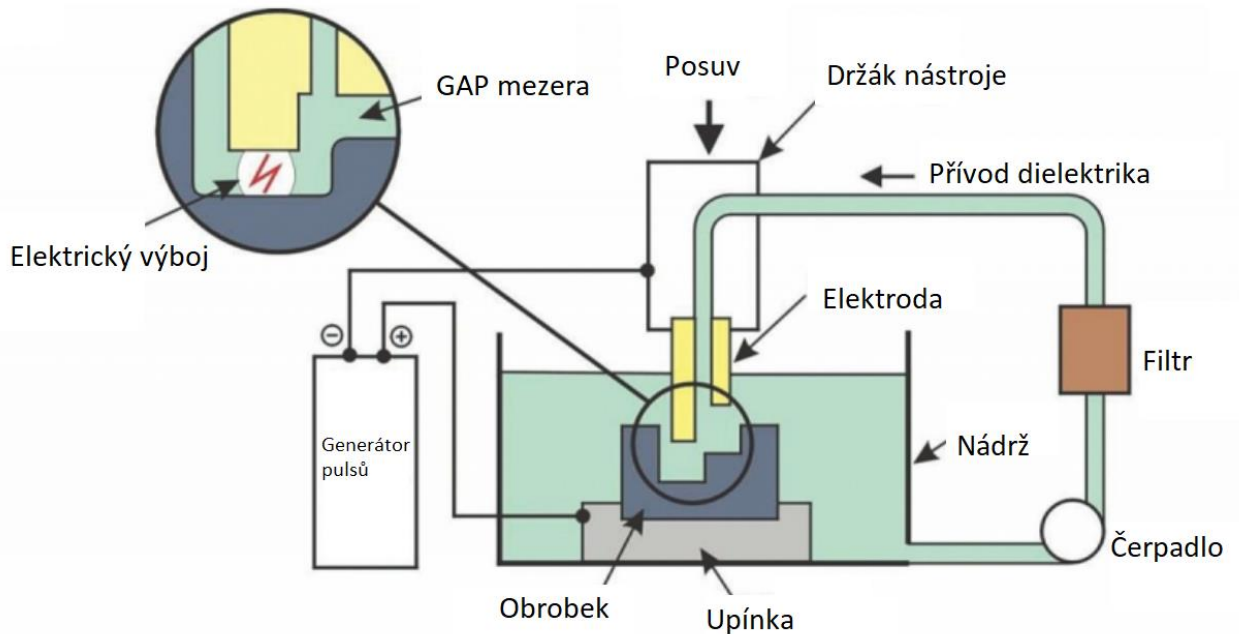
Největším benefitem této metody je fakt, že ji můžeme aplikovat v případech, kde jiné konvenční metody obrábění selhávají. Zejména v případech problematicky obrobitelných materiálů, složitých geometrických tvarů, přísných rozměrových požadavků, nebo vysoké kvality povrchu. Další zajímavostí EDM obrábění je, že obrobitelnost materiálu nezáleží na jeho tvrdosti, nebo houževnatosti, nýbrž na jeho elektrické vodivosti. Čím větší má materiál elektrickou vodivost, tím se bude na EDM strojích lépe opracovávat. Ačkoliv je elektroerzivní obrábění veřejnosti relativně neznámé, jeho uplatnění je podepsáno pod širokou škálou výrobků. Nejčastěji se využívá pro výrobu střížných nástrojů, lisovacích nástrojů, nebo vstřikovacích forem, a tak se nepřímo schovává za produkty všeho druhu. (6) (2)

### **3.1 Princip elektroerzivního obrábění**

Princip elektroerzivního obrábění spočívá v periodickém odebrání částic z povrchových vrstev materiálu prostřednictvím kombinace tepelného a tlakového účinku elektrických výbojů na povrchu elektrod. Elektrické výboje probíhají velmi rychle po sobě a jsou rozloženy po celé ploše obráběné plochy. (1)

K úbytku materiálu dochází mezi dvěma elektrodami ponořené v dielektrické kapalině. Obrobek tvoří jednu elektrodu a nástroj druhou. Obě elektrody jsou připojeny na zdroj elektrického napětí (nejčastěji polovodičový generátor). Po přivedení napětí na tyto elektrody, dojde ke vzniku elektrického výboje. Elektrody se vzájemně nedotýkají, ale jsou vzdáleny o tzv. pracovní mezeru neboli GAP, jejíž velikost se většinou pohybuje v rozmezí od 0,01 až po 0,4 mm. (1)

Výboj mezi elektrodami vzniká v oblasti nejsilnějšího elektrického napětového pole, které vytvoří ionizovaný kanál, umožňující přenos elektrického proudu mezi nástrojem a obrobkem. Velikost tohoto napětového pole především závisí na šířce pracovní mezery, vlastnosti dielektrické kapaliny a míře znečištění dielektrika. V ionizovaném kanálu vzniká plazmové pásmo s teplotami kolem 3 000 – 12 000 °C. Tyto výboje způsobí natavení a odpařování materiálu na obou elektrodách. Po přerušení přívodu napětí klesne teplota a postupným ochlazením odtavený materiál tuhne. Následným působením tlaku dielektrika se ztuhlý materiál z místa výboje odplavuje. Schematický proces elektroerzivního stroje je vyobrazen na obrázku 1. (3) (4)



Obrázek 1 Schéma elektroerozivního procesu (3)

### 3.2 Fáze elektroerozivního výboje

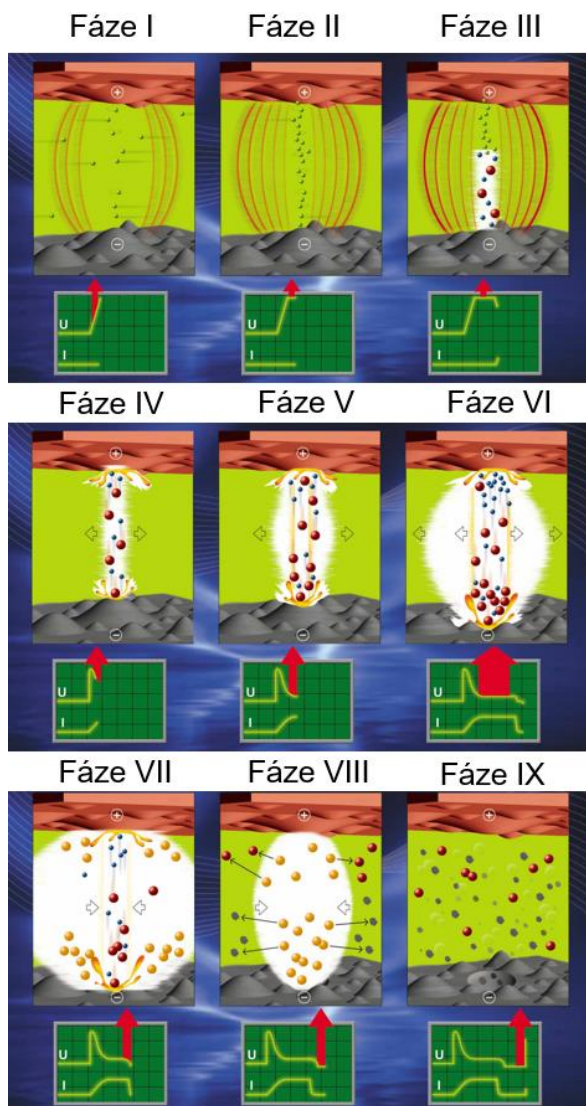
Elektroerozivní stroje používají jako zdroj napětí polovodičové generátory, které přímo řídí proces elektroeroze. Průběh jednoho výboje se z časového hlediska rozděluje celkem do 9 fází, které jsou vyobrazeny na obrázku 2. (2) (7)

- Fáze I. – po přivedení napětí na katodu a anodu se začne vytvářet elektrické napětíové pole. V místě nejmenší vzdálenosti elektrod, jenž je způsobeno nepřesností a nerovností povrchu se přeskupí elektricky vodivé částice.
- Fáze II. – Přivedené elektrické napětí dosahuje maximální hodnoty. Elektricky vodivé částice vytvoří základ pro výboj pomocí můstků.
- Fáze III. – Ze záporně nabitých elektrod se vlivem působení elektrického pole začnou uvolňovat elektrony. Díky tomu, že jsou částice značně urychlovány, tak se srážejí s neutrálními částicemi a vznikají kladné a záporné ionty. Tento fyzikální jev je známý jako ionizace prostředí.
- Fáze IV. – Nově vzniklé ionty se uskupí okolo vzniklého výbojového kanálu, ve kterém klesne elektrický odpor. V takto vzniklém prostoru začne téct elektrický proud a z plazmy se vytvoří vodivý kanál. Roste proudová hustota a teplota na povrchu elektrod. Napětí klesá.
- Fáze V. – Dielektrikum se vlivem vysoké teploty začne odpařovat, což způsobí vznik plynové bubliny. V důsledku srážení elektronů s anodou a katodou dojde k uvolnění značného množství energie, což způsobí rapidní nárůst teploty až na 12000°C. Dojde



k natavení obou elektrod. Proud dosáhl své maximální hodnoty a napětí se ustálilo na tzv. zápalné hodnotě výboje.

- Fáze VI. – V tento moment dochází k expanzi bublin. Materiál se taví a odpařuje.
- Fáze VII. – Díky přerušením přívodu energie dojde k poklesu proudu. Následkem je snížení teploty na elektrodách. Pokles teploty vyvolá implozi plynové bubliny. Dojde k narušení materiálu na povrchu obou elektrod. Tavenina je pomocí tlaku dielektrika vyhnána do prostoru a vznikne kráter.
- Fáze VIII. – Napětí i proud klesly na nulovou hodnotu, zaniká výboj i bublina. Do vzniklého kráteru se vplavuje dielektrikum, které ho vyplachuje a zároveň ochlazuje. Vyplavený materiál zůstává v dielektriku v podobě drobných částic, které mají řádově objem  $10^{-3}$  až  $10^{-6}$  mm<sup>3</sup>.
- Fáze IX. – Základem pro další nový výboj slouží zbývající volné ionty, které se nacházejí v prostoru dielektrika. (2) (7)

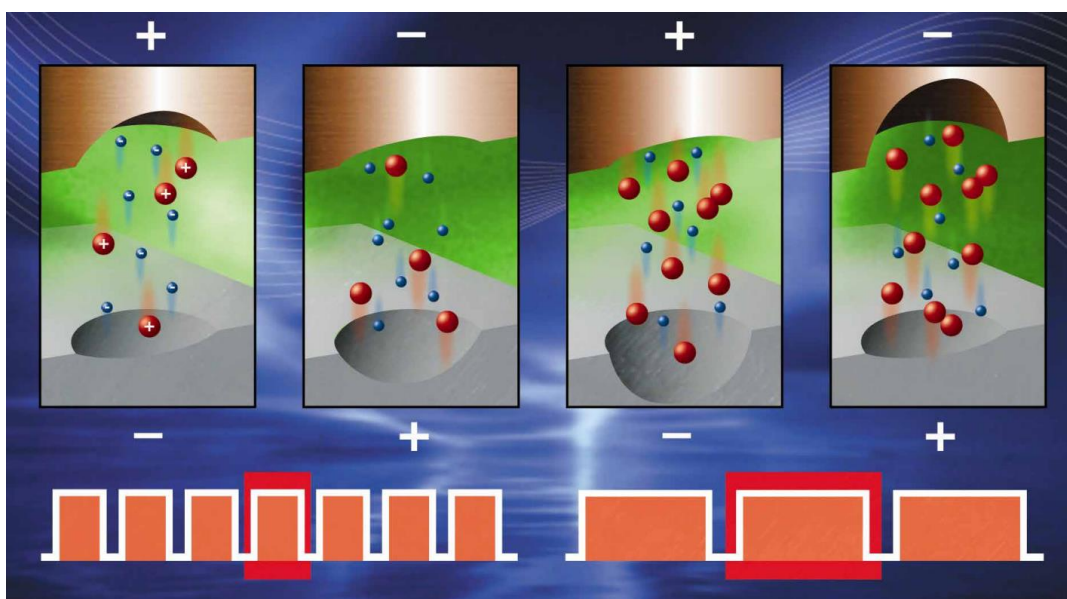


Obrázek 2 Fáze výboje (7)

### 3.3 Vliv polarity

Jak již bylo zmíněno k odebrání materiálu nedochází pouze na straně obrobku, ale také na elektrodě. Volba polarity velmi výrazně ovlivňuje poměr mezi úbytkem materiálu na elektrodě a na obrobku.

Výměna záporně (modrá barva) a kladně nabitých částic (červená barva), vede k toku proudu ve výbojovém kanálu viz obrázek 3. Částice tak vytvářejí teplo, které způsobuje tavení kovu. Při velmi krátkém trvání impulsu je více záporných než kladných částic v pohybu. Naopak při delším trvání pulsu se dostane do pohybu více kladných částic. Čím více částic jednoho druhu se pohybuje směrem k cílové elektrodě, tím více na ní vzniká tepla. Z tohoto důvodu se při krátkých pulsech nástrojová elektroda zapojuje k zápornému pólu. Naopak při delších výbojových impulsích se nástrojová elektroda zapojuje ke kladnému pólu, tak aby docházelo, co k nejmenšímu opotřebení elektrody a naopak, co k největšímu úběru materiálu na straně obrobku. (7) (8)



Obrázek 3 Vliv polarity na úběr materiálu (7)

### 3.4 Charakteristika výboje

Elektroerozivní výboje zanechávají na obou elektrodách krátery. Charakter takto vzniklých kráterů, respektive jeho velikost a tvar vytvořený elektroerozivním výbojem je dán velikostí vybíjecí energie. Kráter je definován svou výškou a středním průměrem a závisí na hodnotě přivedené energie a době výboje. Velikost kráteru pak podstatně ovlivňuje drsnost povrchu, rozměrovou přesnost a účinnost elektroeroze jako takové. Graficky je vzniklý kráter vyobrazen na obrázku 4. Množství odebraného materiálu je roven součtu opotřebení obou elektrod a je definován následujícím vztahem (2):

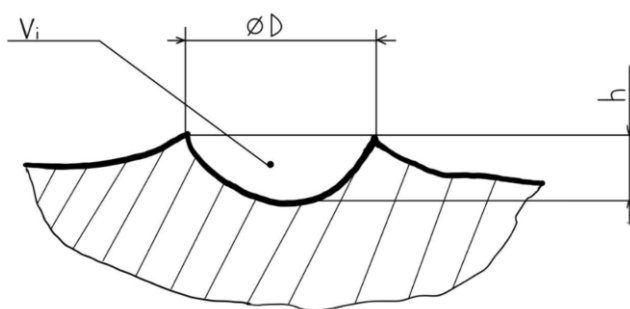
$$V_i = K * W_i \quad (3.1)$$

Kde:

$V_i$ ...objem odebraného materiálu [ $\text{mm}^3$ ]

$K$ ...součinitel souměrnosti (bude mít jiné hodnoty pro anodu a katodu)

$W_i$ ...energie výboje [J]



Obrázek 4 Kráter vzniklý elektroerozí (2)

### 3.4.1 Fyzikální charakter výbojů

Mezi hlavní fyzikální charakteristiky elektroerozivního výboje patří (2):

- Doba impulsu  $t_i$  – čas, který uplyne mezi zapojením a vypojením generátoru
- Doba pauzy  $t_0$  – čas, který uplyne mezi vypojením a novým zapojením generátoru
- Doba zpoždění výboje  $t_D$  – čas mezi okamžikem zapojení generátoru a průrazem dielektrika (růst proudu v pracovní mezeře)
- Doba výboje  $t_e$  – čas, který uplyne mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru (skutečná doba výboje)
- Doba periody  $T$  – čas určený dobou impulsu a pauzou  $T = t_i + t_0$
- Napětí na prázdno  $U_Z$  – napětí při sepnutí generátoru
- Pracovní proud výboje  $I$  – maximální protékající proud mezi katodou a anodou
- Střední vybíjecí proud  $I_e$  – střední hodnota proudu mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru
- Střední vybíjecí napětí  $U_e$  – střední hodnota napětí mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru
- Napětí při zhasnutí výboje  $U_K$  – hodnota napětí při zhasnutí výboje, je závislá na ostatních parametrech jako je vodivost dielektrika, znečištění dielektrika a na materiálu elektrod. Využívá se při optimalizaci procesu obrábění. (2)

Pro energii jednotlivého výboje pak platí následující vztah (2):

$$W_i = \int_0^T u(t) * i(t) dt [J] \quad (3.2)$$

Kde:

$W_i$ ...energie výboje [J]

$T$ ...perioda výboje

$u(t)$ ...napětí přivedené generátorem [U]

$i(t)$ ...proud [A]

Pro celkové množství odebraného materiálu za jednotku času platí následující vztah (2):

$$Q_V = K_i * f * r * \eta * W_i [\text{mm/s}] \quad (3.3)$$

Kde:

$K_i$ ...součinitel souměrnosti

$f$  ... frekvence pulsů

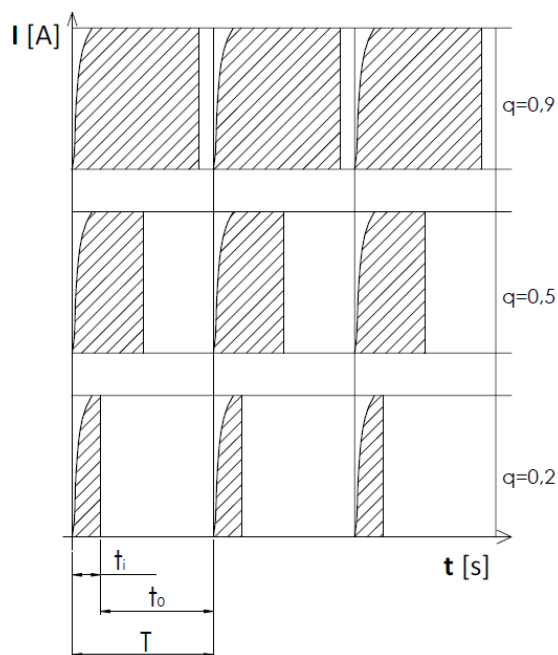
$r$  ... účinnost elektrického výboje [%]

$\eta$ ...účinnost generátoru [%]

$W_i$ ...energie výboje [J]

Časové využití periody výboje  $q$  – se zavádí z důvodu lepší interpretace časového průběhu výboje na intenzitu úběru materiálu. Umožňuje číslem charakterizovat formu výboje, viz obrázek 5. Tato veličina je charakterizována následujícím vztahem (2):

$$q = \frac{t_i}{T} = \frac{t_i}{t_i + t_0} [-] \quad (3.4)$$



Obrázek 5 Časové využití výboje (2)

### 3.4.2 Rozdělení výbojů dle časového průběhu

Dle časového průběhu dodávané elektrické energie dělíme výboje do dvou kategorií:

#### 1) Výboje elektrojiskrové:

Elektrojiskrové výboje jsou charakterizovány krátkou dobou impulzu  $t_i$  ( $10^{-4}$  až  $10^{-6}$ ) sekundy a malým časovým využitím periody výboje  $q = 0,03 - 0,2$  a vyšší frekvencí. Ve výbojovém kanále převládá elektronová vodivost. Tím pádem zde dochází k vyššímu opotřebení anody vůči katodě (viz. kapitola 3.2.3 – Vliv polarity). Teplota ve výbojovém kanále dosahuje hodnot až  $10000^{\circ}\text{C}$ . Takto generované výboje mají relativně malou energii jednotlivých elektrických výbojů  $W_i \cong 10^{-3}$  J, a proto se využívají zejména na dokončovací operace. (2)

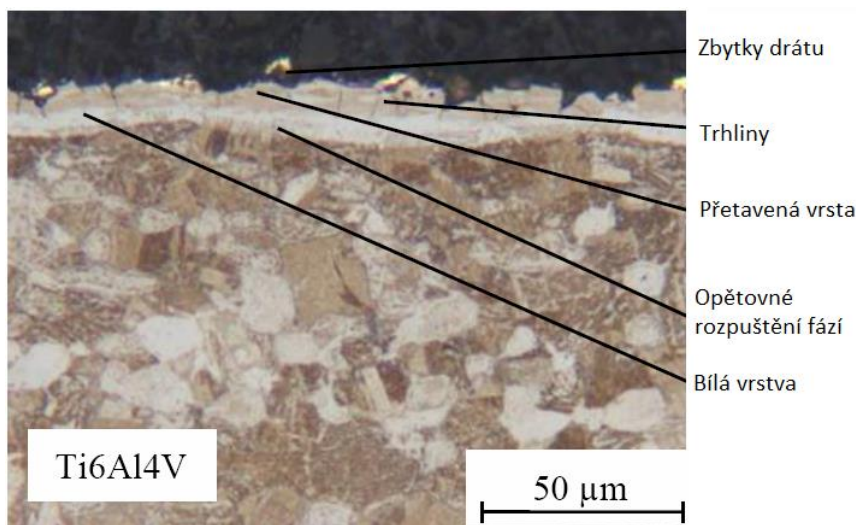
#### 2) Výboje nestacionárním krátkodobým elektrickým výbojem:

Krátkodobé el. Oblouky jsou typické delší dobou impulzu  $t_i > 10^{-4}$  s. Mají vyšší časové využití periody výboje, které se pohybuje v rozmezí  $q = 0,2 - 1$  a nižší frekvencí. Výbojový kanál je tvořen iontovou vodivostí, což vede k většímu opotřebení na katodě. Jednotlivé výboje mají řádově větší energii  $W_i \cong 10^2$  J, takže jsou vhodné převážně pro hrubovací operace. (2)

### 3.5 Charakter povrchové vrstvy po EDM

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole forma kráterů je přímo ovlivněna celkovým množstvím elektrické energie a dobou výboje. Kromě drsnosti povrchu určují parametry generátoru i rychlost úběru materiálu, přesnost profilu a celistvost povrchu obráběné součásti. Vysoká rychlost úběru materiálu také povede k zvýšené drsnosti povrchu. Veliký úběr materiálu zapříčiňuje i vysoké teplotní namáhání obráběné vrstvy. Teplotní působení má za následek vznik tepelně ovlivněné zóny. V tepelně ovlivněné zóně může docházet k metalurgickým změnám, změně krystalické struktury, změně chemického složení a k tvorbě tzv. bílé vrstvy. Bílá vrstva vzniká z nataveného základního materiálu, který dielektrikum nevyplavilo z místa eroze (znovu ztuhlá tavenina). Jedná se o silně nauhličenou tenkou vrstvu martenzitické struktury, která má velmi odlišné mechanické vlastnosti od základního materiálu. Na obrázku 6 je vidět složení jednotlivých vrstev, po jednom hrubovacím cyklu EDM drátového řezání titanové slitiny Ti6Al4V. (9)

Metalurgické a mikrostrukturální změny v povrchových vrstvách společně s poruchami povrchové vrstvy, kterými mohou být trhliny nebo dvojčatění mají významný vliv na únavovou pevnost i korozní odolnost obráběné součásti. (9)



Obrázek 6 Povrchová vrstva po EDM (10)

Při dokončovacích řezech bývá tato oblast podstatně menší vzhledem k charakteru výbojů, které mají menší energii a vyšší frekvenci, tím pádem i tepelné zatížení obráběné součásti bude menší. (9)

### 3.5.1 Drsnost povrchu po EDM

Nízká drsnost povrchu a vysoká rozměrová přesnost jsou hlavními důvody aplikací EDM technologií. Povrch obrobený pomocí EDM technologií je naprosto odlišný od povrchu obrobeném pomocí třískového obrábění, který je tvořen stopami po nástroji. Povrch po EDM je tvořen mikroskopickými krátery, které za sebou zanechali výboje. (4)

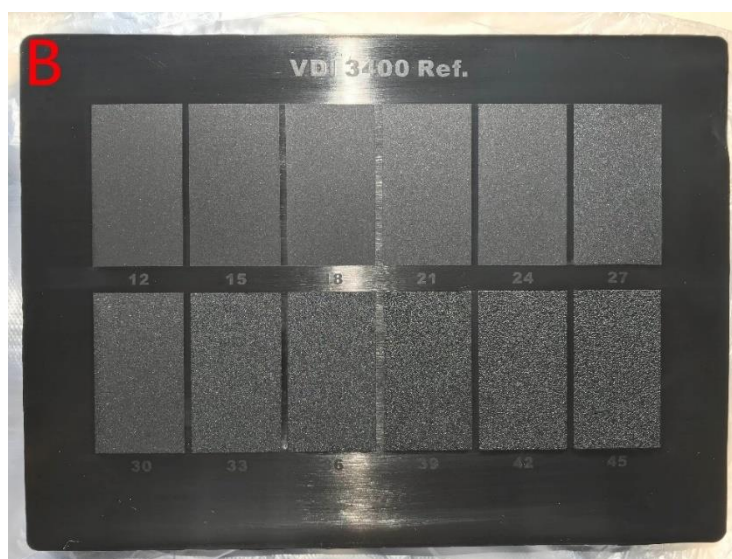
Pro účely porovnání drsnosti povrchu po EDM obrábění s konvenčními metodami byla zavedena norma VDI 3400. Součástí této normy je převodní tabulka, která převádí přibližné hodnoty drsnosti povrchu Ra a Rz na parametr VDI (tabulka 1).

Parametr Ra je aritmetický průměr veškerých hodnot profilu drsnosti R v rámci celého měřeného úseku  $L_m$ . Parametr Rz je střední hodnota vypočítaná na základě jednotlivých hloubek drsnosti pěti za sebou následujících jednotlivých měřených úseků  $L_e$ . (11)

Norma se mimo jiné využívá i pro jiné technologie například pro tryskání, pískování, nebo laserové obrábění. Na obrázku 7 je znázorněn referenční etalon pro normu VDI 3400. (12)

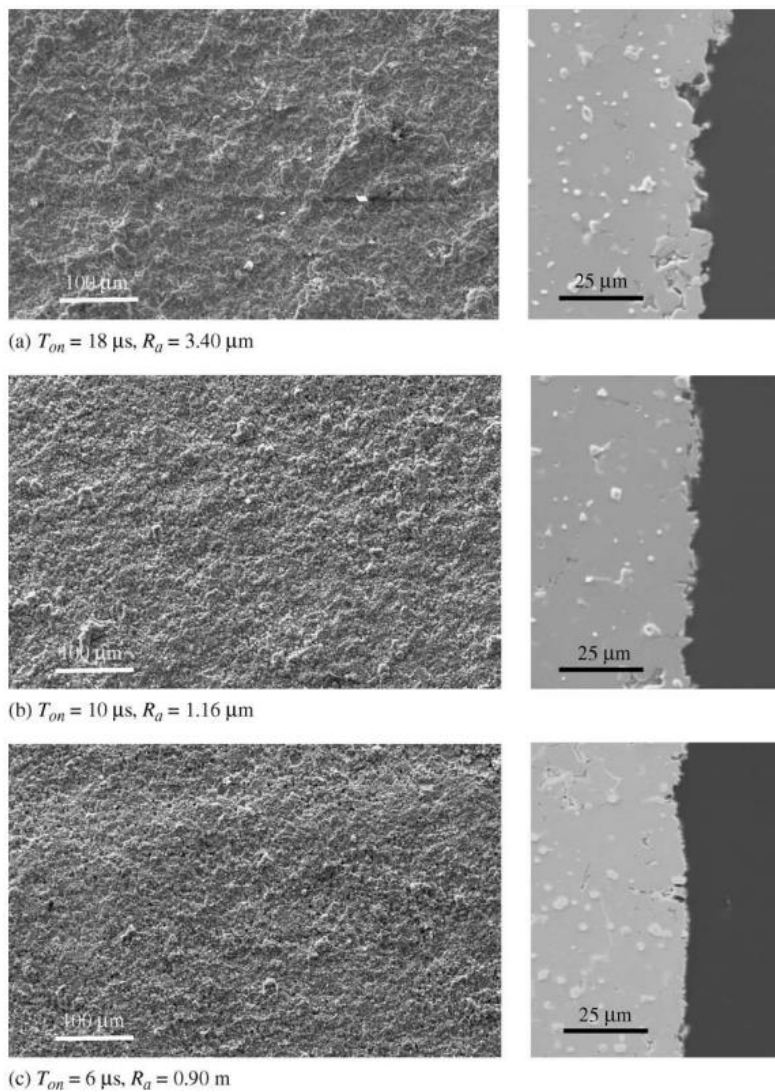
Tabulka 1 Převodní tabulka mezi Ra, Rz a VDI 3400 (12)

VDI 3400	0	6	12	15	18	21	24	27	30	33	36
Ra [μm]	0,1	0,2	0,4	0,56	0,8	1,12	1,6	2,24	3,15	4,5	6,3
Rz [μm]	0,4	0,8	1,5	2,4	3,3	4,7	6,5	10,5	12,5	17,5	24



Obrázek 7 Referenční etalon pro normu VDI 3400 (12)

Pro dosažení nejlepší kvality povrchu je potřeba vhodných elektrojiskrových výbojů o nízkých hodnotách proudu, krátkých impulzech a vysoké frekvence. Obrázek 8 znázorňuje závislost drsnosti povrchu (aritmetickou úchylku profilu  $R_a$ ) na době trvání výboje. (13)



Obrázek 8 Závislost drsnosti povrchu na době výboje (13)

### 3.6 EDM technologie

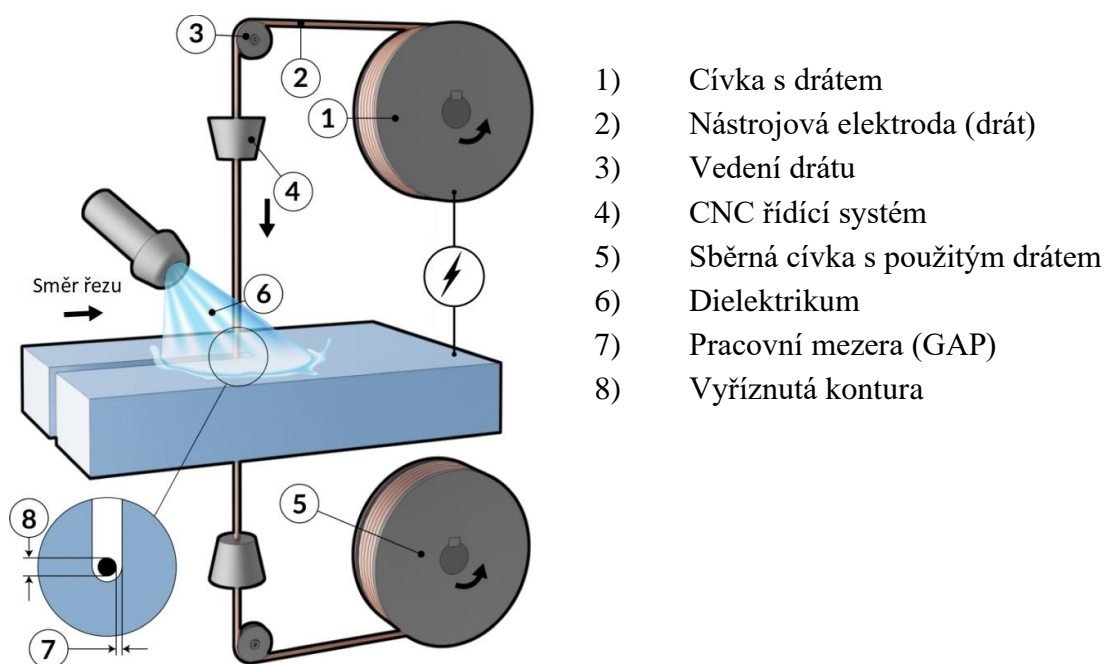
Elektroerozivního odebrání materiálu se dosahuje pomocí různých druhů technologií. Volba technologie závisí na technologických požadavcích a geometrické náročnosti obráběného dílu. Mezi hlavní patří EDM hloubení, drátové řezání a děrování. Jednotlivé technologie se od sebe liší zejména v charakteru elektrody (materiál, její pohyb a tvar). Princip zůstává u všech technologií totožný. (14)



### 3.7 Drátové řezání WEDM (Wire Electrical Discharge Machining)

Elektroerozivní drátové dosahuje při výrobě dílů velmi přesných rozměrů. Jak název napovídá, jako elektrodu používá tenký drát. Tato technologie se používá pro tvorbu jader, děr, složitých kontur a problémových tvarů, a proto se využívá pro výrobu lisovacích matic, razníků, přesných forem, střížníků a mnoho dalších strojních dílců. (14) (15)

Princip drátové řezačky je zobrazen na obrázku 9. Technologie WEDM je založena na elektroerozivním principu, který je podrobně vysvětlen v předešlých kapitolách. Drátové řezačky využívají předem naprogramované kontury pro vyříznutí požadovaného tvaru. Horní a dolní hlavice zároveň umožňuje vzájemné posunutí vůči sobě ve vodorovné rovině, což umožňuje úhlové řezání (maximální řezací úhel u většiny stojů je 30°). Nástrojovou elektrodu tvoří tenký drát o přesném průměru, který se po jeho opotřebení znovu nepoužívá. Drát jako takový je uchycen mezi horní a dolní hlavou a je napínán speciálním systémem vedení drátu. Druhou elektrodou je obrobek, který je připojen na opačný elektický pól, než je drátová elektroda. Generátor pulzů následně přivede na elektrodu napětí a pomocí řídicího systému je ovládán celý proces obrábění. (16) (17)



Obrázek 9 Schéma drátové řezačky (17)

### 3.7.1 Hlavní části EDM drátové řezačky

Drátové řezačka se rozděluje na několik segmentů, které jsou mezi sebou propojeny pomocí řídicího systému stroje. Mezi ně patří:

- Rám stroje
- Generátor impulsů
- Řídicí systém
- Systém vedení drátové elektrody
- Čerpací a filtrační systém dielektrika
- Upínací systém

#### 3.7.1.1 Rám stroje

Rám stroje pro drátové řezačky musí splňovat požadovanou pevnost, tuhost, teplotní stabilitu a geometrickou přesnost. I přes to, že při EDM procesu nedochází k tak velikému přenášení sil jako například u frézování, tak rám musí odolávat hydraulickým silám způsobeným pohybem dielektrika. Rám bývá nejčastěji zhotoven z šedé litiny, která dobře tlumí vibrace a rázy. (2)

#### 3.7.1.2 Generátor elektrických impulsů pro WEDM

Parametry impulsů patří k zásadním charakteristikám procesu obrábění. Technologické aplikace využívají různých forem elektrických výbojů, které jsou přes elektrodu na obrobek přiváděny ve formě impulsů dané frekvence. Impulz jako takový je definován napětím, proudem a tvarem. Právě tvorbu impulsů má na starosti generátor, který tvoří srdce samotného stroje. V novodobých drátových řezačkách se využívají především tranzistorové generátory, které umožňují vyvíjet jiskru s nadefinovaným tvarem pro konkrétní obráběcí strategie (dokončování x hrubování). (2)

#### 3.7.1.3 Řídicí systém

Řídicí systém má na starosti koordinovat jednotlivé části stroje a je realizován pomocí numerického řídicího systému. Je ovládán obsluhou skrz ovládací prvky, jakými jsou myš, klávesnice a monitor. Systém umožňuje načítání, úpravu, nebo tvorbu NC a technologických programů. Sleduje a reguluje řezné podmínky, stav dielektrika, filtračního systému. Dále vypočítává pohyb jednotlivých os podle naprogramované kontury a přednastavených korekcí. Moderní elektroerozivní drátové řezačky obvykle mají ovládané 5 os. X a Y jsou vodorovné roviny stolu. U a V jsou vodorovné roviny horní hlavy. Osa Z je svislá rovina určená pro definici výšky obrobku. (2)

### 3.7.1.4 Systém vedení drátové elektrody

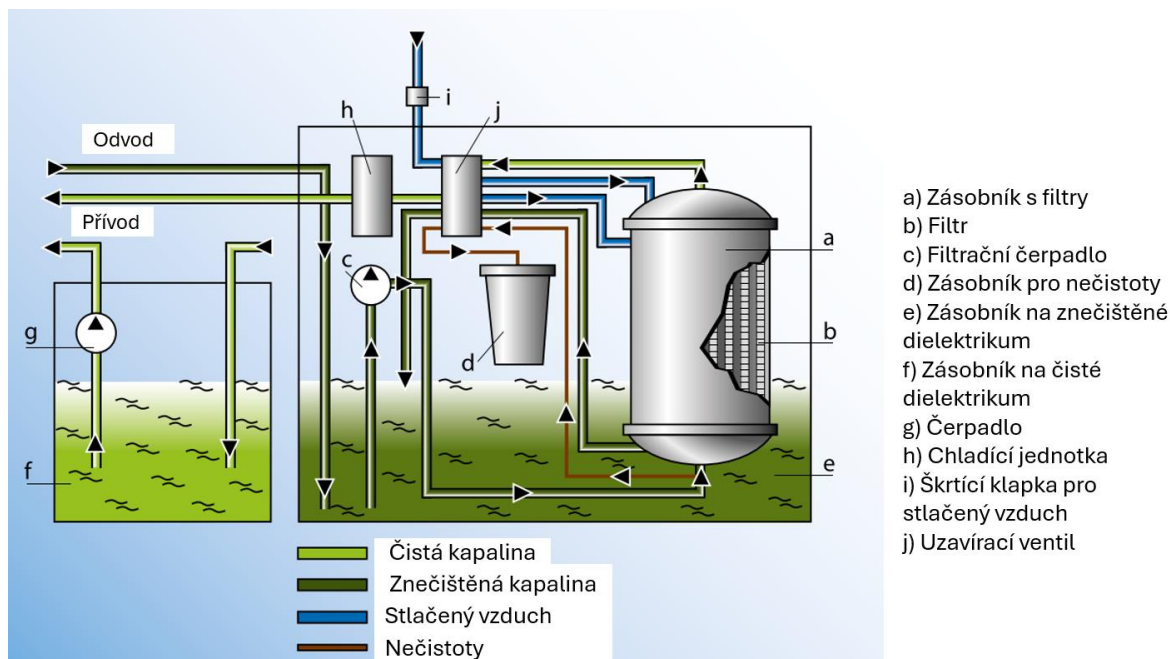
Systém vedení drátové elektrody je zásadní konstrukční prvek drátových řezaček. Jeho úkolem je:

- Zajistit spolehlivé odvíjení drátu ze zásobní cívky
- Správně předeprnout drátovou elektrodu
- Přenos elektrické energie na drátovou elektrodu
- Návlek drátu

Zásobní cívka je odvíjena pomocí elektromotoru, který je ovládán pomocí řídicího systému stroje. Z cívky drát putuje přes systém vyrovnávacích kladek, jehož součástí je i brzdové kolečko, jenž má na starosti správné mechanické napětí drátu. Pomocí stlačeného vzduchu je drát navlečen do horní hlavy. Z horní hlavy je po sléze pomocí automatického návleku přiveden do spodní hlavy. Návlek je nejčastěji realizován dvěma způsoby, buďto proudem dielektrika, nebo mechanickými podavači. Pro návlek je důležité, aby byl drát na konci rovný a špičatý. Toho je dosahováno pomocí žihání, které probíhá v horní hlavě. V předposledním kroku dojde k návleku skrz startovací otvor do dolní hlavy. Nakonec je použitý drát odváděn do skladovací nádoby a je připraven k materiálové recyklaci. Přenos elektrické energie je dosahováno pomocí dvou kontaktů, které se nacházejí nad a pod obrobkem. Z důvodu opotřebení kontaktů od pohybujícího se drátu je nutné po určité době pootočit, popřípadě vyměnit. Vedení a polohování drátu je zajištěno vodičky, které mají nejčastěji kruhový tvar a jsou vždy konstruovaná pro určitý průměr drátu. (4)

### 3.7.1.5 Čerpací a filtrační systém dielektrika

Čerpací a filtrační systém (obrázek 10) zajišťuje dodávku dielektrické kapaliny do místa řezu, její efektivní čištění a chlazení. Tento systém je zásadní pro přesnou a spolehlivou výrobu, ale i pro trvanlivost samotného stroje. Je tvořen zásobníkem na dielektrickou kapalinu, filtračním systémem, deionizačním systémem a chlazením. Čisté dielektrikum je skladováno v nádrži na čisté dielektrikum a pomocí čerpadla je přiváděno do místa řezu, respektive do pracovní vany. Znečištěné dielektrikum je odváděno z pracovní vany do nádrže s nečištěným dielektrikem. Dále projde přes systém filtrů, kde je vyčištěno a putuje zpět do nádrže s čistou dielektrickou kapalinou. Jakmile dosáhne filtrační systém určitého znečištění, tak se spustí automatický cyklus, který pomocí stlačeného vzduchu filtry vyčistí a odpadlý materiál odchází do kalové nádrže. Kvalita dielektrické kapaliny je neustále během provozu kontrolována pomocí vodivostních a tepelných čidel, které bývají nejčastěji umístěny v pracovní vaně. V momentě, kdy vodivostní čidlo detekuje hodnotu vodivosti dielektrika mimo toleranční pásmo (vodivost se zvětšuje vlivem rozptýlených kovových částic), tak je hnáno přes deionizační zařízení. (7) (18)



Obrázek 10 Čerpací a filtrační systém dielektrika (7)

### 3.7.2 Drátové elektrody

Volba drátové elektrody je velmi důležitým parametrem pro samotné obrábění. Drátové elektrody se používají v průměrovém rozsahu od 0,02-0,3 mm. Průměr drátu je klíčový, jelikož ovlivňuje rychlost řezu a kvalitu obrobeného povrchu. Malé průměry drátu se využívají pro precizní obrábění velmi malých součástí, kde je vysoký požadavek na přesnost a povrchovou kvalitu dílu. Menší průměr drátu s sebou nese i menší pracovní mezeru, což s sebou přináší možnost řezání ostřejších hran s menším rádiusem. Čím menší je průměr drátu, tím menší proud je schopen přenášet, a tím pádem má i menší rychlost řezu. Dalším negativem může být i větší riziko přetržení drátu během elektroeroze. Nejčastěji využívaným průměrem bývá 0,25mm. EDM dráty jsou známé svou nízkou lomovou houževnatostí. Tento fakt se projevuje v jejich neschopnosti odolávat relativně malým defektům, aniž by se přetrhl. Každý výboj vytváří kráter. Tyto krátery společně s výplachem a předpětím drátu mohou způsobit přetržení drátu, které snižuje produktivitu obrábění, jelikož je nutný nový návlek drátu. Drát je v průběhu řezu silně zatěžován, a tak jsou na něj kladeny velmi specifické požadavky (19) (20):

- Mechanická pevnost
- Elektrická vodivost
- Přesnost drátu (přísná tolerance průměru a kruhovitosti)
- Vysoký bod tání
- Tažnost
- Cena (19) (21)

**Mechanická pevnost** – pevnost v tahu je největší možné napětí v materiálu při natahování, kterému materiál jako celek odolává, aniž by se porušil. Je definován maximálním zatížením v  $\text{N/mm}^2$ . Dostatečná pevnost je důležitá zejména pro odolávání tahu vyvozeného ze systému vedení drátu, který zajišťuje jeho správné předepnutí. Dráty pro EDM se vyrábějí v několika pevnostní kategoriích a to 900, 500 a 400  $\text{N/mm}^2$ . Úhel řezu ovlivňuje volbu pevnosti drátu. Obecně platí následující (21) (20):

- Pro kolmé a mírně nakloněné řezy ( $0-8^\circ$ )...900  $\text{N/mm}^2$
- Pro středně nakloněné řezy ( $8-20^\circ$ )...500  $\text{N/mm}^2$
- Pro vysoce nakloněné řezy ( $20-30^\circ$ )...400  $\text{N/mm}^2$

**Elektrická vodivost** – vyjadřuje míru schopnosti materiálu přenášet elektrický proud. V EDM platí, že čím vyšší je vodivost drátu, tím větší výkon lze přenést na obrobek, což vede k vyšší řezné rychlosti. (22)

### 3.7.2.1 Druhy drátových elektrod

Dle materiálového složení můžeme drátové elektrody rozdělit následovně:

#### a) Měděný drát

První drát použitý pro technologii WEDM byla měď. Díky své dostupnosti a vysoké vodivosti byla v té době logickou volbou pro elektroerozivní elektrodu, ale jak se generátory stávaly výkonnějšími, tak nízká pevnost v tahu ( $235-415 \text{ N/mm}^2$ ) odhalila její omezení. S výjimkou starších strojů, které specifikují použití měděného drátu se tento drát doporučuje jen zřídka. V těchto strojích musí být tento drát použit pro drátové řezání všech materiálů proto, že nastavení parametrů generátoru byla nastavena přímo na vlastnosti mědi. Tyto stroje jednoduše neumožňovali volbu jiného materiálu elektrody. (21) (22)

#### b) Mosazný drát

Nejpoužívanější materiálem drátů pro EDM je mosaz. Mosazné dráty jsou velmi všestranné a lze je použít ve většině moderních strojů. Mosazné dráty pro EDM jsou typicky slitiny mezi 63:37 (americké a evropské) až 65:35 (asijské), poměr Cu:Zn. Zinek má nižší bod tání/odpařování, což z něj dělá lepší elektrodový materiál než měď, takže čím více zinku je na povrchu elektroerozivního drátu, tím rychleji bude řezat. Výrobní potíže však nastávají, když se objem zinku přiblíží hodnotě 40 % a jeho krystalická struktura se změní na gama fázi, což způsobí, že se drát stane velmi křehkým a obtížně se táhne. Na trhu se vyskytují dva typy drátů s obsahem 60/40 Cu/Zn, které jsou vhodné pro vyšší řezné rychlosti. Pevnost v tahu mosazných drátů se pohybuje od 375 do 1195  $\text{N/mm}^2$ , v závislosti na složení slitiny a její teplotě. (21)

### c) Povlakované dráty

Povlakované EDM dráty jsou dráty, které mají velmi tenkou vrstvu (2-3 $\mu$ m) čistého zinku nanesenou na mosazné, měděné nebo ocelové jádro. Nanášení zinku na jádro se dosahuje pomocí elektrogalvanizace. Jedná se o nej přesnější způsob aplikace, nanášení čistého zinku, atom po atomu na jádro drátu. Tato metoda zajišťuje stejnoměrnou tloušťku a jednotnost povrchu. Namáčení za tepla je další způsob potahování drátu. Je to rychlejší a méně přesná metoda potahování a tyto dráty bývají z pravidla levnější. Povlak se skládá buďto z čistého zinku nebo oxidu zinečnatého v závislosti na aplikaci. Povlaky z čistého zinku budou mít lesklou stříbrnou barvu, zatímco povlak z oxidu zinečnatého se bude jevit jako matně šedý. Pozinkované dráty řezou mnohem rychleji a lámou se méně často než obyčejné mosazné dráty. Doporučují se tedy pro rychlé hrubování. (20) (21) (22)

### d) Difuzně žíhané dráty

Dráty s vysokým obsahem zinku jsou z pohledu elektroerozivní obrábění lepší elektrodou. Dráty s procentuálním podílem zinku blížícím se 40 % jsou obtížně vyrobitelné, proto byl navržen speciální způsob výroby drátu s tlustší povrchovou vrstvou zinku. Na vnější povrch měděného nebo mosazného jádra je nanesen silný povlak z čistého zinku (18-35 $\mu$ m). Povlak je nanášen pomocí difuzního žíhání ve speciální peci, kde čistý zinkový povlak difunduje na povrch drátové elektrody. Tyto dráty jsou vhodné pro rychlé řezání vysokých obrobků, sériovou výrobu a ve špatných podmínkách pro vyplachování. (21)

### e) Molybdenové dráty

Jedná se o velmi pevný drát s pevností v tahu přesahující 1900 N/mm<sup>2</sup>. Molybden má velmi vysoké teploty tání a odpařování 2 625 ° C a 5 560 ° C, a tak se jedná o poměrně špatný elektrodový materiál. Tento drát se často používá v malých průměrech (0,1 až 0,15 mm). Využívá se pro velmi úzké řezy a téměř ostré rádiusy vnitřních rohů. Díky své vysoké pevnosti v tahu napomáhá molybdenový drát při zachování vynikající přímosti řezu. Dále může najít uplatnění ve speciálních případech, typicky v lékařských a vojenských aplikacích, kdy nemůže dojít ke kontaminaci povrchu drátem z mědi nebo zinku. (21)

### f) Wolframové dráty

Wolframový drát je často jednou z posledních možností při řešení náročného úkolu při drátovém řezání. Přestože je tento drát velmi drahý, špatně řeže a obtížně se s ním pracuje, je někdy jediným řešením problematických aplikací WEDM. S ještě vyššími teplotami tání a odpařování než molybden, 3410 ° C a 5930 ° C je to nejméně účinná drátová elektroda s ohledem na řezný výkon. Wolframový drát je dostupný v malých průměrech (0,02 až 0,05 mm). Má nejvyšší pevnost v tahu ze všech EDM drátů. To umožňuje řezat velmi jemné detaily s velmi rovnými stěnami a těmi nejostřejšími vnitřními rádiusy. (21)

### 3.7.3 Dielektrikum

Dielektrická kapalina je jakákoli kapalina s vysokým elektrickým odporem. Je to elektrický izolant, ale ve formě kapaliny. Běžné dielektrické kapaliny zahrnují rostlinné oleje a minerální oleje, protože jsou levné a snadno dostupné. Pro drátové řezání se nejčastěji využívá deionizovaná voda. Tento typ je výhodný zejména pro jeho menší ekologickou zátěž a větší řezné rychlosti oproti olejovým dielektrikům. Dielektrická kapalina vytváří pracovní prostor mezi elektrodou a obrobkem a vyplňuje tak pracovní mezeru. Druh a stav dielektrika výrazně ovlivňuje proces elektroeroze a plní následující funkce (23) (24):

- Odvádí odebraný materiál z obou elektrod
- Působí jako izolátor mezi oběma elektrodami
- Odvádí teplo z místa výboje
- Zabraňuje nataveným částicím znovu ulpět na obrobku

Mezi požadované vlastnosti dielektrika patří:

- Vhodný elektrický odpor
- Vysoký bod vzplanutí
- Ekologická nezávadnost
- Nízká cena
- Malá korozní agresivita

Moderní elektroerozivní drátové řezačky obsahují systémy čištění dielektrika pomocí filtrů a přidávání deionizačních pryskyřic, aby udržovali dielektrikum v ideálním stavu. Existují dva typy konstrukčního řešení přívodu dielektrika do místa výboje.

- 1) Obrobek se nachází v dielektrické lázni. K vyplachování dochází samovolně a také přidavným tlakem dielektrika, které je do místa řezu přiváděno přes dolní a horní trysku.
- 2) Proudem dielektrické kapaliny do místa řezu. Obrobek není celý ponořen do dielektrické kapaliny. Ta je do místa řezu přiváděna pod vysokým tlakem horní a dolní tryskou.

(23) (25)

## 4 Metodika experimentu

Společnost Zach-nástrojárna s.r.o. využívá pro výrobu přesných dutin vstříkovacích forem drátovou řezačku Fanuc Robocut-C600iC. Pro veškeré drátové řezání využívá mosaznou drátovou elektrodu od firmy Bedra variantu Betterbrassone:9. Úkolem experimentu bylo zjistit, jak by jiné drátové elektrody ovlivnily parametry obrábění. Nejatraktivnější variantou pro testování byla volba většího průměru drátu (0,3mm) a speciálního povlakovaného drátu.

Větší průměr drátu je schopen přenášet větší proud, což by se mohlo pozitivně projevit ve zvýšené rychlosti řezu. Větší průměr drátu má i svá negativa. Hlavním omezením je řezání ostrých hran. Čím větší je průměr drátu, tím větší zanechá rádius v dutině. Právě ostré hrany jsou často důvodem aplikace WEDM, a proto by v těchto případech byla tato varianta nepřijatelná.

Speciální povlakovaný drát je podle prodejců vhodný pro větší výšky řezu a šikmé řezání. Jeho hlavním negativem je vyšší pořizovací cena.

Testovali se celkem 3 druhy drátových elektrod:

- 1.) Betterbrassone:9 o průměru 0,25mm. Jedná se o standardně používaný mosazný drát.
- 2.) BFcut – Tx o průměru 0,25mm, který má jádro z mosazné slitiny CuZn37 a je povlakován speciální slitinou.
- 3.) PENTA cut – P o průměru 0,3mm, který je obdobou drátu Betterbrassone:9.

Test spočíval ve vyříznutí shodných dutin ve tvaru obdélníku 15x30mm do vzorkového polotovaru. Pro experiment bylo zásadní zjistit chování drátových elektrod v různých výškách řezu. Výšky řezu byly zvoleny 20, 40, 80, 95 a 150 mm.

Výška řezu 150 mm byla řezána pouze dráty o průměru 0,25 mm. Dráty Betterbrassone:9 a BFcut-Tx a to z důvodu omezených výrobních kapacit podniku.

U jednotlivých drátů se sledovala rychlost řezu a spotřeba drátu při daných výškách, načež následovala kontrola přesnosti vyrobených otvorů pomocí souřadnicového měřicího stroje Mitutoyo CRYSTA-Apex S.

Na závěr bylo vytvořeno technicko-ekonomické porovnání drátových elektrod. Podnik tak bude schopen přesněji určit jaký typ drátu zvolit pro konkrétní druh výroby.

Experiment byl navržen pouze pro potřeby společnosti Zach nástrojárna s.r.o. a je nutné zmínit, že výsledky testu jsou validní pouze pro tyto konkrétní podmínky. Jakákoli změna



v parametrech obrábění (typ stroje, druh dielektrika, nastavení technologie, obráběný materiál) mohou zásadně ovlivnit výsledky testu.

#### 4.1 Popis a charakteristika použité drátové řezačky Fanuc Robocut $\alpha$ -C600iC

Robocut  $\alpha$ -C600iC patří k nejprodávanějším modelům japonského výrobce elektroerozivních strojů Fanuc. Výrobce tvrdí, že se jedná o novou generaci drátových řezaček, a to hlavně díky implementaci nového systému pro prevenci přetržení drátu, nové technologii návleku drátu a přepracované kompenzaci teploty. (26)

Technické specifikace stroje jsou vyobrazeny v tabulce 2.

Tabulka 2 Technické specifikace Robocut  $\alpha$ -C600iC (26)

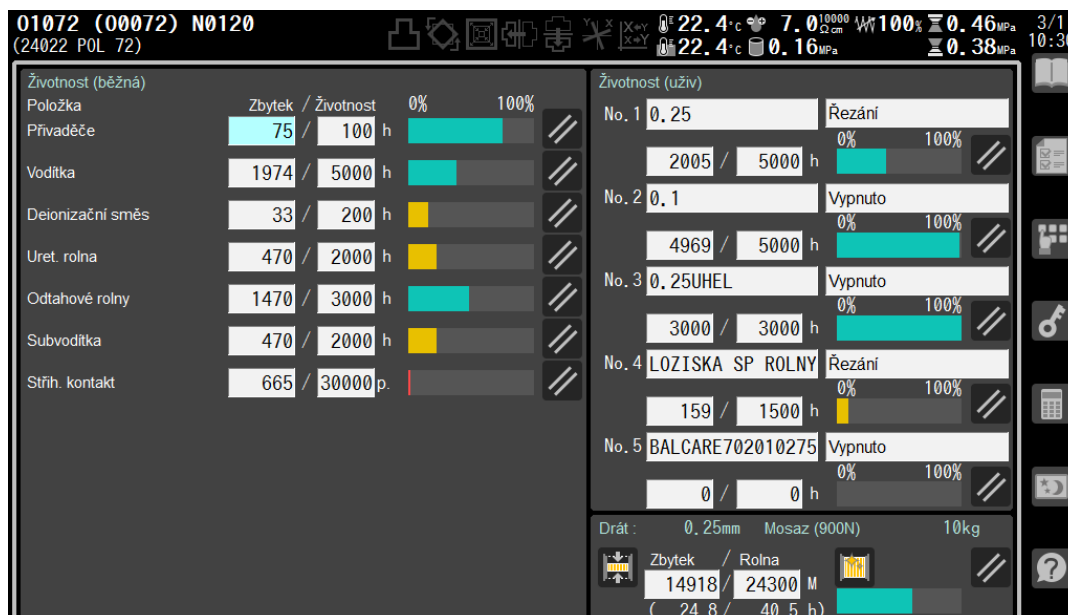
Maximální rozměry obrobku [mm]	1050×820×300
Maximální hmotnost obrobku [kg]	1000
Pojezd v ose X a Y [mm]	600×400
Pojezd v ose Z [mm]	310
Pojezd v ose U a V [mm]	100×100
Max. úhel řezu [° / mm]	± 30° / 150
Min. krok pohonu [mm]	0,0001
Průměr řezacího drátu [mm]	0,10 – 0,30
Max. hmotnost drátu [kg]	16
Půdorys (Š/H) [mm]	2650×3150
Hmotnost stroje (cca) [kg]	3600
Řídicí systém	FANUC 31i-WB
Velikost paměti vnitřního programu [MB]	8

##### 4.1.1 Údržba použité drátové řezačky

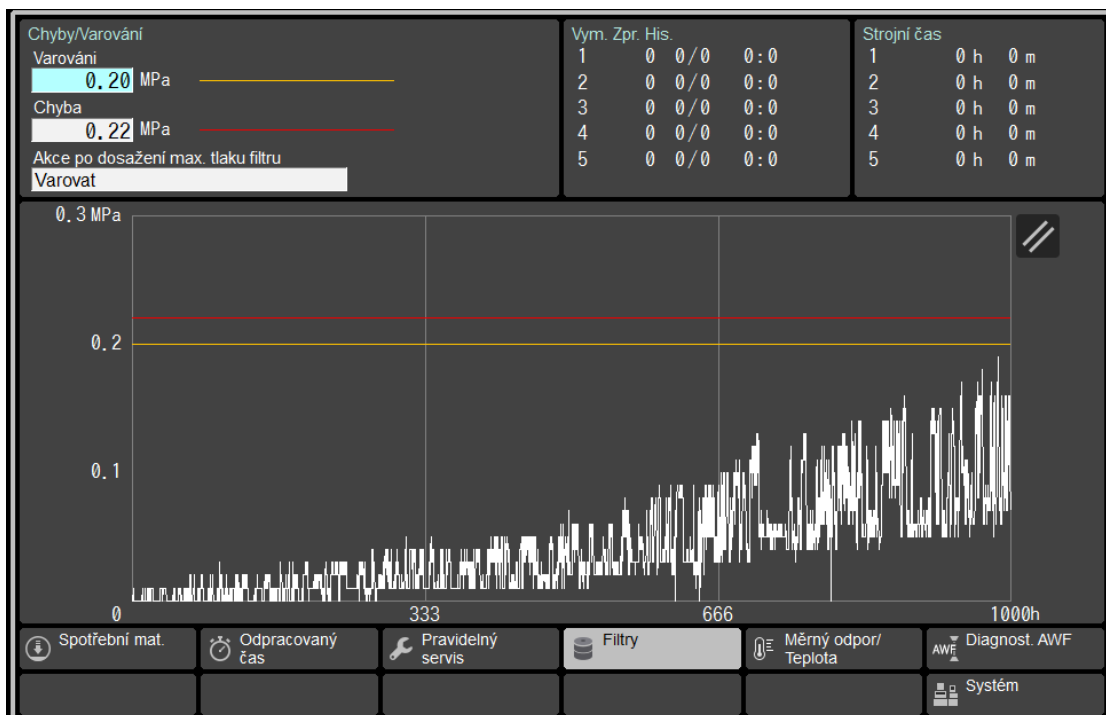
Údržba je v případě této drátové řezačky řešena prediktivně pomocí rozhraní, jenž je zabudováno ve stroji a je součástí řídicího systému stroje viz obrázek 11. Hlavním diagnostickým signálem pro výměnu většiny strojních komponentů jsou odpracované strojní hodiny. Vlivem mechanického působení drátu na strojní součásti dochází k jejich rychlému

opotřebení. Z toho důvodu se musí vždy po určitých strojních hodinách měnit. Patří mezi ně:

- Přiváděče elektrické energie – mají funkci kontaktu. I přes to, že jsou tyto součásti zhotoveny z vysoce ořezuvzdorných ocelí, tak se vlivem průchodu drátu do přiváděče za určitý čas vyryjí drážky. Je tedy nutné je po 100 strojních hodinách pootočit o malý stupeň. Celková výměna přiváděčů nastane až za velmi dlouhý čas řádově po 2500 strojních hodinách.
- Vodítka – jsou zodpovědná za finální napolohování drátu. Diamantový průvlak vodítka zaručuje minimální opotřebení, ale i přes to je nutné je po 5000 strojních hodinách vyměnit, aby byl drát polohován v dostatečné přesnosti.
- Rolny – další spotřební strojním prvkem jsou rolny, které jsou součástí systému vedení drátové elektrody a mají za úkol vést drátovou elektrodu ze zásobní cívky do horní řezací hlavy. Jejich životnost je 2000-3000 hodin.
- Deionizační směs – Zásobník s deionizační pryskyřicí zaručuje ideální vodivost dielektrické kapaliny. Musí se vyměňovat po 200 hodinách.
- Ložiska roln – Po 1500 hodinách je důležité vyměnit i veškerá ložiska roln, aby byl zajištěn spolehlivý chod stroje.
- Filtry – zajišťují čištění dielektrika. Stav filtrů je průběžně monitorován, jeho vyhodnocení spočívá v měření tlakového odporu. V momentě, kdy tlak přesáhne určitou hodnotu, tak stroj dá signál obsluze k jeho výměně. Tento kontrolní systém je vyobrazen na obrázku 12.

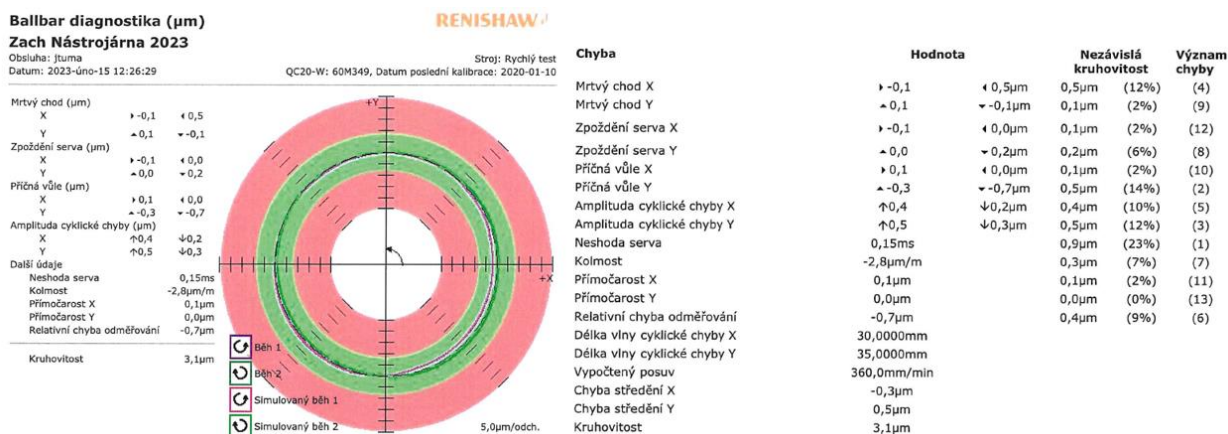


Obrázek 11 Diagnostický manažer stroje



Obrázek 12 Monitoring stavu filtru

Druhou kategorií prediktivní údržby je pravidelný roční servis, při kterém se podnik obrací na outsourcingovou servisní službu, kterou poskytuje dodavatel stroje Penta trading spol. s.r.o. V rámci tohoto servisu dojde k promazání, výměně ložisek rolen a kontrole geometrie stroje pomocí Ballbarovi diagnostiky. Ta spočívá v kontrole přesnosti polohování (kontrola přímočarosti, kruhovitosti, kolmosti), vůlí a zpoždění serv v osách X a Y. Výsledky z poslední diagnostiky v roce 2023 jsou zobrazeny na obrázku 13.



Obrázek 13 Ballbarova diagnostika

## 4.2 Vybrané drátové elektrody

V experimentu byly použity celkem 3 druhy drátových elektrod:

- **Mosazný drát BETTERBRASS ONE 9.0**  
Jedná se o mosazný drát o průměru 0,25mm s pevností v tahu 900 MPa. Drát je vyroben ze speciální slitiny CuZn40. V porovnání s ostatními se jedná o nejlevnější variantu. Cena za 8 kg cívku (19300 m) je 2232 Kč. (27)
- **PENTA BFcut-Tx**  
Drát o průměru 0,25 mm a pevnosti v tahu 900 MPa 0,25. Jádru je zhotoveno ze slitiny CuZn37, povrch je povlakován speciální slitinou, jehož složení je veřejnosti neznámé. Cena za 8 kg cívku (19300 m) je 3097 Kč. (28)
- **Penta Cut – P**  
Mosazný drát o průměru 0,3 mm a pevností v tahu 1000 Mpa. Cena za 8 kg cívku (12960 m) je 2187 Kč. (28) (29)

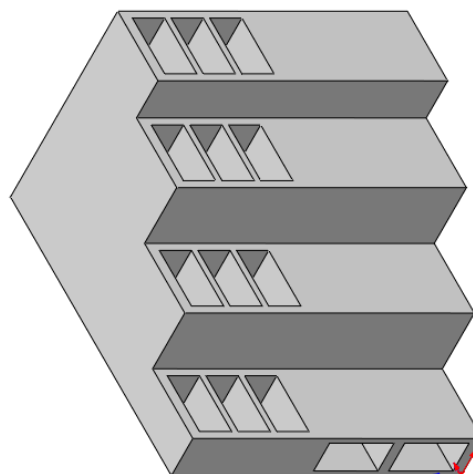
## 4.3 Testovací polotovar

Jako polotovar byl zvolen blok nástrojové oceli 1.2343 o rozměrech 150x120x95mm. Na něm byli následně vyfrézovány schody o výšce 20, 50, 80 a 95 mm. Z důvodu nutnosti návleku drátu byli do polotovaru vyvrtány startovací otvory o průměru 7 mm. Otvory byly umístěny vždy do středu budoucího dutého kvádrů, tak aby drát ujel vždy stejnou vzdálenost a výsledky experimentu nebyly zkresleny.

Konturu řezu tvořil obdélník o rozměrech 15x30 mm. Tyto rozměry byly zvoleny tímto způsobem proto, aby byly vidět rozdíly v rychlostech řezu mezi jednotlivými druhy drátových elektrod. V případě příliš malých otvorů bychom pozorovali minimální rozdíly v jednotlivých obráběcích parametrech. Jelikož se jedná o poměrně drahou obráběcí technologii, tak volba příliš velkých rozměrů otvorů by výrazně zatěžovala výrobní kapacity. Na obrázku 14 je vidět obrobený testovací polotovar a obrázek 15 vyobrazuje jeho CAD model.



Obrázek 14 Testovací polotovary

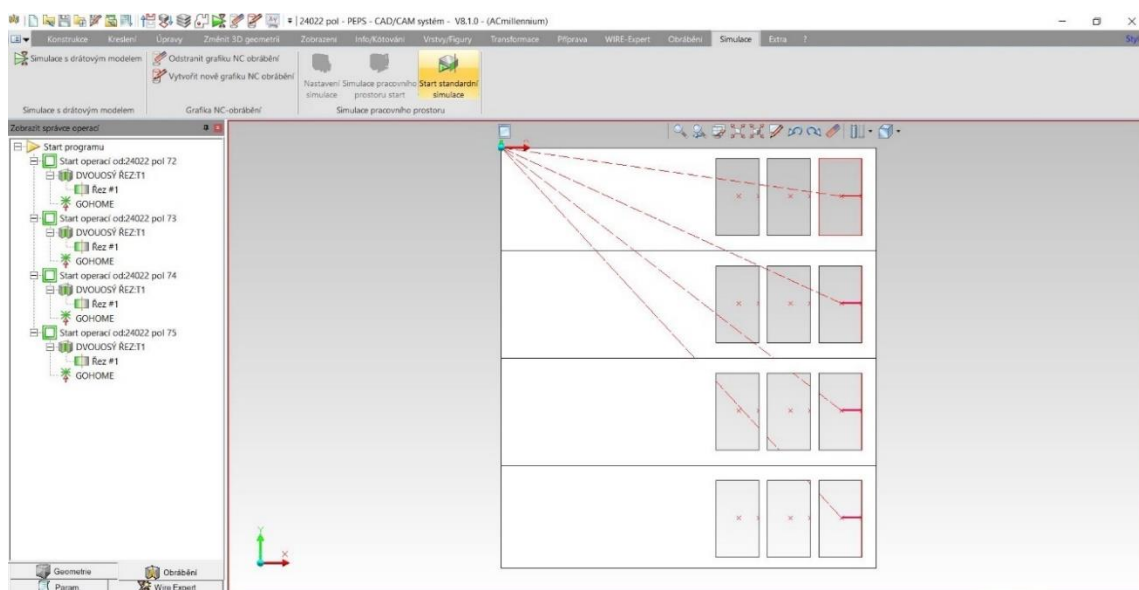


Obrázek 15 CAD model testovacího polotovaru

#### 4.4 Programování EDM drátové rezačky

Programování drátových rezaček lze realizovat několika způsoby. Záleží na dodavateli drátové rezačky a možnostech softwaru. Ve společnosti Zach-nástrojárna s.r.o. se vytváří hlavní program následujícím způsobem:

Nejdříve se do programu PEPS nahraje CAD model dílce. Zde se vyberou požadované kontury k řezu, ze kterých se vytvoří tzv. dráhový program, který obsahuje informace pouze o dráze a návleku drátu. Ukázka z programu PEPS je vykreslena na obrázku 16. Na základě vybrané kontury pak vygeneruje program NC kód, který se přes cloudové úložiště nahraje do stroje.



Obrázek 16 Programování kontury v programu PEPS

NC kód pro jeden vzorkový obdélník vypadal takto:

```
%  
O0072(24022 POL 72);  
N10 G90;  
N20 M15P0;  
N30 G92 X0.0 Y0.0 I50.0 J0.0;  
M21 H50;  
N40 G00 X-12.0 Y-17.0;  
N50 M60;  
N60 G92 X-12.0 Y-17.0 I50.0 J0.0;  
N70 G01 G41 X-5.0 Y-17.0;  
N80 G01 X-5.0 Y-3.75;  
N90 X-20.0;  
N100 Y-30.75;  
N110 X-5.0;  
N120 Y-17.5;  
N130 M01;  
N140 G01 X-5.0 Y-16.6 R0.4;  
N150 G01 X-12.0;  
N160 G01 G40 Y-17.0;  
N170 M15P0;  
N180 M50;  
N190 G00 X0.0 Y0.0;  
N200 M30;  
%;
```

Následně se ve stroji vytvoří technologický program (obrázek 17), který je odvozen z požadavků řezu. Obsluha stroje zvolí požadovanou výšku řezu, druh drátu, IT přesnost a kvalitu povrchu. Algoritmus řídicí systém stroje vybere optimální strategii obrábění. V ní je obsažen počet řezů, on a off time, rychlost obrábění, tlak výplachu, korekce, napnutí drátu atd. Nakonec se spojí tento technologický program s dráhovým a vznikne hlavní program, který kompletně řídí celý proces řezu.



Obrázek 17 Výběr technologie řezu

#### 4.4.1 Výběr technologie

Abychom zajistili stejné podmínky pro všechny zkoumané varianty drátových elektrod, tak bylo zapotřebí vybrat jednotnou technologii. Pro účely experimentu byla zvolena technologie na 2 řezy (2CD0) viz obrázek 17. Tato technologie dosahuje parametru přesnosti  $\pm 0,07\text{mm}$  a drsností povrchu Ra 2,3. První řez byl hrubovací a na obrázku 18 jsou jeho parametry zobrazeny ve sloupci 22. Druhý, dokončovací řez je vyobrazen ve sloupci 21.

01072 (00072) N0100  
(24022 POL 72)

22.4°C 7.0 MPa 100% 0.00 MPa 3/1 10:40  
22.4°C 0.06 MPa 0.00 MPa

č.	22	21	22	23	24	25	26
	D2, A2/ 20/ 25/22	D2, A2/ 20/ 25/22	D2, A2/ 20/ 25/22				D2, A2/ 20/ 25/22
Popis							
Rez č.	(NUM) 2	1	2	0	0	0	1
Mód řezu	(PM) 22	20	22	0	0	0	20
Nap.naprázd	(VS) 15	3	15				3
Říz. proudu	(CC) 102	201	102				112
Řezné nap.	(VM) -----	34	-----				26
T-on	(ON) 6	2	6				3
T-off	(OFF) 40.0	33,6	40.0				22,5
AC/DC	(AC) 1	1	1				1
Servo mód	(SVM) 19	0	19				1
Servo nap.	(SV) 69	5	69				25
Servo zes.	(SVG) 100	143	100				137
Kontrola A	(WP1A) -----	20	-----				12
Kontrola B	(WP1B) -----	2	-----				2
Off kont. A	(WP2A) 0	10	0				6
Off kont. B	(WP2B) 10	2	10				3
Napnutí	(T) 2000	1700	2000				1300
Odvín	(WF) 12	10	12				10
Tlak vypl.	(FR) 2	12	2				10
Druh vypl.	(FC) 0	0	0				0
Rychlost	(SPD) 5.00	3.30	5.00				2.70
Říz. dok.	(SPC) 3.0	-----	3.0				-----
Říz. rohu	(AIC) 45533	21201	45533				30002
Přímost	(STOFST) 0.0000	0.0000	0.0000				0.0000
Korekce	(OFST) 0.1350	0.1960	0.1350	0.0000	0.0000	0.0000	0.2280

č. 0      č. 21      Uživatelské

Výběr technologie      Technologie

Rozsah: 0 - 1081      MEMORY      Cykl Start

Menu      Pozice      Nastavit      Aut.najíždění      Výběr technol.      Technologie      Program      Grafika      Monitor      Údržba      Vst./Výst.

Obrázek 18 Technologie obrábění

## 5 Naměřená data a sledované parametry

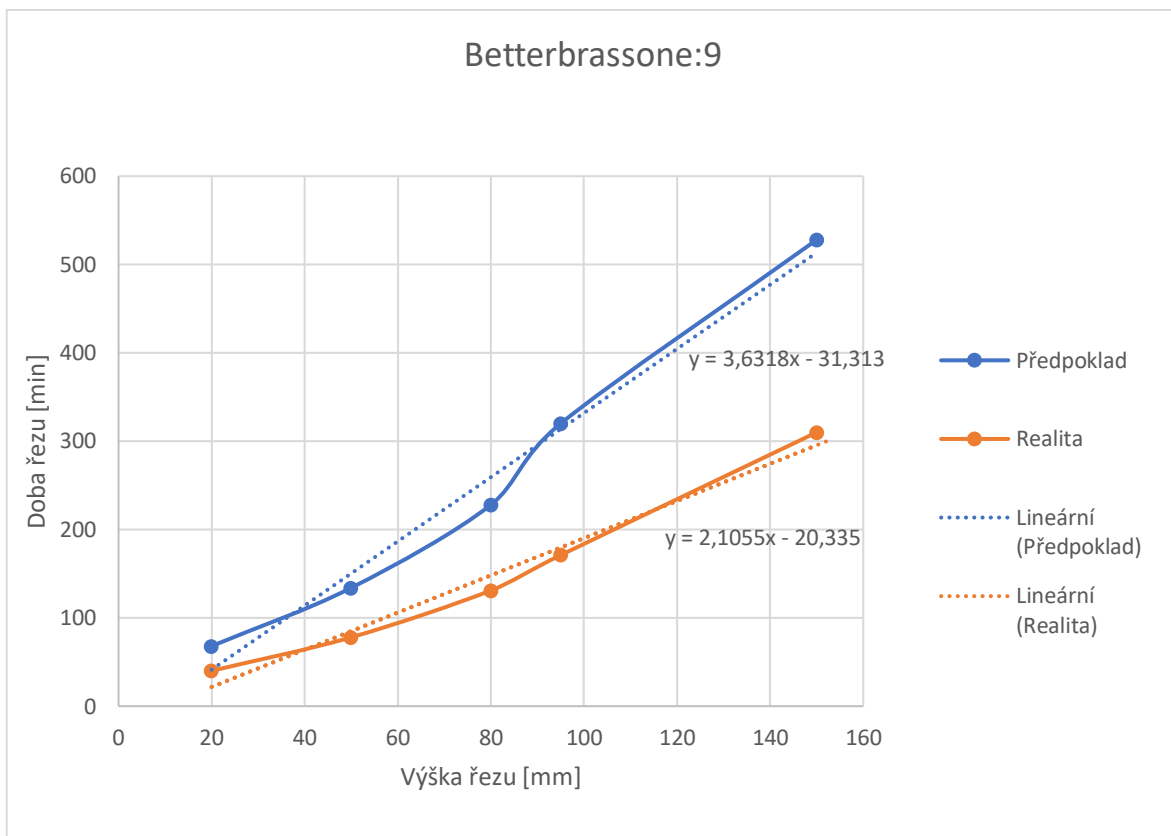
Nedílnou součástí celého experimentu bylo sledování a vyhodnocení následujících parametrů obrábění:

- Rozměrová přesnost, jelikož je pro podnik zásadní dodávat dílce ve stanovené rozměrové a geometrické toleranci.
- Doba řezu a s tím související rychlost obrábění, jelikož zásadně ovlivňují produktivitu obrábění.
- Spotřeba drátové elektrody – pro stanovení hodinových nákladů na provoz stroje bylo potřeba hlídat spotřebu drátu, která společně s jeho cenou výrazně ovlivňuje ekonomickou stránku výroby.
- Cena drátové elektrody

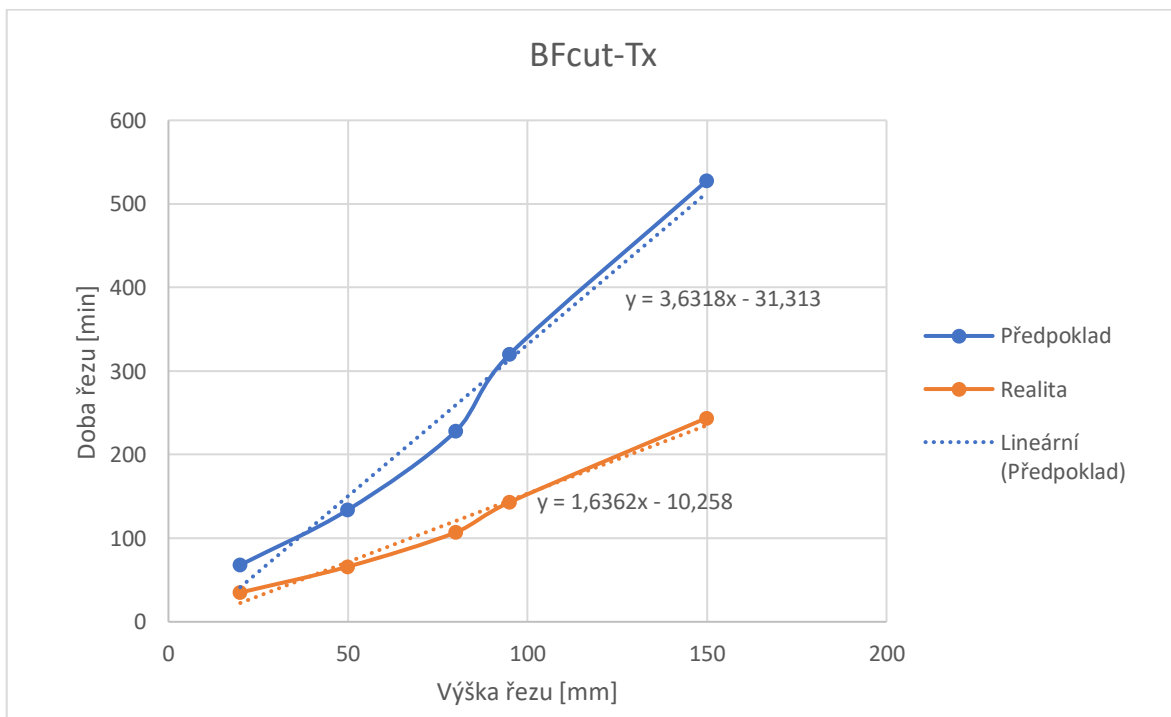
### 5.1 Čas obrábění drátových elektrod

Následující kapitola porovnává časy obrábění mezi jednotlivými druhy drátových elektrod. Zde bylo zajímavé vidět i porovnání mezi předpokládaným časem řezu, který vypočítal řídicí systém stroje a reálným časem řezu. Závislost je vyobrazena v grafech 1-3.

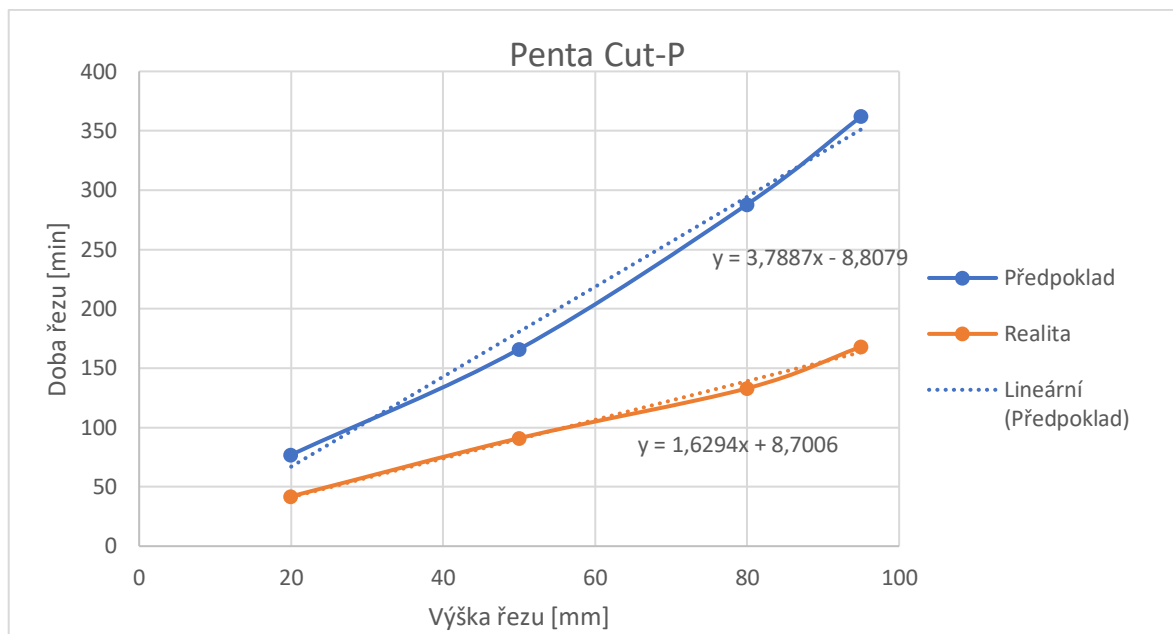




Graf 1 Porovnání předpovědi a reálného doby řezu Betterbrassone:9



Graf 2 Porovnání předpovědi a reálného doby řezu BFcut-Tx

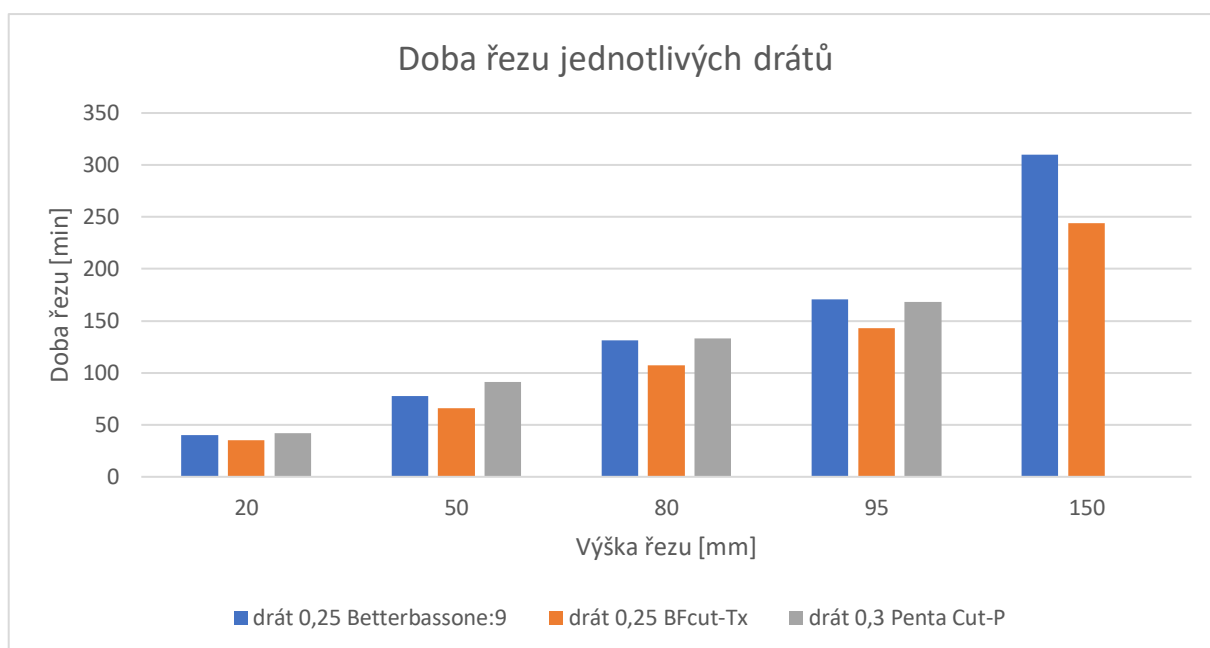


Graf 3 Porovnání předpovědi a reálné doby řezu Penta Cut-P

Z grafů 1-3 můžeme vypořádat, že předpokládaná doba řezu vygenerovaná řídicím systémem stroje značně nadhodnocuje dobu řezané kontury. Pokaždé stroj údaj nadhodnocoval a ani v jednom případě reálnou dobu řezu nepodhodnotil. Proložíme-li naměřené body přímkou a vytvoříme-li jejich rovnice, můžeme pozorovat, že směrnice přímek se zásadně odlišují mezi předpovědí a realitou. Nadhodnocení předpokládaných časů může být zapříčiněno časovým přírůstkem na přetržení drátové elektrody a nutností opětovného návleku. V průměru byl reálný časový údaj podhodnocen o 54 %. Předpověď stroje byla identická pro dráty o průměru 0,25 mm, jelikož byly řezány pomocí stejné technologie. Významně se předpoklad lišil od reality v případě vysokých řezů u drátu BFcut-Tx (podhodnoceno o 58 %). Obecně lze tvrdit, že reálná doba řezu podhodnoceně kopírovala časový průběh předpokladu stroje.

Graf 4 znázorňuje poměr v reálné době řezu mezi jednotlivými variantami drátových elektrod. Nejlepších výsledků dosáhl drát 0,25 BFcut-Tx, který je v grafu vykreslen oranžovou barvou. Veliké rozdíly se začali projevovat při vyšších výškách řezu. Již při výšce řezu 80 mm vyřiznul konturu o 22 minut rychleji než druhý nejrychlejší drát 0,25 betterbrassone:9. Při výšce řezu 150 mm pak byly rozdíly ještě větší. V tomto případě byl rychlejší o 66 minut. V procentuálním vyjádření to znamenalo zrychlení o 22 %.

Nejhůře si v průměru vedl drát 0,3 Penta Cut-P, což bylo překvapující. Náš původní předpoklad byl takový, že bude rychlejší než 0,25 mosazný drát Betterbrassone:9. Jeho rychlost byla překonána až při výšce 95 mm, ale pouze o 3 minuty (2,5 %). Menší rychlost řezu mohla být způsobena nutností odebrat větší objem materiálu.



Graf 4 Porovnání reálné doby řezu jednotlivých drátových elektrod

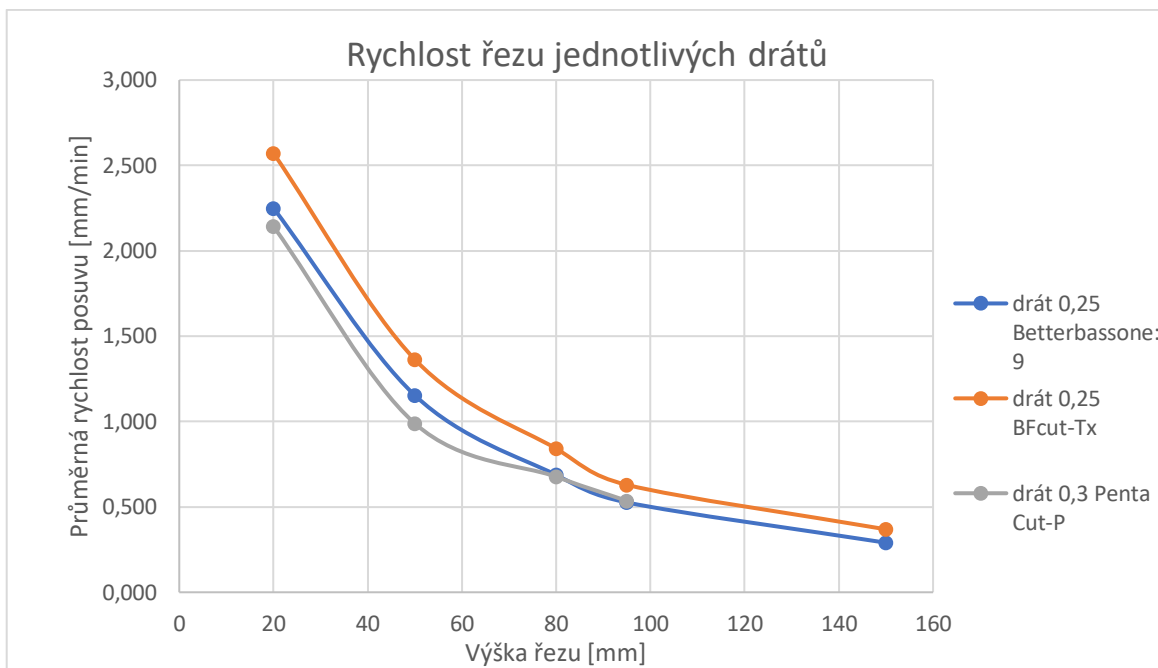
## 5.2 Rychlost řezu drátových elektrod

V případě drátového řezání je rychlost řezu vyjádřena rychlostí posuvu, která se udává v jednotkách [mm/min]. Vypočítává se z celkové dráhy kontury (90 mm) a doby řezu. Pro podmínky experimentu byla kontura (dráha) konstantní. Rychlost posuvu tedy přímo ovlivňoval čas řezu, který byl závislý na výšce řezu.

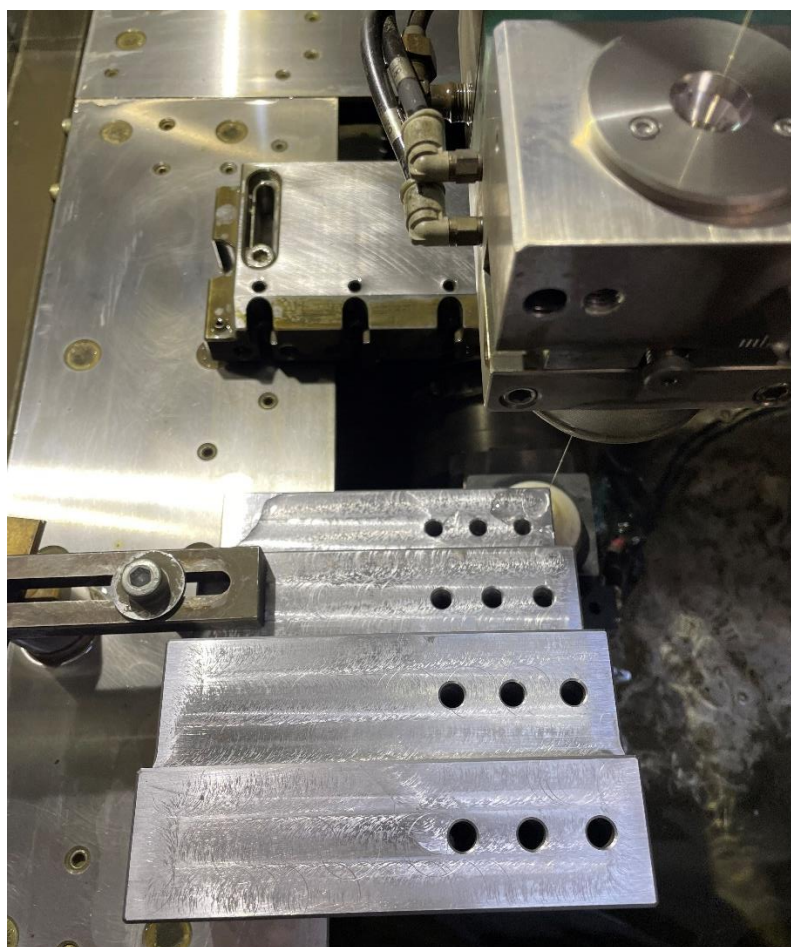
Jak je vidět z grafu 5 rychlost řezu se zmenšovala s rostoucí výškou řezu, neboť drát musel odebrat větší objem materiálu. Na příkladu drátu 0,25 BFcut-Tx je vidno, že výšku 20 mm řezal rychlostí 2,571 mm/min, kdežto výšku 150 mm pouze rychlostí 0,290 mm/min. Průměrná rychlost posuvu je uvedena v tabulce 3. Tento parametr je vhodný pro určení přibližné doby řezu.

Tabulka 3 Průměrná rychlost posuvu

Výška řezu [mm]	Průměrná rychlost posuvu [mm/min]		
	drát 0,25 Betterbassone:9	drát 0,25 BFcut-Tx	drát 0,3 Penta Cut-P
20	2,250	2,571	2,143
50	1,154	1,364	0,989
80	0,687	0,841	0,677
95	0,526	0,629	0,536
150	0,290	0,369	



Graf 5 Porovnání rychlosti řezu jednotlivých drátových elektrod



Obrázek 19 Upnutý polotovary ve stroji

## 5.3 Výpočet nákladů na výrobu pomocí WEDM

Celkové náklady na hodinu provozu stroje jsou hlavním ukazatelem pro určení ceny vyráběného dílce. Tyto náklady se určují z celkového času potřebného pro výrobu dané součásti, nákladů na hodinu provozu stroje a nákladů na přípravu polotovaru.

### 5.3.1 Čas potřebný pro výrobu součásti

Pro správné pochopení celkového času potřebného pro výrobu dílce pomocí WEDM je důležité uvědomit si všechny činnosti spojené s jeho výrobou. Můžeme zde zahrnout následující:

- Čas potřebný k výrobě startovacích otvorů
- Čas potřebný pro programování
- Čas potřebný pro upnutí
- Čas řezání kontury
- Čas potřebný pro vyjmutí obrobku
- Čas potřebný pro kontrolu

Pro naše zjednodušení a zobecnění výpočtu budeme vycházet pouze z času řezání požadované kontury. Ostatní časy se mohou výrazně lišit v závislosti na složitosti vyráběného dílu. Čas řezání kontury se vypočítá podle vztahu:

$$T_{\text{ř}} = \frac{l_k}{v_s} [\text{min}] \quad (5.1)$$

Kde:

$l_k$ ...délka kontury [mm]

$v_s$ ...střední rychlost posuvu [mm/min]

### 5.3.2 Náklady na hodinu provozu stroje

Zahrnutí veškerých nákladových položek je velmi obtížné. Museli bychom zde zahrnout veškeré náklady spojené s likvidací a recyklací, náklady na software a dalšími těžko vyčíslitelnými náklady. Pro potřeby experimentu jsem pracoval pouze s vyčíslitelnými náklady, které zásadně ovlivňují cenu spojenou s provozem drátové řezačky, patří sem:

- Náklady na spotřebovaný drát
- Ostatní náklady na provoz drátové řezačky
- Cena spotřebované energie
- Mzdové náklady na hodinu pracovníka
- Režijní náklady
- Odpisy

### 5.3.2.1 Náklady na spotřebovaný drát

Náklady na spotřebovaný drát vycházejí ze spotřeby drátu za hodinu a ceny drátu za metr. Jelikož výrobci většinou udávají cenu drátu za 1 kg, bylo nutné ceny přepočítat. Průměrná cena spotřeby drátu byla určena z množství odvinutého drátu za určitou dobu, která byla následně přepočítaná na hodinu. V tabulce je uveden přepočet:

Tabulka 4 Náklady na spotřebovaný drát

Typ drátu	Cena celkem za cívku 8kg [Kč]	Délka navinutého drátu [m]	Cena za 1 metr [Kč]	Průměrná cena spotřeby drátu za hodinu [Kč/hod]
<b>drát 0,25 Betterbassone:9</b>	2232	19300	0,1156	77,16
<b>drát 0,25 BFcut-Tx</b>	3097	19300	0,1605	106,12
<b>drát 0,3 Penta Cut-P</b>	2187	12960	0,1688	110,92

### 5.3.2.2 Ostatní náklady na provoz drátové řezačky

Sem patří náklady spojené se spotřebním materiálem potřebným na provoz stroje. Jejich výše je pouze orientační. Nejsou zde uvedeny veškeré položky jako například náklady na pravidelný roční servis stroje, nebo náklady spojené se softwarem. Tabulka 5 obsahuje seznam jednotlivých položek a také přepočet na hodinové náklady.

Tabulka 5 Seznam ostatních nákladů na provoz

Položka	Cena za kus [Kč]	Počet kusů	Cena celkem [Kč]	Životnost [hodiny]	Náklady na hodinu [Kč]
Vodítka	14100	2	28200	5000	5,64
Přivaděče	1275	2	2550	2200	1,16
Rolny	3520	3	10560	2000	5,28
Brzda drátu	2709	1	2709	2500	1,08
Deionizační pryskyřice (50 l)	5100	1	5100	1429	3,57
Ložiska	456	3	1367	6500	0,21
Filtr Fanuc	4980	1	4980	500	9,96
					<b>26,90</b>

$$N_o = 26,90 \text{ Kč/hod}$$

### 5.3.2.3 Cena spotřebované elektrické energie

Cena spotřebované energie je další položkou při stanovení celkových hodinových nákladů stroje. Její výše je stanovena z příkonu stroje a ceny za kWh. V případě aktuálních cen energií byla cena spotřebované vypočítaná podle vzorce (6.2).

$$N_{EE} = P_S * C_{kWh} \quad (5.2)$$

Kde:

$P_S$ ...příkon stroje

$C_{kWh}$ ...cena za kWh

$$N_{EE} = 13 * 3,49 = 45,37 \text{ Kč/hod}$$

#### 5.3.2.4 Mzdové náklady na hodinu pracovníka a režijní náklady

Mzdové náklady na hodinu pracovníka činí veliký podíl z celkových nákladů a mohou být pro výpočet zkrslující. Jejich výše je orientační a pro náš výpočet jsem její výši zvolil na 280 Kč/hod.

$$N_{HM} = 280 \text{ Kč/hod}$$

To samé platí i o režijních nákladech, kam můžeme zařadit náklady na osvětlení, na vytápění, na administrativu, nebo nájem. Jejich výši jsem stanovil na 125 Kč/hod:

$$N_R = 125 \text{ Kč/hod}$$

#### 5.3.2.5 Odpisy na hodinu provozu

Odpisy se na základě legislativy stanoveny na 5 let. Pořizovací cena drátové řezačky byla v prosinci roku 2021: 127 000 € = 3 210 560 Kč. (kurz k 16.12.2021). Roční časový fond stroje byl stanoven na 3120 hodin. Přepočet na odpisů na hodinu se řídil vztahem 5.3.

$$N_{OD} = \frac{P_C}{5 * R_{\check{C}F}} \text{ [Kč/hod]} \quad (5.3)$$

Kde:

$P_C$ ...Pořizovací cena stroje

$R_{\check{C}F}$ ...Roční časový fond

$$N_{OD} = \frac{3210560}{5 * 3120} = 205,8 \text{ Kč/hod}$$

#### 5.3.2.6 Celkové náklady na hodinu provozu

Celkové náklady na hodinu provozu stroje se vypočítají pomocí součtu veškerých dílčích nákladů pomocí vzorce 5.4.

$$N_c = N_{SD} + N_O + N_{EE} + N_{HM} + N_R + N_{OD} \quad (5.4)$$

Kde:

$N_{SD}$ ...Náklady na spotřebovaný drát

$N_O$ ...Ostatní hodinové náklady na provoz drátové řezačky

$N_{EE}$ ...Hodinové náklady na spotřebovanou elektrickou energii

$N_{HM}$ ...Náklady na hodinovou mzdu obsluhy stroje

$N_R$ ...Hodinové režijní náklady

$N_{OD}$ ...Hodinové odpisy stroje

#### 5.4 Stanovení hodinových nákladů pro jednotlivé varianty

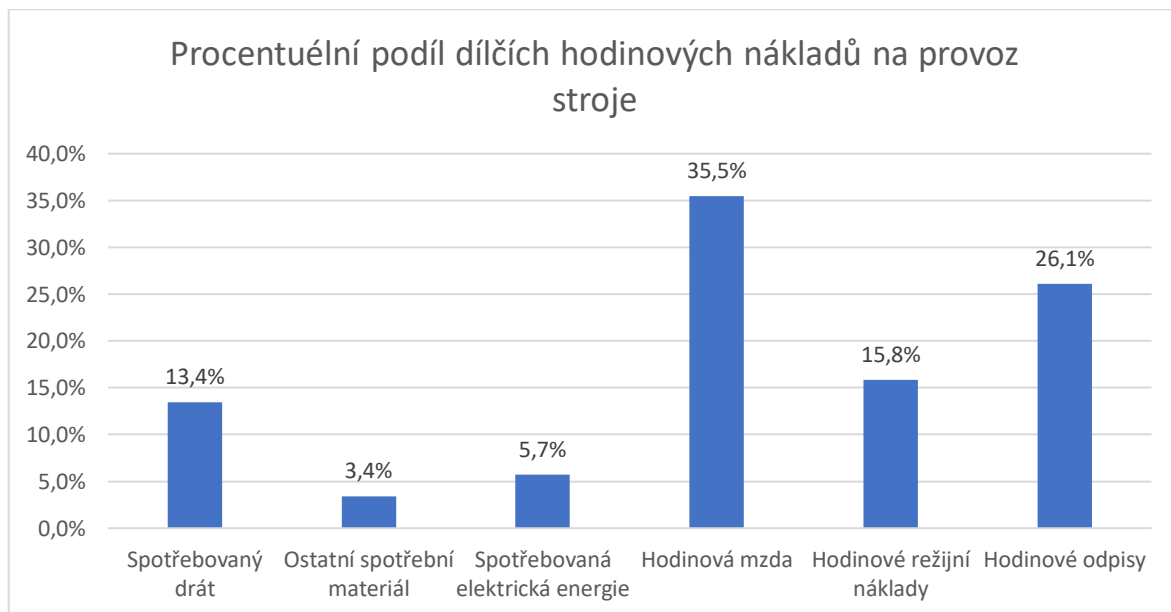
V rámci experimentu jsou jedinou proměnnou náklady na spotřebovaný drát. Když sečteme veškeré ostatní položky podle vzorce 5.4. tak dostaneme základ pro porovnání jednotlivých testovaných variant.

$$N_c = N_{SD} + N_O + N_{EE} + N_{HM} + N_R$$

$$N_c = N_{SD} + 26,90 + 45,37 + 280 + 125 + 205,8$$

$$N_c = N_{SD} + 26,90 + 45,37 + 280 + 125 + 205,8 = 683,1 \text{ Kč/hod}$$

Graf 6 Procentuální podíl dílčích hodinových nákladů na provoz stroje



Pro konkrétní drátové elektrody nakonec byly celkové hodinové náklady vyčíslené dle tabulky 6:



Tabulka 6 Vyčíslení celkových průměrných hodinových nákladů pro jednotlivé drátové elektrody

Typ drátu	Průměrná cena za hodinu [Kč/hod]	Další náklady na hodinu provozu stroje [Kč/hod]	Celkové náklady na hodinu [Kč/hod]
<b>drát 0,25 Betterbassone:9</b>	77,16	683,1	<b>760,26</b>
<b>drát 0,25 BFcut-Tx</b>	106,12	683,1	<b>789,22</b>
<b>drát 0,3 Penta Cut-P</b>	110,92	683,1	<b>794,02</b>

## 5.5 Stanovení nákladů pro jednotlivé výšky řezu

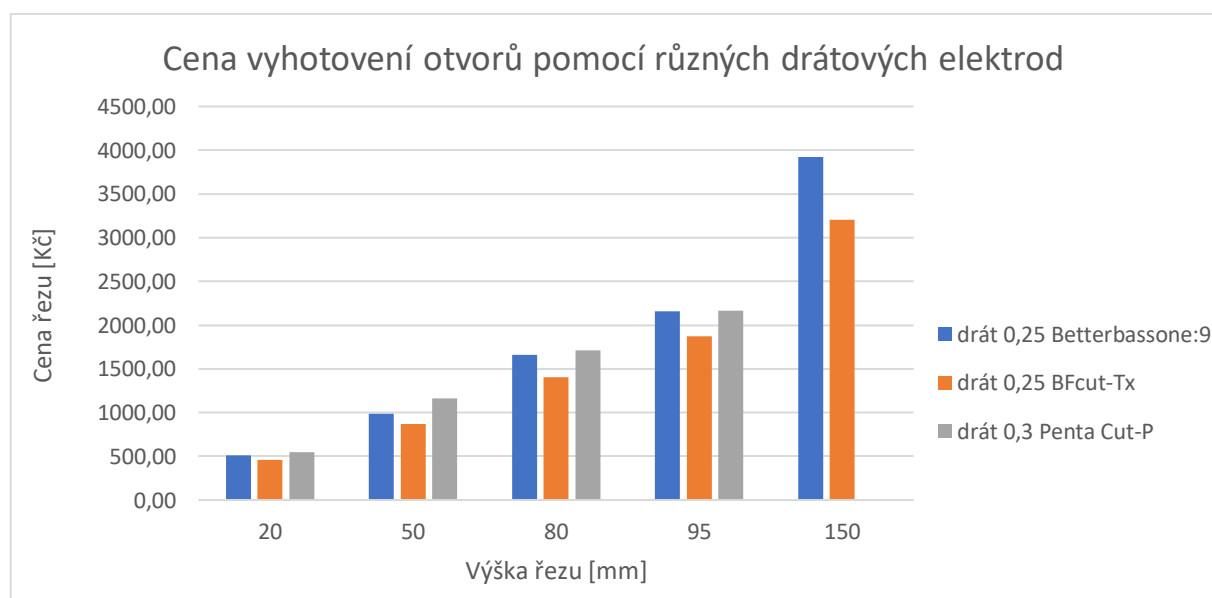
Celkové náklady na provoz pro konkrétní výšky jsou uvedeny v tabulce 7. Graficky je tato závislost vyobrazena v grafu 7.

Tabulka 7 Celkové náklady na provoz drátové řezačky pro konkrétní výšky

<b>drát 0,25 Betterbassone:9</b>						
Výška řezu [mm]	Doba řezu [min]	Spotřeba drátu [m]	Cena za 1 metr [Kč]	Cena spotřebovaného drátu [Kč]	Cena dalších nákladů na hodinu provozu stroje [Kč]	Cena celkem [Kč]
20	40	460	0,11565	53,20	455,40	<b>508,60</b>
50	78	865		100,04	888,03	<b>988,07</b>
80	131	1452		167,92	1491,44	<b>1659,36</b>
95	171	1848		213,72	1946,84	<b>2160,55</b>
150	310	3391		392,16	3529,35	<b>3921,51</b>
<b>drát 0,25 BFcut-Tx</b>						
Výška řezu [mm]	Doba řezu [min]	Spotřeba drátu [m]	Cena za 1 metr [Kč]	Cena spotřebovaného drátu [Kč]	Cena dalších nákladů na hodinu provozu stroje [Kč]	Cena celkem [Kč]
20	35	402	0,16040	64,48	398,48	<b>462,96</b>
50	66	732		117,41	751,41	<b>868,82</b>
80	107	1172		187,99	1218,20	<b>1406,18</b>
95	143	1510		242,20	1628,06	<b>1870,26</b>
150	244	2668		427,95	2777,94	<b>3205,89</b>

drát 0,3 Penta Cut-P						
Výška řezu [mm]	Doba řezu [min]	Spotřeba drátu [m]	Cena za 1 metr [Kč]	Cena spotřebovaného drátu [Kč]	Cena dalších nákladů na hodinu provozu stroje [Kč]	Cena celkem [Kč]
20	42	402	0,16875	67,84	478,17	<b>546,01</b>
50	91	732		123,53	1036,04	<b>1159,56</b>
80	133	1172		197,78	1514,21	<b>1711,98</b>
95	168	1510		254,81	1912,68	<b>2167,49</b>

Z tabulky 7 je na první pohled patrné, že pro veškeré výšky řezů se nejvíce vyplatí aplikace drátu 0,25 BFcut-Tx. I přes to, že jeho pořizovací cena je oproti ostatním drátovým elektrodám vyšší, tak díky větší rychlosti obrábění se zkrátí čas obrábění a tím dojde k úspoře ostatních hodinových nákladů. Cena drátu se totiž podílí na celkových hodinových nákladech pouze v rozmezí 12-14 %. Zvýšená rychlost obrábění umožní zvýšení výrobní kapacity stroje. V podniku tak budou schopni realizovat větší objem zakázek. Při bezobslužném stroje, avšak dojde k anulování hodinových nákladů na mzdu a podíl ceny drátové elektrody na celkových nákladech se výrazně zvětší. V tomto případě se více vyplatí aplikovat drát Betterbrassone:9 vzhledem k jeho menší ceně. Výsledky drátu Penta Cut-P ukázaly na jeho nevhodnost pro výšky řezu do 100 mm. Ačkoliv byla jeho pořizovací cena za 8 kg cívku ze všech 3 drátů nejnižší. Kvůli většímu průměru drátu bylo na cívce navinuto o 6300 metrů méně. Vzhledem k této okolnosti se cena za 1 metr stala nejnákladnějším. S ohledem na velmi podobnou rychlost řezu s drátem 0,25 betterbrassone:9 nemá jeho využití do cca 100 mm výšky význam. Jelikož tento drát odebírá větší objem materiálu dochází také při jeho použití k nutnosti častější výměny filtru.



Graf 7 Cena vyhotovení otvorů pomocí různých drátových elektrod

## 6 Rozměrová kontrola vzorkových dutin

Abychom komplexně ověřili funkčnost drátové elektrody, tak bylo zapotřebí provést rozměrovou kontrolu vyříznutých dutin. Ta byla provedena pomocí souřadnicového měřicího stroje Mitutoyo CRYSTA-Apex S 574.



Obrázek 20 CMM měřicí stroj Mitutoyo CRYSTA-Apex S 574 (30)

Měření bylo provedeno na základě porovnání CAD modelu vzorkového polotovaru s obrobeným polotovarem. Tento systém měření zohledňuje jak rozměrovou, tak polohovou složku vyhodnocení. Pro účely experimentu bylo důležité zohlednit pouze rozměrovou přesnost vyříznuté kontury. Poloha otvorů vůči počátku nebyla relevantním parametrem.

Vyhodnocení bylo realizováno v každé dutině v úrovni 10 mm pod horní plochou polotovaru. V jednotlivých dutinách byly snímány 4 body, které byly umístěny uprostřed stěny dutého kvádrů viz obrázky 19-21.

## 6.1 Rozměrové vyhodnocení dutiny vyříznuté drátem 0,25 Betterbrassone:9

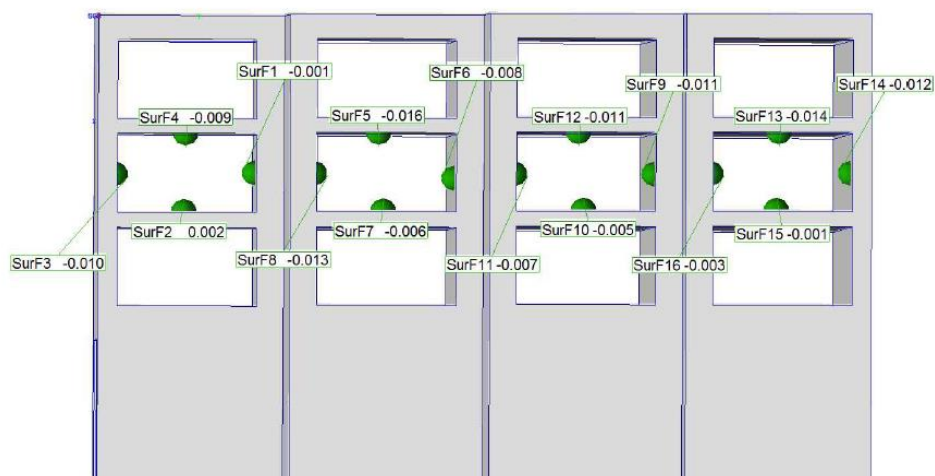


Obrázek 21 CMM výsledky Betterbrassone:9

Tabulka 8 Rozměrové vyhodnocení Betterbrassone:9

<b>0,25 Betterbrassone:9</b>	
Poloha snímaného bodu	Absolutní odchylka od CAD modelu [mm]
1.	0,001
2.	0,011
3.	0,007
4.	0,003
5.	0,002
6.	0,016
7.	0,008
8.	0,008
9.	0,005
10.	0,015
11.	0,006
12.	0,009
13.	0,005
14.	0,005
15.	0,003
16.	0,007
Aritmetický průměr [mm]	<b>0,00694</b>
Směrodatná odchylka [mm]	<b>0,00427</b>

## 6.2 Rozměrové vyhodnocení dutiny vyříznuté drátem 0,25 BFcut-Tx

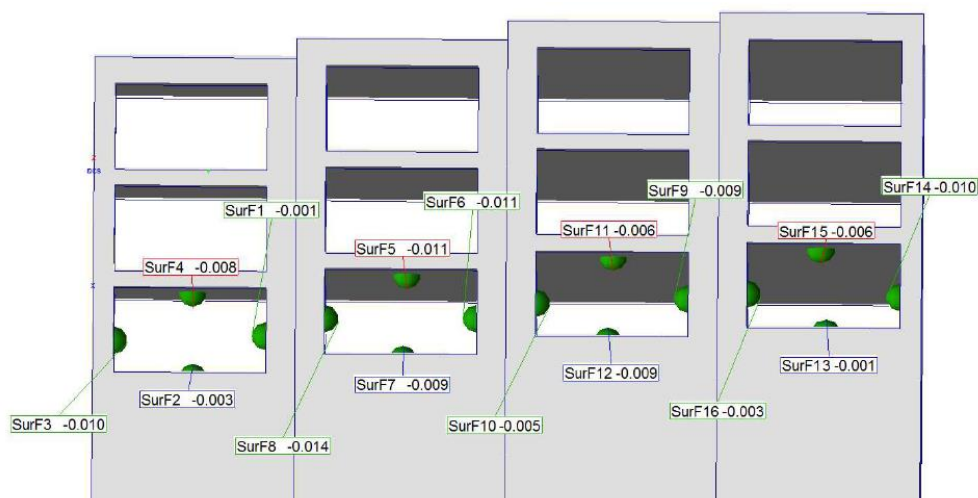


Obrázek 22 CMM výsledky BFcut-Tx

Tabulka 9 Rozměrové vyhodnocení BFcut-Tx

<b>0,25 BFcut-Tx</b>	
Poloha snímaného bodu	Absolutní odchylka od CAD modelu [mm]
1.	0,001
2.	0,002
3.	0,010
4.	0,009
5.	0,016
6.	0,008
7.	0,006
8.	0,013
9.	0,011
10.	0,005
11.	0,007
12.	0,011
13.	0,014
14.	0,012
15.	0,001
16.	0,003
Aritmetický průměr [mm]	<b>0,00806</b>
Směrodatná odchylka [mm]	<b>0,00474</b>

### 6.3 Rozměrové vyhodnocení dutiny vyříznuté drátem 0,3 Penta CUT-P



Obrázek 23 CMM výsledky Penta Cut-P

Tabulka 10 Rozměrové vyhodnocení Penta Cut-P

<b>0,3 Penta Cut-P</b>	
Poloha snímaného bodu	Absolutní odchylka od CAD modelu [mm]
1.	0,001
2.	0,003
3.	0,010
4.	0,008
5.	0,011
6.	0,011
7.	0,009
8.	0,014
9.	0,009
10.	0,005
11.	0,006
12.	0,009
13.	0,001
14.	0,010
15.	0,006
16.	0,003
Aritmetický průměr [mm]	<b>0,00725</b>
Směrodatná odchylka [mm]	<b>0,00384</b>

## 6.4 Rozměrové vyhodnocení diskuse

Jak je patrné z tabulek 7-9, Zprůměrované absolutní odchylky od CAD dosahovaly hodnot od 0,007 do 0,008 mm. Rozdíly v hodnotách odchylek od CAD modelu se mezi jednotlivými drátovými elektrodami téměř nelišili. Vzhledem k tomu, že jsme zvolili technologii na dva řezy viz kapitola 4.4.1, tak bylo překvapivé vidět takto přesné výsledky. Zprůměrované odchylky se mezi jednotlivými drátovými elektrodami různí maximálně o 0,001mm (tabulka 11). Takto malé odchylky mohly být způsobeny nepřesností měřícího technologie a můžeme tak prohlásit, že jsou všechny drátové elektrody schopny obrábět v požadovaných tolerancích.

Tabulka 11 Přehled odchylek od CAD modelů

	<b>0,25 Betterbrassone:9</b>	<b>0,25 BFcut-Tx</b>	<b>0,3 Penta Cut-P</b>
Aritmetický průměr absolutní odchylky od CAD modelu [mm]	<b>0,00694</b>	<b>0,00806</b>	<b>0,00725</b>
Směrodatná odchylka [mm]	<b>0,00427</b>	<b>0,00474</b>	<b>0,00384</b>

## 7 Závěr

V úvodních kapitolách se práce komplexně zaměřuje na problematiku EDM obrábění. Konkrétně se zabývá kategorizací EDM, principem elektroeroze, charakterem elektroerozivních výbojů, povrchovou vrstvou po EDM a podrobně popisuje technologii drátového řezání. Hlavním přínosem technologie WEDM je schopnost efektivně obrábět těžko obrobitelné vodivé materiály s vysokou tvarovou a rozměrovou přesností.

Úkolem experimentu bylo porovnat vybrané drátové elektrody v závislosti na parametrech obrábění. Z pohledu doby řezu se osvědčila povlakovaná drátová elektroda BFcut-Tx. Její výsledky byly vůči ostatním dvěma elektrodám značně kratší. Při výšce řezu 150 mm obrobila definovanou konturu o 22 % rychleji než druhá nejrychlejší drátová elektroda Betterbrassone:9. V porovnání s ostatními si neefektivně vedla drátová elektroda 0,3 Penta Cut-P, což bylo pravděpodobně způsobeno jejím větším průměrem. Větší průměr s sebou přináší nutnost odebrání většího objemu materiálu, čímž se zpomaluje rychlost řezu.

Další kategorií experimentu bylo provést technicko-ekonomické zhodnocení konkrétních drátových elektrod. Po vyčíslení jednotlivých položek celkových hodinových nákladů na provoz stroje, bylo zjištěno, že náklady na spotřebovaný drát na hodinu stroje se na celkových hodinových nákladech podílejí jen ze 14 %. Významnější položkou jsou náklady na hodinovou mzdu obsluhy 35,5 %, nebo hodinové odpisy 26,1 %. S touto informací bylo nutné pracovat při volbě drátové elektrody pro konkrétní aplikace.

V případě velkého množství zakázek, kdy je nutné práci rychle odbavovat je vhodné aplikovat drátovou elektrodu BFcut-Tx, jelikož zvládne stejnou práci obrobit o 22 % rychleji. Při této strategii totiž cenu obrobeného dílce především definuje čas strávený jeho výrobou a náklady na spotřebovaný drát zde hrají jenom minoritní roli.

V případech bezobslužného provozu, kdy není potřeba u drátu fyzicky být (anulují se náklady na hodinovou mzdu) se podíl složky nákladů na spotřebovaný drát markantně zvýší na necelých 21 %. Právě v těchto případech se z ekonomického hlediska vyplatí využít drátovou elektrodu Betterbrassone:9, jejíž náklady na metr odvinutého drátu činí 0,11 Kč/m oproti 0,16 Kč/m u BFcut-Tx. Drátová elektroda Penta Cut-P o průměru 0,3 mm se z ekonomického, ani z výkonnostního hlediska při řezech do výšky řezu 100 mm neosvědčila. Z toho důvodu bych ji pro tyto aplikace nedoporučoval.

V závěru experimentální části bylo provedeno kontrolní měření obrobených vzorkových dutin pomocí souřadnicového měřicího stroje Mitutoyo CRYSTA-Apex S 574. Cílem měření bylo zjistit, zda jsme pomocí vybraných drátových elektrod schopni obrábět v požadované rozměrové toleranci. Zprůměrované absolutní odchylky od CAD modelu



nabývaly hodnot od 0,007 do 0,008 mm. Jednotlivé drátové elektrody se mezi sebou různily maximálně od 0,001 mm, z čehož můžeme usoudit, že jejich aplikace je z hlediska přesnosti výroby irelevantní.

Metodika experimentu byla nastavena pouze pro potřeby firmy Zach-nástrojárna s.r.o. Výsledky a závěry plynoucí z testu nelze aplikovat v obecném pojetí.

## 8 Seznam použitých zdrojů

1. **Kocman Karel, Prokop Jaroslav Prokop.** *Nekonvenční metody obrábění.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství : Akademické nakladatelství CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
2. **Jaroslav, Barcal.** *Nekonvenční metody obrábění.* Praha : České vysoké učení technické, 1989.
3. *Progressívne technológie. Edícia vedeckej a odbornej literatúry.* . **MAŇKOVÁ, Ildikó.** ISBN 80-7099-430-4, Košice: Viena, 2000.
4. **Morávek, Rudolf.** *Nekonvenční metody obrábění.* Plzeň: Západočeská univerzita : Tiskové středisko ZČU, 1999. ISBN 80-7082-518-9.
5. **Jiří, Ing. Hodač.** Elektroerozivní obrábění jako metoda výroby zkušebních těles pro průmyslové provozy a kalibraci. *www.allforpower.cz.* [Online] 26. 12. 2018. <http://old.allforpower.cz/clanek/elektroerozivni-obrabeni-jako-metoda-vyroby-zkusebnich-teles-pro-prumyslove-provozy-a-kalibraci/>.
6. **Petr, Poslušný.** Elektroerozivní obrábění. *mmspektrum.* [Online] 2006. <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-obrabeni>.
7. **Oelheld.** Important facts about spark erosion. *www.oelheld.com.* [Online] [https://www.oelheld.com/fileadmin/content/Broschueren/EN/Important\\_facts\\_about\\_spark\\_erosion\\_-BR-\\_\\_EN\\_.pdf](https://www.oelheld.com/fileadmin/content/Broschueren/EN/Important_facts_about_spark_erosion_-BR-__EN_.pdf).
8. *Effect of polarity on the machining characteristics and surface generation in EDM,*. **Ayesha Begum, D Ramana Reddy,**. ISSN 2214-7853, 2017.
9. **Fritz Klocke, Max Schwade, David Welling.** Multi-scale directed surface topography machined by electro discharge machining in combination with plasma electrolytic conversion for improved osseointegration. *Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems.* 2013.
10. **Klocke F., Welling F., Dieckmann J.** Titanium parts for medical sector by wire-EDM. místo neznámé : Proceedings of the 1st International Conference on Design and Processes for, 2012.
11. *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE část 1.* **Tichá, Šárka.** Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2004.
12. **www.vdi3400.com.** Making by EDM or Laser or Sandblasting or Etching on mold cavity surface to be achieved. [Online] <http://www.vdi3400.com/>.
13. *Investigation of wire electrical discharge machining of thin cross-sections and compliant mechanisms.* **Scott F. Miller, Chen-C. Kao, Albert J. Shih, Jun Qu.** ISSN 0890-6955, místo neznámé : International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005.
14. **Ing. Jaroslav Řasa, CSc., Ing. Zuzana Kerečaninová.** Nekonvenční metody obrábění. [Online] 14. 05 2008. <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni>.

15. **www.factoryautomation.cz.** Elektroerozivní drátové řezání. [Online] 2020. <https://factoryautomation.cz/elektroerozivni-dratove-rezani-poznejte-princip-edm-stroju/#>.
16. **www.gfsm.com.** EDM wire cutting. [Online] <https://www.gfms.com/cs-cz/machines/edm/wire-cutting.html>.
17. **www.manufacturingguide.com.** Wire EDM. [Online] <https://www.manufacturingguide.com/en/wire-edm>.
18. **thinkfilter.** Water Filtration for Wire-cut EDM. <https://innovationfilter.com> . [Online] 26. 12 2023. <https://innovationfilter.com/blog/water-filtration-edm-wire-cutting/>.
19. *Recent Developments in Wire Electrodes for High Performance WEDM.* **Jatinder Kapoor, Dr. Sehijpal Singh, Dr. Jaimal Singh Khamba.** London, UK : Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol II , 2010.
20. **www.camtechedm.com.** the-wire-used-in-edm-machines-sizes-and-types. *Camtechedm.* [Online] <https://www.camtechedm.com/the-wire-used-in-edm-machines-sizes-and-types/>.
21. **Guitrau, E. Bud.** EDM Wire Selection. [www.novotec-edm.com](http://www.novotec-edm.com). [Online] <https://www.novotec-edm.com/wire-selection>.
22. *The effect of electrode material on machinability in wire electro-discharge machining.* **J. Prohaszka, A.G Mamalis, N.M Vaxevanidis.** ISSN 0924-0136, místo neznámé : Journal of Materials Processing Technology,, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00024-1).
23. **Camtechedm .** Dielectric Fluid For Wire EDM: What Is It and What Does It Do? [Online] <https://www.camtechedm.com/dielectric-fluid-for-wire-edm-what-is-it-and-what-does-it-do/>.
24. *Effect of Various Dielectric Fluids on Performance od EDM: A Review.* **C.R. Sanghani, G.D. Acharya.** ISSN: 2347-9965, místo neznámé : Mechanical Engineering Department, School of Engineering, R. K. University, Rajkot, Gujarat, India, 2016.
25. **J. Sai Ram, S. Jeavudeen, P.A. Mouda et al.** *The role of various dielectrics used in EDM process and their environmental, health, and.* místo neznámé : Materials today. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.137..>
26. **Penta-EDM.** FANUC ROBOCUT  $\alpha$ -C600iC. [Online] <https://penta-edm.cz/stroj/fanuc-robocut-%ce%b1-c600ic/>.
27. **Bedra.com.** BETTERBRASS ONE.9. [Online] <https://www.bedra.com/en/products/bedraedm/betterbrass/>.
28. **penta-edm.cz.** Řezací dráty. [Online] <https://penta-edm.cz/stroj/rezaci-draty/>.
29. —. Novinka: Drát Penta Cut-P. [Online] <https://penta-edm.cz/drat-penta-cut-p/>.
30. **shop.mitutoyo.eu.** CRYSTA-Apex V574 CNC CMM. [Online] [https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/CRYSTA-APEX%20S900%20Series/CRYSTA-Apex%20V574%20CNC%20CMM/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/191-126/index.xhtml?jsessionid=F7024076A746728FEB77C1685CEF79E6](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/mitutoyo/CRYSTA-APEX%20S900%20Series/CRYSTA-Apex%20V574%20CNC%20CMM/$catalogue/mitutoyoData/PR/191-126/index.xhtml?jsessionid=F7024076A746728FEB77C1685CEF79E6).

## 9 Příloha 1 – Seřizovací list frézování polotovaru

### 24022\_POLOTOVAR *OP1*

VÝROBA POLOTOVARU NA DIPLOMKU

POLOTOVAR: MAX 152x137x103,5

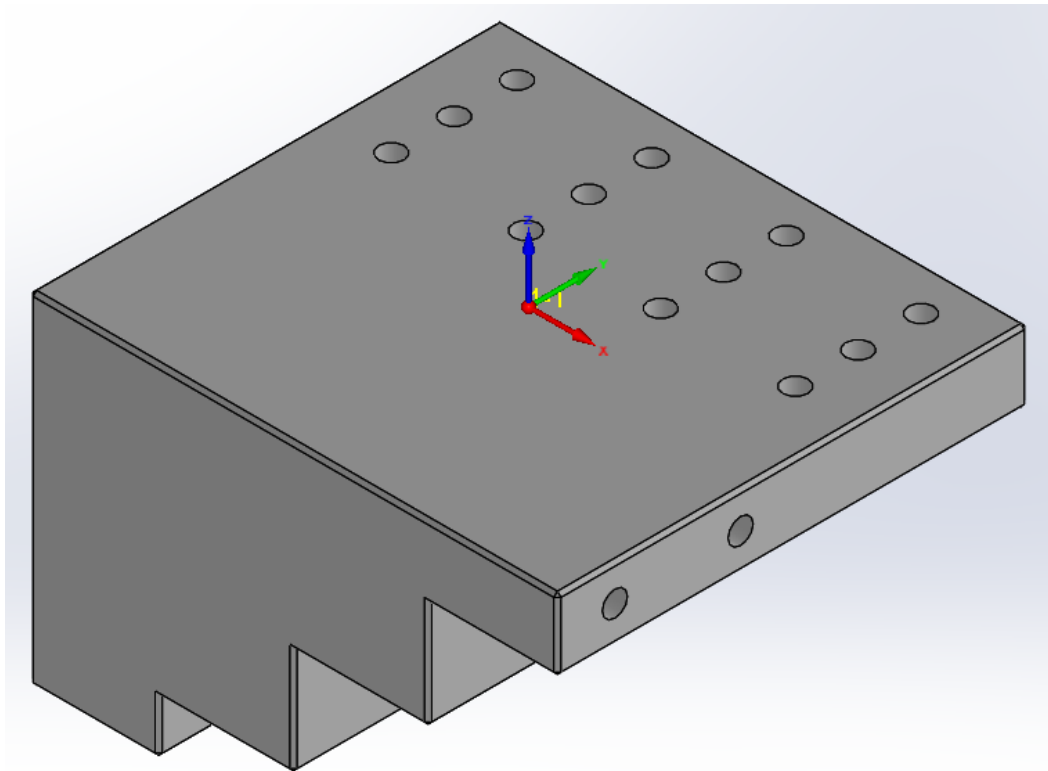
MATERIÁL: 1.2343

KUSŮ: 1

STROJ: MCV 754/1016

PROG1\_24022\_POLOT\_STRANA\_1

XY= STŘED KUSU



Z= HORNÍ HOTOVÁ PLOCHA (MAX 1mm V MATERIÁLU)

6 ;===== TABULKA NASTROJU =====

7 ;T1 - Toroidni freza D32/R2.5(PM-TECH-D32R2.5-OHL-115) Zmin=-96.

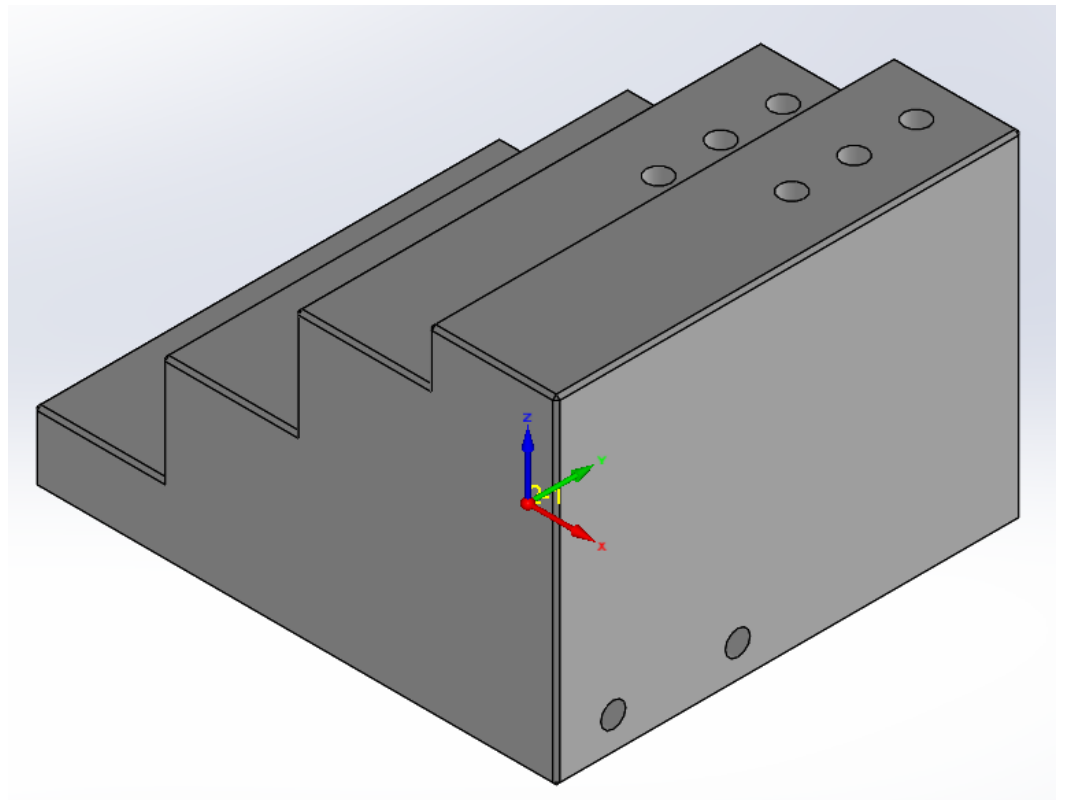
8 ;T2 - Valcova freza D16(4016-SCT-SL-42-OHL-48-S) Zmin=0.

9 ;T3 - Valcova freza D19.98(4020-SURE-SL-100-OHL-105) Zmin=-96.

10 ;T4 - Srazec D8/R142(NVRT-D8-142°-OHL-35) Zmin=-1.033  
 11 ;T5 - Vrtak D7/R135(VRT D7-HPD) Zmin=-55.  
 12 ;T6 - Srazec D6/R90(SRAZEC-STE-D6-90°-OHL-35) Zmin=-2.  
 13 ;T7 - Kuzelova freza D18.9/R0.4(JONGEN-OHL-52-90°) Zmin=-4.5  
 14 ;=====

## PROG2\_24022\_POLOT\_SCHODY

XY= STŘED KUSU  
 Z= DOLNÍ HOTOVÁ PLOCHA



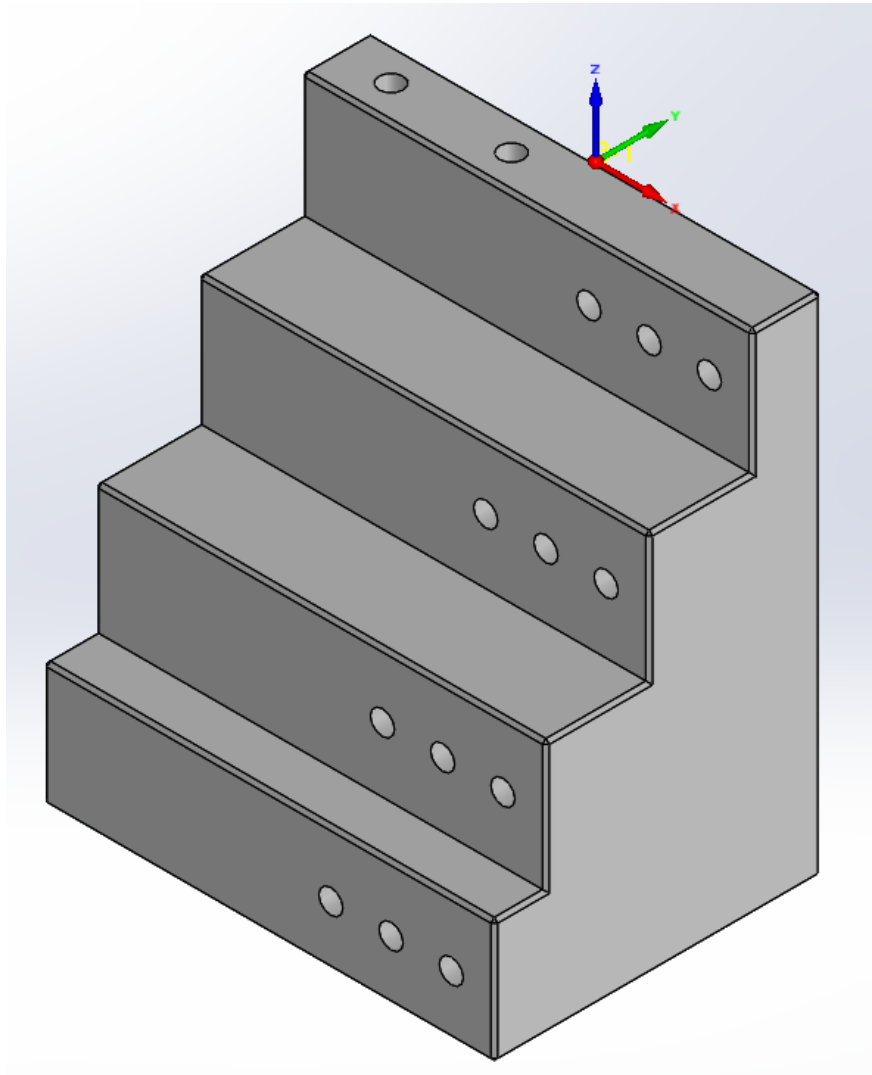
6 ;===== TABULKA NASTROJU =====  
 7 ;T8 - Valcova freza D8(4008-SCT-SL-25-OHL-35) Zmin=0.  
 8 ;T1 - Toroidni freza D32/R2.5(PM-TECH-D32R2.5-OHL-115) Zmin=0.  
 9 ;T9 - Valcova freza D19.7(4019.7-SCT-SL-52-OHL-58) Zmin=0.  
 10 ;T2 - Valcova freza D16(4016-SCT-SL-42-OHL-48-S) Zmin=0.  
 11 ;T4 - Srazec D8/R142(NVRT-D8-142°-OHL-35) Zmin=0.  
 12 ;T5 - Vrtak D7/R135(VRT D7-HPD) Zmin=0.  
 13 ;T6 - Srazec D6/R90(SRAZEC-STE-D6-90°-OHL-35) Zmin=0.  
 14 ;T7 - Kuzelova freza D18.9/R0.4(JONGEN-OHL-52-90°) Zmin=0.  
 15 ;=====

## PROG3\_24022\_POLOT\_BOK\_1

X= STŘED KUSU

Y= ZADNÍ PLOCHA

Z= HORNÍ HOTOVÁ PLOCHA



6 ;===== TABULKA NASTROJU =====

7 ;T4 - Srazec D8/R142(NVRT-D8-142°-OHL-35) Zmin=-1.033

8 ;T5 - Vrtak D7/R135(VRT D7-HPD) Zmin=-55.

9 ;T10 - Vrtak D7/R118(VRT D7-HSS) Zmin=-100.

10 ;T6 - Srazec D6/R90(SRAZEC-STE-D6-90°-OHL-35) Zmin=-2.

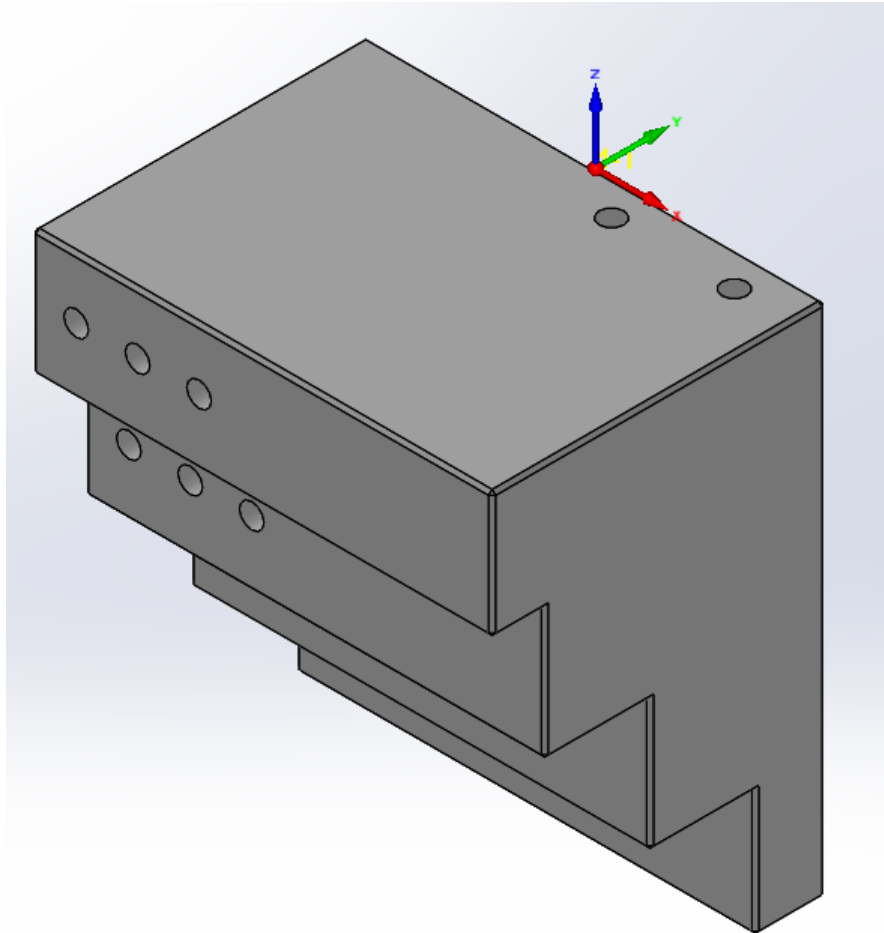
11 ;=====

## PROG4\_24022\_POLOT\_BOK\_2

X= STŘED KUSU

Y= ZADNÍ PLOCHA

Z= HORNÍ HOTOVÁ PLOCHA



6 ;===== TABULKA NASTROJU =====

7 ;T4 - Srazec D8/R142(NVRT-D8-142°-OHL-35) Zmin=-1.033

8 ;T5 - Vrtak D7/R135(VRT D7-HPD) Zmin=-55.

9 ;T6 - Srazec D6/R90(SRAZEC-STE-D6-90°-OHL-35) Zmin=-2.

10 ;=====