



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## ŘEZÁNÍ MĚŘÍCÍCH TROJDOTEKŮ Z TVRDOKOVU NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIÍ ED

CUTTING OF MEASURING HARD-METAL TRIPLE CONTACTS BY ED TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

PAVEL SMITAL

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Pavel Smital

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Řezání měřících trojdoteků z tvrdokovu nekonvenční technologií ED**

v anglickém jazyce:

### **Cutting of measuring hard-metal triple contacts by ED technology**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Oblast aplikace výrobní technologie řezání ED nabízí celou řadu výhod. Největší výhodou této metody je skutečnost, že ji lze použít tam, kde všechny ostatní selhávají, a to zejména při obrábění problematických tvarů, kalených materiálů a v neposlední řadě i velmi přesných rozměrů.

Cílem této bakalářské práce je hlubší seznámení s nekonvenční technologií ED se zaměřením na snížení zmetkovitosti dílu při výrobě.

Cíle bakalářské práce:

1. Popis problematiky nekonvenční metody obrábění : elektroerozivní řezání drátkem.
2. Řešení problému - Snížení zmetkovitosti dílu při ED řezání.
3. Vyhodnocení řešeného problému.

Seznam odborné literatury:

MAŇKOVÁ, I. Progresívne technológie.1. vydanie. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-7099-430-4.  
BARCAL J. Nekonvenční metody obrábění. Vydavatelství ČVUT, skripta ČVUT, Praha, 1989.  
KOCMAN, K. Speciální technologie obrábění. 1. vyd., Brno: PC-DIR Real, 1998.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 25.1.2011

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Práce pojednává o nekonvenčních metodách obrábění zaměřená především na elektroerozivní drátové řezání. V úvodu jsou popsány základní principy a podstata elektroerozivního obrábění. Praktická část je zaměřena na řešení stávajícího problému – snížení zmetkovitosti měřících trojdoteků při výrobě ve firmě Kovo Jančo.

**Klíčová slova**

Elektroerozivní obrábění, nekonvenční technologie, EDM, elektroerozivní drátové řezání, WEDM.

**ABSTRACT**

This work deals with unconventional machining methods focused primarily on the wire EDM cutting. The introduction describes the basic principles and essence of electrical discharge machining. The practical part is focused on solving the current problem - reducing scrap of measuring triple contacts in the production company Kovo Jančo.

**Key words**

Electrical discharge machining, unconventional technologies, EDM, wire electrical discharge machining, WEDM.

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

SMITAL, Pavel. *Řezání měřících trojdoteků z tvrdokovu nekonvenční technologií ED*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 43 s. příloh. 6. Vedoucí práce. Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Řezání měřících trojdoteků z tvrdokovu nekonvenční technologií ED vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Jméno Příjmení bakaláře

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto **Ing. Jaromíru Dvořákovi, Ph.D.** za profesionální vedení a cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Děkuji dále **Ing. Radoslavu Holubovi** a zaměstnancům společnosti **Kovo Jančo** za praktické rady při řešení a vypracovávání bakalářské práce.

**Obsah**

ÚVOD.....	7
1. NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE.....	8
1.1 Vysvětlení pojmu nekonvenční technologie obrábění .....	8
1.2 Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění .....	8
1.3 Současný stav a perspektivy NMO .....	9
1.4 Historie elektroerozivního obrábění .....	9
1.5 Princip elektroeroze .....	10
1.5.1 Jednotlivé fáze výboje.....	11
1.5.2 Pracovní podmínky a charakteristika výbojů .....	13
1.6 Charakter impulzů generátoru .....	15
1.7 Zdroje elektrické energie (generátory) .....	16
1.7.1 Závislé generátory (RC a RLC).....	16
1.7.2 Nezávislé (pulsní) generátory .....	17
1.8 Nástrojové elektrody .....	18
1.8.1 Regulace přísuvu nástrojové elektrody .....	19
1.9 Kapalně pracovní prostředí (dielektrikum) .....	20
1.10 Kvalita opracovaného povrchu .....	22
1.11 Technologické využití elektroeroze .....	23
2. ELEKTROEROZIVNÍ DRÁTOVÉ ŘEZÁNÍ (WEDM) .....	24
2.1 Princip metody .....	24
2.1.1 Možnosti WEDM .....	24
2.2 Pracovní prostředí (dielektrikum).....	26
2.3 Drátová elektroda .....	26
3. PRAKTICKÁ ČÁST .....	30
3.1 Seznámení s firmou Kovo Jančo .....	30
3.1.1 Strojní vybavení .....	30
3.2 Použití měřících trojdoteků .....	31
3.3 Popis problému při výrobě měřících trojdoteků .....	32
3.4 Technologičnost konstrukce trojdoteku.....	33
3.5 Řešení problému při výrobě.....	34
3.6 Technologický postup výroby.....	36
ZÁVĚR.....	38
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	39
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	41
SEZNAM PŘÍLOH.....	43

## ÚVOD

Hlavními důvody stále častějšího zavádění nekonvenčních technologií do průmyslové výroby jsou stále rostoucí požadavky na zvýšení produktivity práce a snaha ke zvýšení produktivity v předzhotovujícím a ve zhotovujícím procesu strojírenské výroby, které vyžadují nejen intenzivní zdokonalování klasické výrobní technologie, ale i využívání nových poznatků vědy a výzkumu.

Aplikace nekonvenčních metod obrábění se v průmyslově vyspělých zemích stále více uplatňují při řešení mnoha výrobních problémů, které se dají jen velmi obtížně zvládnout konvenční technikou. V některých případech se nekonvenční technika stává nezbytným a jediným prostředkem k překonání jak technických, tak i ekonomických problémů, které vznikají při výrobě z těžko obrobitelných materiálů (slinuté karbidy, kalené oceli atd.).

Aktuálním trendem v oblasti průmyslu je využívání tzv. progresivních či nekonvenčních technologií, které využívají chemického, mechanického či elektrického principu. Během druhé světové války došlo k prudkému rozvoji těchto metod na základě řešení konstrukčních problémů v leteckém a kosmonautickém průmyslu při zpracovávání těžce obrobitelných materiálů.

Elektroerozivní drátové řezání (WEDM) je již dlouhá léta v praxi využívanou metodou. Tato technologie způsobila obrovský posun ve výrobě zejména vstříkovacích forem na plasty, při výrobě střížných a lisovacích nástrojů. Rychlý a strmý nárůst používání této technologie, je brzděn pouze jediným limitujícím faktorem, kterým je nutnost elektrické vodivosti obráběné součásti.

Tato technologie zaznamenala velký posun v oblasti přesného obrábění vodivých materiálů a přinesla s sebou mnoho výhod. Jednou z velkých předností a výhod této technologie je skutečnost, že jako řezný nástroj je využíván postupně odvíjející se drát, který může odebírat materiál v každém směru a nedochází ke změně jeho geometrie, jak u konvenčních metod. Mezi další výhody patří zvýšení efektivnosti práce a možnost řezání velmi složitých tvarů z těžko obrobitelných materiálů.

Cílem projektu je úvodní rešeršní část zaměřit na nekonvenční metody obrábění a jejich problematiku a blíže se seznámit s principem elektroerozivního obrábění a elektroerozivního drátového řezání (WEDM). Tyto technologie patří v dnešní době k nejrozšířenějším metodám ve výrobě přesných nástrojů.

Cílem praktické části projektu je bližší seznámení s problematikou výroby měřících trojdoteků a snížením zmetkovitosti výroby této součásti.

## 1. NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE

Vzhledem k prudkému rozvoji a širokému použití těchto technologií se v této kapitole okrajově seznámíme s nekonvenčními technologiemi, jejich rozdělením a principem.

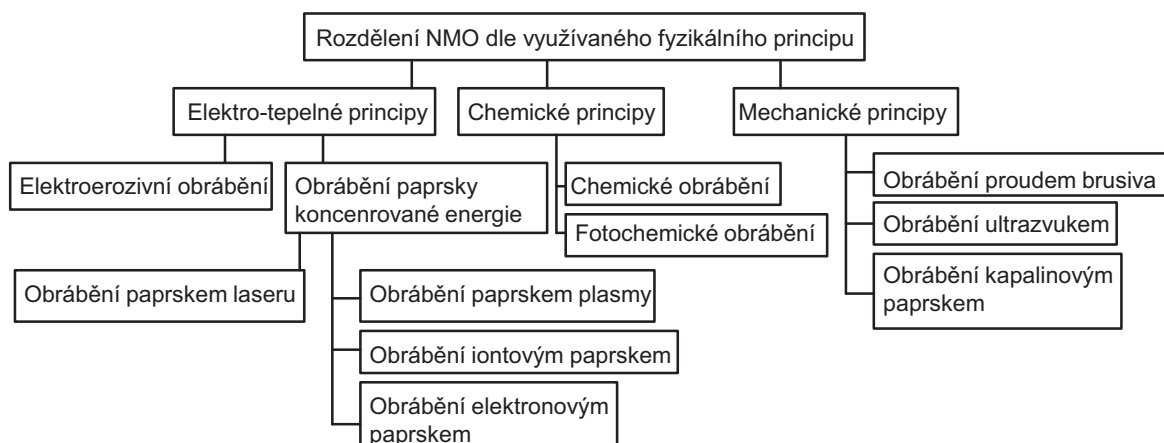
### 1.1 Vysvětlení pojmu nekonvenční technologie obrábění

Pod označení nekonvenční metody obrábění (dále jen NMO) zahrnujeme ty způsoby obrábění, které jsou založeny na využití mechanického, elektrického nebo chemického principu úběru materiálu. Jedná se většinou o bezsilové působení nástroje na obráběný materiál, bez vzniku klasických třísek, které známe z obrábění reznými nástroji [2].

### 1.2 Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Jednotlivé NMO se odlišují zejména dle fyzikálních účinků použitých při obrábění. Na Obr. 1 je rámcové rozdělení NMO na základě využívaného principu nebo způsobu využití energie:

- 1) Oddělování materiálu mechanickým účinkem: mechanické (abrazivní) metody obrábění jsou založeny na stimulaci abrazivních nebo erozivních účinků vhodných látek, např. brusiv a kapalin.
  - Obrábění ultrazvukem (USM – Ultrasonic Machining)
  - Obrábění proudem brusiva (AJM – Abrasive Jet Machining)
  - Obrábění kapalinovým paprskem (WJM – Water Jet Machining)
- 2) Oddělování materiálu chemickým účinkem: Podstatou NMO s chemickým principem je přímé využití chemických reakcí pro obrábění.
  - Chemické obrábění (CM – Chemical Machining)
  - Fotochemické obrábění (PCM – Photochemical Machining)
- 3) Oddělování materiálu elektro-tepelným účinkem: NMO s elektro-tepelným principem využívají převážně teplo pro řízené odtavování materiálu.
  - Elektroerozivní obrábění (EDM – Electrodischarge Machining)
  - Obrábění paprskem laseru (LBM – Laser Beam Machinig)
  - Obrábění elektronovým paprskem (EBM – Electron Beam Machinig)
  - Obrábění iontovým paprskem (IBM – Ion Beam Machinig)
  - Obrábění paprskem plasmy (PAM – Plasma Arc Machining) [1,3].



Obr. 1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [3].

### 1.3 Současný stav a perspektivy NMO

Při výrobě přesných měřicích dílců a náradí se v průměru udává, že 10% (ve vyspělých státech 40-60%) technologických operací se uskutečňuje elektrickými metodami obrábění, přičemž dominantní postavení mají elektroerozivní metody. V České republice je zatím podíl elektrických metod obrábění ve strojírenství podstatně nižší, než je světový průměr [3].

Je možno předpokládat, že význam NMO bude narůstat, a to zejména z následujících důvodů:

- Vývoj nových konstrukčních materiálů. Zařízení s vysokou technickou úrovní, NC řízením i systémy CAD/CAM a CIM s možností zařazení do výrobních cyklů (automatizace výroby).
- Nová konstrukční řešení vedou ke zvyšování podílu těžkoobrobitelných kovových materiálů.
- Zvyšuje se podíl tvarově složitých střížných a tvářecích nástrojů a forem pro tlakové lití a zejména lisování plastických hmot.
- Vzrůstá podíl tvarově složitých nástrojů z RO (rychlořezných ocelí), SK (slinutých karbidů), KNB (kubického nitridu bóru), syntetického diamantu atd.

K nevýhodám NMO patří zejména:

- Dosahujeme malých objemových úběrů materiálu - nízká produktivita výroby,
- Relativně vysoká energetická náročnost oproti klasickým technologiím,
- Vysoké pořizovací ceny strojů a zařízení [3].

### 1.4 Historie elektroerozivního obrábění

Elektroerozivní obrábění patří v současnosti k dobře zavedeným nekonvenčním metodám obrábění při výrobě přesných nástrojů.

Základem tohoto elektro-tepelného způsobu úběru materiálu je fyzikální jev, obecně označovaný jako elektroeroze. Základ elektroeroze položil J. Priestley, který v roce 1768 během studia chování plynů zaznamenal vznik malých tzv. kráterů na povrchu kovu při elektrickém výboji. Tento jev byl později označen jako elektroeroze.

Vlastní výzkum elektroerozivního obrábění má však své specifické odlišnosti, jelikož je zaměřen na sledování výbojů mezi elektrodami v malé vzdálenosti (5 - 100  $\mu\text{m}$ ) a převážně v podmínkách kapalného a znečištěného dielektrika. S ohledem na průmyslové aplikace byla elektrická eroze zkoumaná zejména v oblasti vývoje a konstrukce kontaktních spínacích zařízení, kde je jevem nežádoucím, vyvolávajícím opotřebení kontaktů [1,3].

Za autory prvního technologického využití jsou všeobecně uznávaní sovětsí vědci manželé Lazarenkovi (viz Obr. 2), kteří v období let 1938-1948 prováděli výzkum elektrických výbojů pro obrábění kovů, na základě kterého, definovali tyto hlavní zákonitosti elektroeroze:

- všechny elektricky vodivé materiály podléhají elektroerozi,
- elektroeroze probíhá v plynném i kapalném prostředí (dielektriku),
- vhodným zapojením a volbou parametrů obvodu, lze docílit přeměnu stacionárního výboje na opakované nestacionární výboje [1,3].



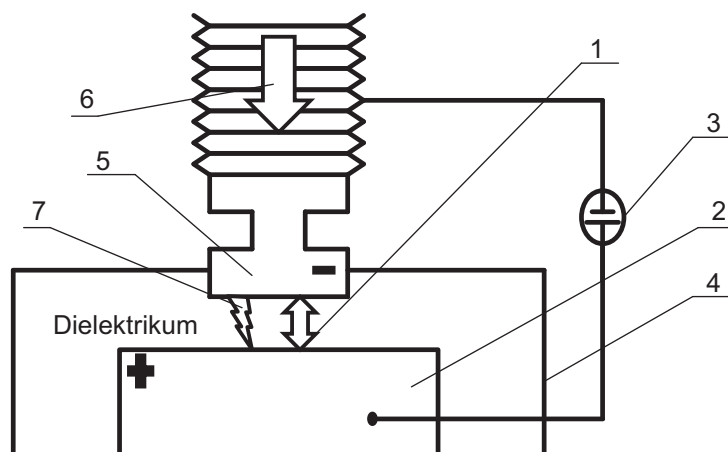
Obr. 2 manželé Lazarenkovi a Jean Pfau [9].

Elektroerozivní metody obrábění vodivých materiálů jsou založené na využití tepelné energie, na kterou se přemění elektrický výboj vznikající mezi elektrodami (nástroj a obrobek) [1,3].

### 1.5 Princip elektroeroze

Princip elektroerozivního obrábění je naznačen na obrázku (viz Obr. 3). Při elektroerozivním obrábění dochází k úběru materiálu na elektrodách pomocí rychle se opakujících periodických impulsů jiskrového výboje za přítomnosti dielektrika – kapaliny s velmi vysokým odporem. Výboj mezi katodou a anodou je vytvořen jednosměrným napětím přivedeným do obvodu. Velikost tohoto napětí je dáno následujícími faktory:

- vzdálenosti mezi elektrodami,
- vodivosti dielektrické kapaliny,
- znečištění dielektrika.



Legenda:

- 1 - pracovní mezera
- 2 - obrobek
- 3 - generátor
- 4 - pracovní vana
- 5 - nástrojová elektroda
- 6 - směr posuvu nástrojové elektrody
- 7 - elektrický výboj

Obr. 3 Schéma elektroeroze [1].

Vlivem působení elektrického napětového pole mezi elektrodami se uvádějí do pohybu volné záporné a kladné ionty, zrychlují se a nabývají vysoké rychlosti. Tím se vytvoří ionizovaný (vodivý) kanál. V tomto stavu začíná mezi elektrodami protékat elektrický proud a vzniká výboj, který vyvolá řadu dalších srážek částic. Vzniklé plasmové pásmo s teplotami (3000-12000) °C, které způsobuje tavení a odpařování materiálu na elektrodách.

Odpařováním dielektrika vzniká plynová bublina s vysokým tlakem. V okamžiku přerušení proudu vyvolá pokles teploty implozi bubliny, do uzavřeného prostoru proniká dielektrikum a velké dynamické síly vymrštují roztavený materiál z kráteru. Chladícím účinkem dielektrika materiál tuhne a je jím odváděn ve formě drobných částic. Na povrchu elektrod vznikají drobné krátery. Objem erodovaného kovu závisí na časové a energetické charakteristice výboje a na termo-fyzikálních vlastnostech kovu (tavící teplotě, tepelné vodivosti a specifickém teple).

Úbytek nástrojové elektrody je možné ovlivnit volbou následujících podmínek obrábění:

- Konstrucí generátoru, tzn. jeho elektrickými parametry charakterizujícími výboje a jejich četnost, polaritu zapojení obou elektrod apod.,
- Volbou materiálu nástroje v závislosti na materiálu obrobku,
- Pracovním prostředím – dielektrikem [1,2,3].

### 1.5.1 Jednotlivé fáze výboje

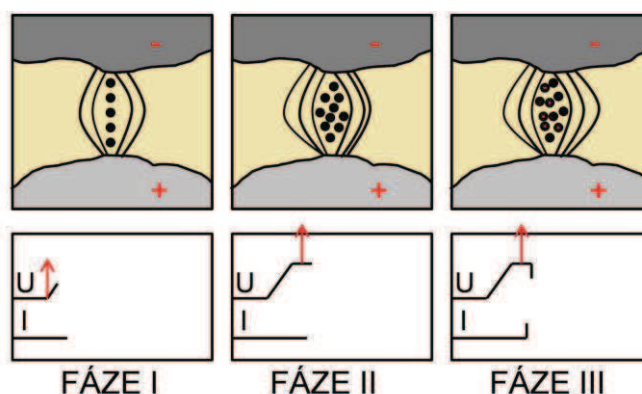
Časový průběh jednotlivých fází výboje, včetně průběhu napětí a proudu mezi elektrodami, je stručně osvětlen a graficky znázorněn v následující podkapitole (viz Obr. 4,5,6).

Průběh elektrického výboje je možné rozdělit do devíti fází (I-IX):

**Fáze I** – V okamžiku přivedení napětí na nástrojovou elektrodu a obrobek se začne vytvářet elektrické pole. V důsledku nerovnosti elektrod se v místě s nejmenší vzdáleností vytváří místo maximálního gradientu. Elektricky vodivé částice (znečištění) obsaženy v dielektriku jsou vtahovány do tohoto místa [1,3].

**Fáze II** – Přivedené napětí dosahuje maximální hodnoty, elektricky vodivé částice vytváří můstky, jako základ potřebný k zapálení výboje [1,3].

**Fáze III** - Vlivem elektrického pole dochází k uvolňování elektronů ze záporně nabitě elektrody. Elektrony se sráží v prostoru s neutrálními částicemi a tříští se o sebe. Díky těmto srážkám v pracovní mezeře vznikají kladné i záporné ionty. Tento proces je obecně znám jako ionizace prostředí [1,3].

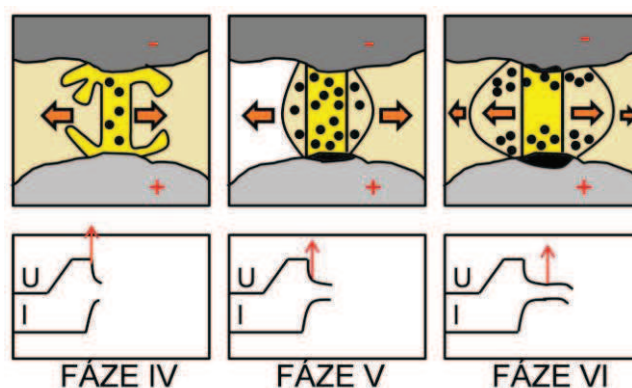


Obr. 4 Jednotlivé fáze elektroeroze I-III [1].

**Fáze IV** – Budoucí výbojový kanál se začíná obalovat ionty, čímž klesá odpor. Mezi elektrodami začíná protékat proud, roste proudová hustota a vzniká vodivý kanál z plazmy. Roste teplota povrchu elektrod, proud a zároveň klesá napětí [1,3].

**Fáze V** – Začíná odpařování dielektrika a vzniká plynová bublina. V důsledku nárazů částic dochází k uvolňování vysokého množství tepelné energie (teplota až 10000°C). Nárazy iontů na katodu a elektronů na anodu způsobují ohřev ohraničených míst obou elektrod, dochází k jejich natavení a následnému odpařování. Protékající proud dosahuje maximální hodnoty a napětí se ustaluje na takzvané zápalné hodnotě výboje [1,3].

**Fáze VI** – Dochází k intenzivní expanzi bubliny a intenzivnímu tavení a vypařování materiálu [1,3].

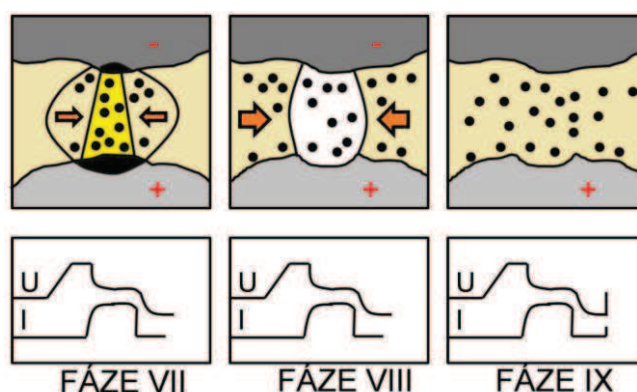


Obr. 5 Jednotlivé fáze elektroeroze IV-VI [1].

**Fáze VII** – V důsledku přerušení přiváděné energie a poklesu proudu mezi elektrodami dochází ke snížení dodávek tepla do místa výboje. Pokles teploty je příčinou imploze plynové bubliny. Díky síle elektrického pole a poklesu tlaku plynů dochází k vytrhávání taveniny do prostoru.

**Fáze VIII** - Pracovní proud a napětí mezi elektrodami klesá na nulovou hodnotu. Dochází k zániku bubliny a výboje. Do vzniklého kráteru vniká dielektrikum, které ochlazuje taveninu a zabraňuje průniku tepla do hlubších vrstev kovu. Odebraný materiál zůstává v dielektriku ve formě spalin a mikročástic ve tvaru kuliček.

**Fáze IX** – V poslední fázi je dielektrikum znečištěno produkty eroze a obsahuje zbylé ionty, které jsou základem pro vznik nového výbojového kanálu.



Obr. 6 Jednotlivé fáze elektroeroze VII-IX [1].

Cílem elektroerozivního obrábění je dosáhnout na obrobku maximálního úběru materiálu a naopak na nástroji co nejmenšího úbytku materiálu a tím i minimálního opotřebení nástroje, což ovlivňuje jeho životnost. Z tohoto předpokladu je třeba vycházet při realizaci elektroerozivního obrábění a volit vhodné pracovní podmínky. Ty jsou dány především následujícími údaji:

- vhodným zapojením od elektrického obvodu (způsob dodávání energie), jeho polaritou a elektrickými parametry charakterizujícími jednotlivé výboje a jejich množství,
- volbou správného parametru nástrojové elektrody vzhledem k obráběnému materiálu,
- vhodně zvoleným pracovním prostředím (dielektrikem) [1,2,3].

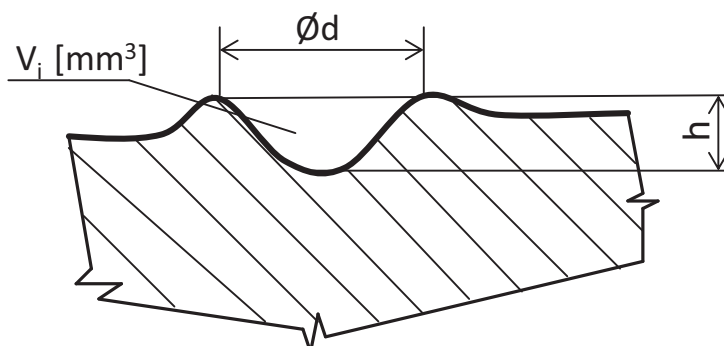
### 1.5.2 Pracovní podmínky a charakteristika výbojů

Na Obr. 7 je ukázán zvětšený profil kráteru vzniklého při elektroerozivním obrábění. Jeho rozměry  $\varnothing d$  a hloubka  $h$  jsou ovlivněny velikostí přivedené energie a délkou výboje. Tyto rozměry mají zásadní vliv na drsnost obrobené plochy, přesnost rozměrů, drsnost a celkový výsledek obrábění. Množství odebraného materiálu je úměrné vybijející se energii [1] a lze jej vypočítat z rovnice (1).

$$V_i = k \cdot W_i \quad (1)$$

kde:  $V_i$  [mm<sup>3</sup>] - množství odebraného materiálu,

- $W_i$  [J] - energie výboje,  
 $k$  [-] - součinitel úměrnosti pro katodu a anodu.



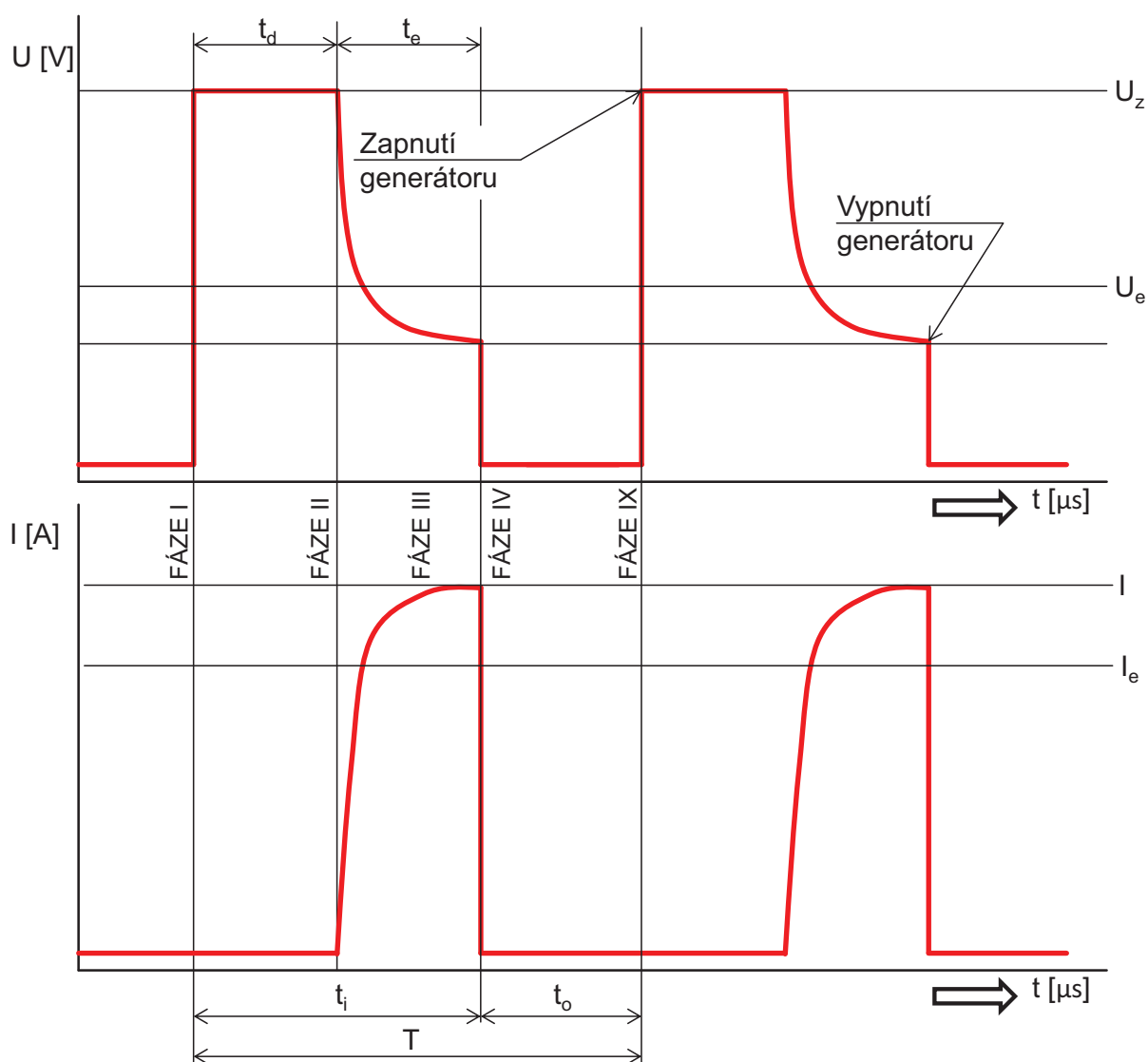
Obr. 7 Profil kráteru [1].

Časový průběh výboje je obvykle určován řadou charakteristik, které jsou zobrazeny na Obr. 8

K základním fyzikálním charakteristikám umožňující popis výboje náleží především:

- Doba impulsu  $t_i$ : Časový úsek mezi zapojením a vypojením generátoru. Pro dobu impulsu platí  $t_i = t_d + t_e$ ,
- Doba pauzy  $t_o$ : Časový úsek mezi vypojením a novým zapojením generátoru,
- Doba zpoždění výboje  $t_d$ : Čas, který uplyne mezi zapnutím napěťového pulzu a nárůstem proudu v pracovní mezeře,
- Doba výboje  $t_e$ : Časový úsek, po který výbojovou dráhou prochází proud. Tuto hodnotu ovlivňuje opotřebení elektrody.
- Doba periody  $T$ : Časový úsek určený dobou impulsu a pauzou ( $T = t_i + t_o$ ) určující frekvenci výbojů.
- Napětí naprázdno  $U_z$ : Napětí při zapnutí generátoru.
- Pracovní proud výboje  $I$ : Maximální vybíjející proud protékající mezi elektrodami v okamžiku výboje.
- Střední vybíjející proud  $I_e$ : střední hodnota proudu mezi okamžikem zapálení výboje a vypnutí generátoru.
- Střední vybíjející napětí  $U_e$ : střední hodnota napětí mezi zapálení výboje a vypnutím generátoru.
- Napětí  $U_k$ : Hodnota napětí při zhasnutí výboje. Tato hodnota nepatří mezi volitelné veličiny. Je závislá na ostatních pracovních podmínkách (použité dielektrikum, druh obráběného materiálu).

Uvedené veličiny umožňují určit celkové množství odebraného materiálu [1].

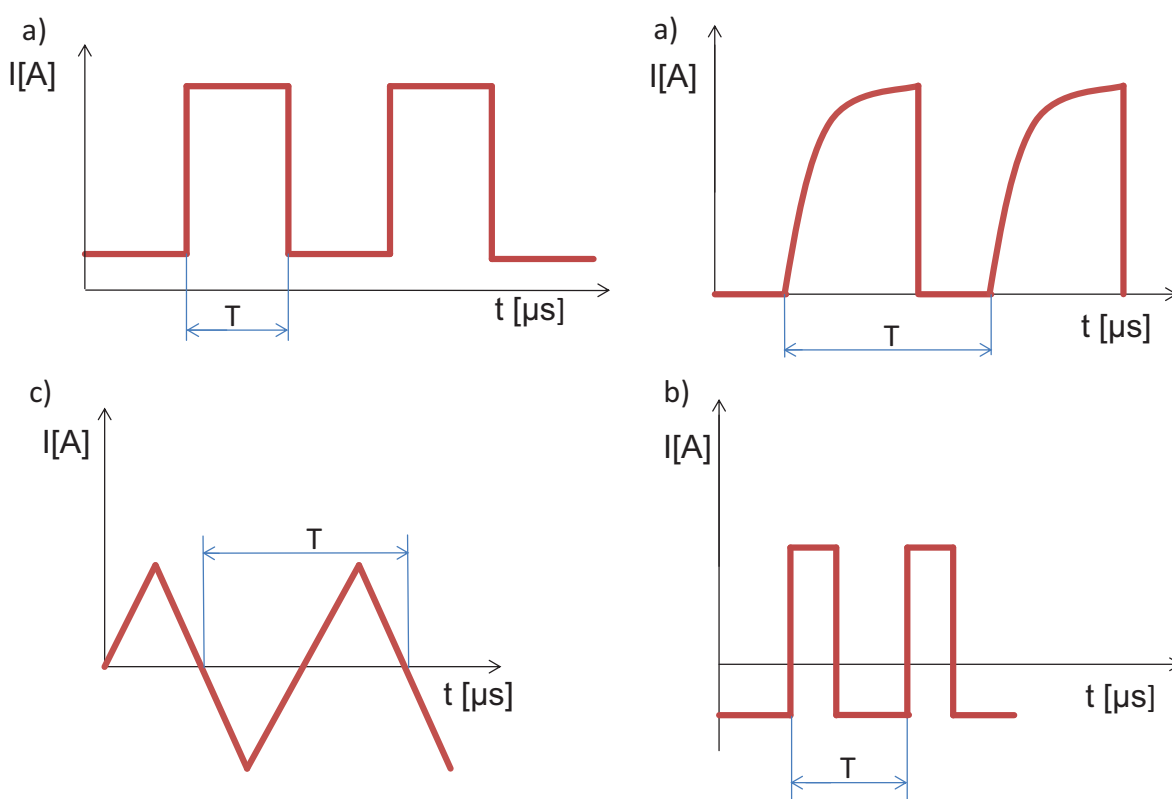


Obr. 8 Časový průběh výboje [1].

## 1.6 Charakter impulzů generátoru

Parametry impulzů patří k nejdůležitějším charakteristikám procesu, určující technologické ukazatele obrábění. Jednotlivé technologické aplikace využívají různých forem elektrických výbojů, které jsou na nástrojovou elektrodu obrobek přiváděny ve formě impulzů určité frekvence. Každý impuls je z toho hlediska charakterizován napětím a proudem a dále svým tvarem (viz Obr. 9). Podle tvaru rozdělujeme proudové impulzy do následujících tří skupin:

1. Jednotlivé impulzy, typické pro elektroimpulzní obrábění (a),
2. Střídavé impulzy nesymetrické, typické při elektrojskovém způsobu (b),
3. Dvoupólové impulzy symetrické, používané v případech elektro-kontaktního obrábění (c) [1].



Obr. 9 Rozdělení impulzů dle tvaru [1].

## 1.7 Zdroje elektrické energie (generátory)

Generátory neboli zdroje elektrické energie patří mezi ty nejdůležitější části elektroerozivních strojů. V současné době existuje celá řada zapojení a konstrukcí generátorů.

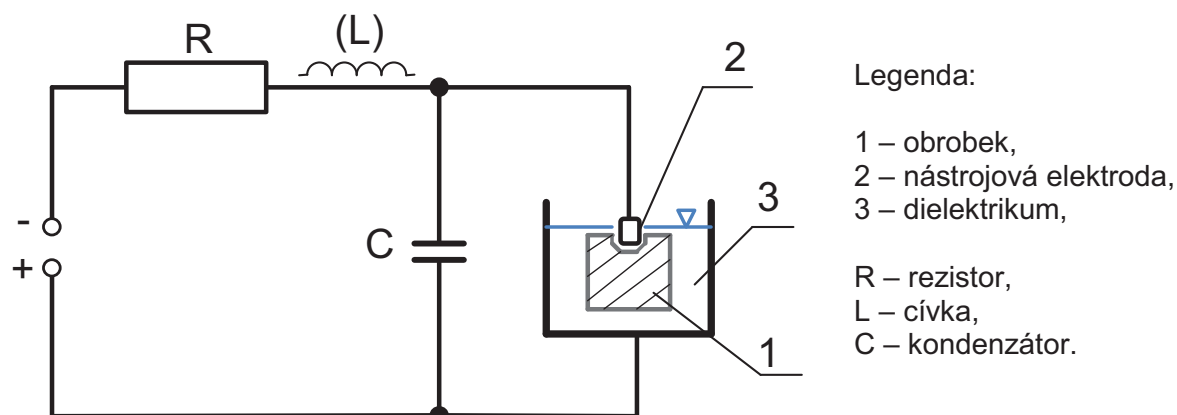
- Závislé generátory (RC a RLC),
- Nezávislé (pulzní) generátory [3].

### 1.7.1 Závislé generátory (RC a RLC)

Tyto generátory patří k těm nejstarším zdrojům. Činnost generátoru spočívá v opakovaném vybíjení a nabíjení ze zdroje stejnosměrného napětí. Kondenzátor je zapojen paralelně a vybití je doprovázeno výbojem, když napětí dosáhne průrazné hodnoty. Velikost tohoto napětí je závislé na velikosti jiskrové mezery, nebo vodivosti dielektrika. Vzniklým výbojem klesne napětí, dojde k oddálení elektrod a kondenzátor se znova nabije a celý děj se opakuje. Z důvodů této závislosti na poměrech v jiskřišti se tyto generátory nazývají závislé [1,3].

Závislé generátory dávají velmi krátké výboje, ve kterých převládá elektronová vodivost. Je proto vhodné zapojovat obrobek jako anodu a nástroj jako katodu. Mezi výhody těchto generátorů patří jejich jednoduchost a spolehlivost, ale naopak nevýhodou je značné opotřebení nástrojové elektrody, omezená možnost regulace frekvence výbojů a malý úběr materiálu. Generátor je proto vhodný zejména na obrábění na čisto. Zkrácení doby nabíjení a ustálení nabíjecího proudu

dosáhneme přidáním indukčnosti (z RC se stane RLC zdroj) do nabíjecího obvodu. Schéma tohoto typu generátoru je na Obr. 10 [1,3].

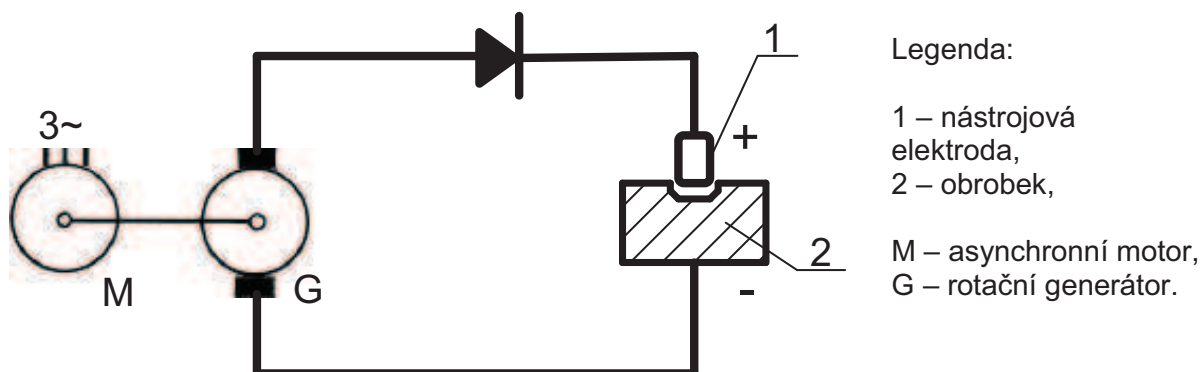


Obr. 10 schéma elektrického obvodu s RC/RLC prvky [3].

### 1.7.2 Nezávislé (pulsní) generátory

Nezávislé generátory umožňují nastavovat pracovní podmínky obrábění, protože nezáleží na poměrech pracovní mezeře. Pro nezávislé generátory je charakteristické nižší pracovní napětí a delší doba trvání impulzu. U těchto generátorů převládá iontová vodivost. Nezávislé generátory můžeme dělit do dvou skupin:

- **Rotační (kolektorové)**, viz Obr. 11

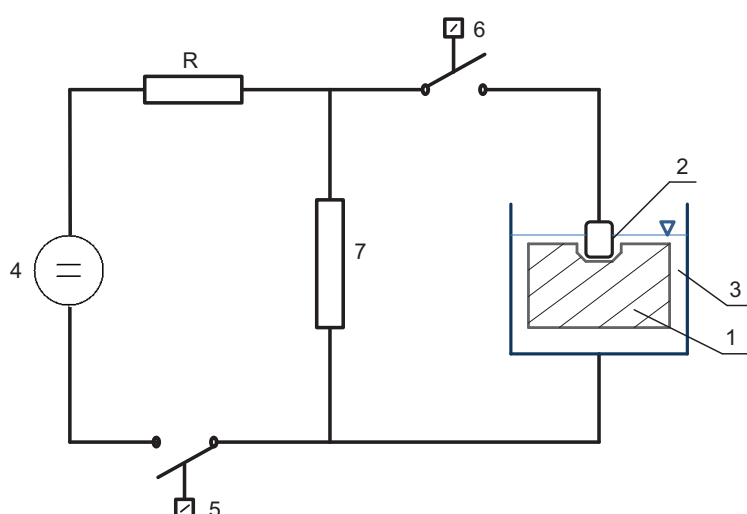


Obr. 11 Schéma rotačního generátoru [3].

Impulzy vznikají roztáčením dynama asynchronním motorem. Obvykle mají stálou frekvenci a umožňují vysoké úběry (až  $5000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ). Byly vyvinuty za účelem zvýšení produktivity obrábění, někdy se nazývají komutátorové generátory. Nevýhodou těchto generátorů je hlučnost a obtížná změna pracovní frekvence [1,3].

- **Polovodičové (tranzistorové)**, viz Obr. 12

Tyto zdroje označujeme jako zdroje druhé generace. Polovodičové nezávislé generátory umožňují širokou nastavitelnost elektrických parametrů. Základ obvodu tvoří tzv. multivibrátor sloužící pro vysílání impulzů, které jsou ještě zesíleny v tranzistorovém zesilovači. Generátory zajišťují podstatné snížení úbytku nástrojové elektrody, při zvýšené produktivitě obrábění. Charakteristická je delší doba trvání impulzů s převahou iontové vodivosti a proto se obrobek zapojuje jako katoda [1,3].

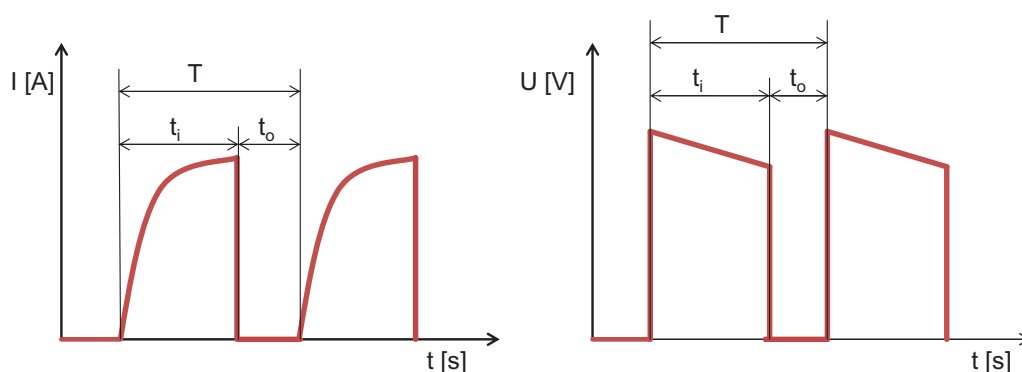


Legenda:

- 1 – obrobek,
- 2 – nástrojová elektroda,
- 3 – dielektrikum,
- 4 – stejnosměrný zdroj,
- 5 – Vypínač impulzů,
- 6 – vypínač délky impulzů,
- 7 – akumulátor energie.

Obr. 12 schéma polovodičového generátoru [3].

Tyto generátory jsou nejčastěji používány u moderních elektroerozivních obráběcích strojů, které jsou řízeny CNC systémem. Proudová a napěťová charakteristika polovodičových generátorů je vidět na obrázku 13 [3].



Obr. 13 Proudová a napěťová charakteristika polovodičových generátorů [3].

## 1.8 Nástrojové elektrody

Relativní objemový úbytek závisí především na správné volbě nástrojové elektrody ve vztahu k obrobku, na polaritě, velikosti pracovního proudu a době trvání impulzu. Velikost opotřebení elektrod dosahuje v praxi hodnot od desetin procenta až do desítek procent. Při dokončovacím obrábění bývá opotřebení nástroje zpravidla vyšší. Vhodnou volbou pracovních parametrů se snažíme zajistit co nejmenší úběr na nástroji za předpokladu maximálního úběru obrobku. Tohoto můžeme docílit správnou volbou materiálu nástroje vzhledem k obráběnému materiálu. Pro snazší optimalizaci volby materiálu nástrojové elektrody byla zavedena poměrná veličina, nazývaná relativní objemové opotřebení, pro které platí  $\gamma$  [1,3].

$$\gamma = \frac{V_n}{V_0} = \frac{\text{Objemový úbytek nástroje}}{\text{Objemový úbytek obrobku}} * 100 [\%] \quad (2)$$

kde:  $\gamma$  [%] - relativní poměrné opotřebení,  
 $V_n$  [mm<sup>3</sup>] - Objemový úbytek nástroje,  
 $V_0$  [mm<sup>3</sup>] - objemový úbytek obrobku.

Velikost relativního objemového opotřebení je závislé:

- Správné volbě nástrojové elektrody vzhledem k obráběnému materiálu,
- délce impulzu,
- velikosti pracovního proudu.

Pro výrobu elektrod se jako materiál používá elektrolytická měď, grafit, wolframová měď (slitina 50-80% Cu), mosaz, slitiny Al, wolfram a ocel.

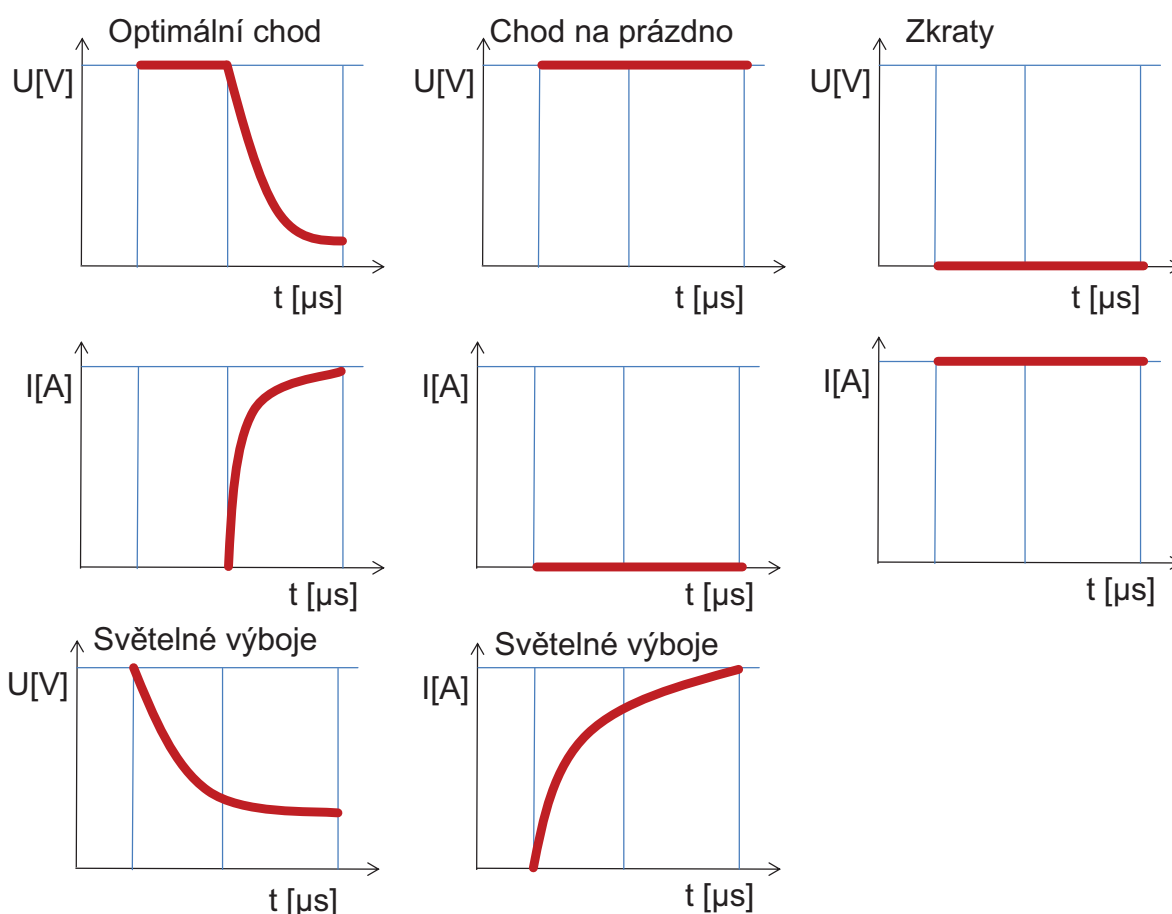
V dnešní době se kovové elektrody takřka nepoužívají, byly nahrazeny elektrodami z grafitu. Grafitové elektrody mají delší životnost než kovové. Opotřebení elektrod je jedním z hlavních problémů elektroeroze. Cena elektrody může tvořit až 50% celkových nákladů na výrobu. Nevýhodou grafitových elektrod je však malá pevnost grafitu a problematická výroba tvarových elektrod [1].

Kovové nástrojové elektrody se vyrábějí následujícími způsoby:

- obráběním,
- Zápustkovým kováním nebo lisováním,
- Litím,
- Práškovou metalurgií,
- Galvanoplastikou,
- Stříkáním kovu [1,3].

### **1.8.1 Regulace přísuvu nástrojové elektrody**

Další důležitou částí elektroerozivních strojů je servomechanismus, který reguluje nástrojovou elektrodu a tím pádem i nastavení pracovní mezery. Servomechanismus má za úkol nastavování optimální vzdálenosti mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem a tím i zajišťovat plynulost a rovnoměrnost erozivního úběru obráběné součásti. Je-li mezera příliš malá, dochází ke zkratům. Je-li mezera příliš velká, nedochází k výboji. Na Obr. 14 je znázorněn průběh napětí a proudu v různých stadiích elektroerozivního obrábění.



Obr. 14 Průběhy napětí a proudu v různých stádiích [1].

- Optimální chod – Ideální průběh výboje, optimální pracovní podmínky,
- Chod naprázdno – Nedochozí k výboji v pracovní mezeře. Důvodem chodu na prázdno je velká pracovní mezera, nebo vysoký tlak přiváděného dielektrika,
- Zkraty – Důvodem je přímý kontakt elektrody s obrobkem například v důsledku špatného vyplachování. Regulační elektronika tento stav vyhodnocuje na základě poklesu napětí na velmi nízkou hodnotu,
- Světelné výboje – Důvodem je nedostatečná deionizace dielektrika, krátká doba pauzy nebo příliš znečištěné dielektrikum. Následkem je nárůst drsnosti a opotřebení nástrojové elektrody. Regulační elektronika vyhodnotí uvedený stav na základě nulové hodnoty zpoždění výboje  $t_d$  [1].

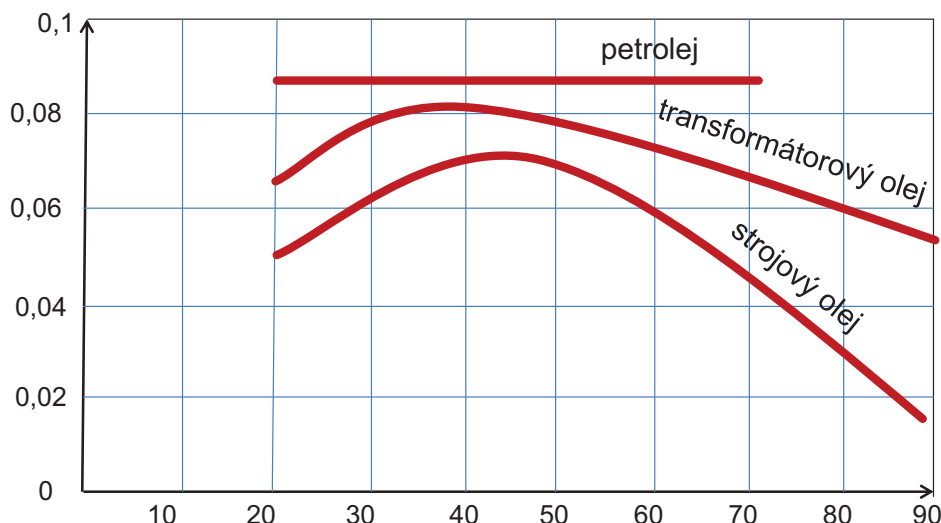
### 1.9 Kapalně pracovní prostředí (dielektrikum)

Dielektrikum je pracovní kapalně prostředí plnící řadu funkcí nutných pro stabilní průběh eroze. Působí jako izolátor mezi elektrodami, odvádí teplo z pracovní mezery, ohraničuje výbojový kanál, odvádí drobné produkty eroze z míst výbojů. Jako dielektrika se používají např. strojový olej, petrolej, deionizovaná voda.

Požadavky na dielektrické kapaliny:

- Malá viskozita a dobrá smáčivost,

- Chemická neutralita z důvodů zamezení koroze,
- Bod vzplanutí dielektrika musí být vyšší než 60 °C, protože při výbojích vznikají vysoké teploty, které způsobují oteplení elektrod a dielektrika,
- Hygienická a ekologická nezávadnost. Nesmí docházet k rozkladu a vzniku zdraví nebezpečných plynů,
- Nízká pořizovací cena a snadná dostupnost [3].



Obr. 15 Vliv teploty dielektrika na úběru materiálu [2].

Teplota dielektrika a čistota má svůj značný vliv, což je patrné z obr. 15. Při použití petroleje se úběr materiálu s rostoucí teplotou nemění. U transformátorového oleje a strojového s rostoucí teplotou je i značný pokles úběru materiálu [2].

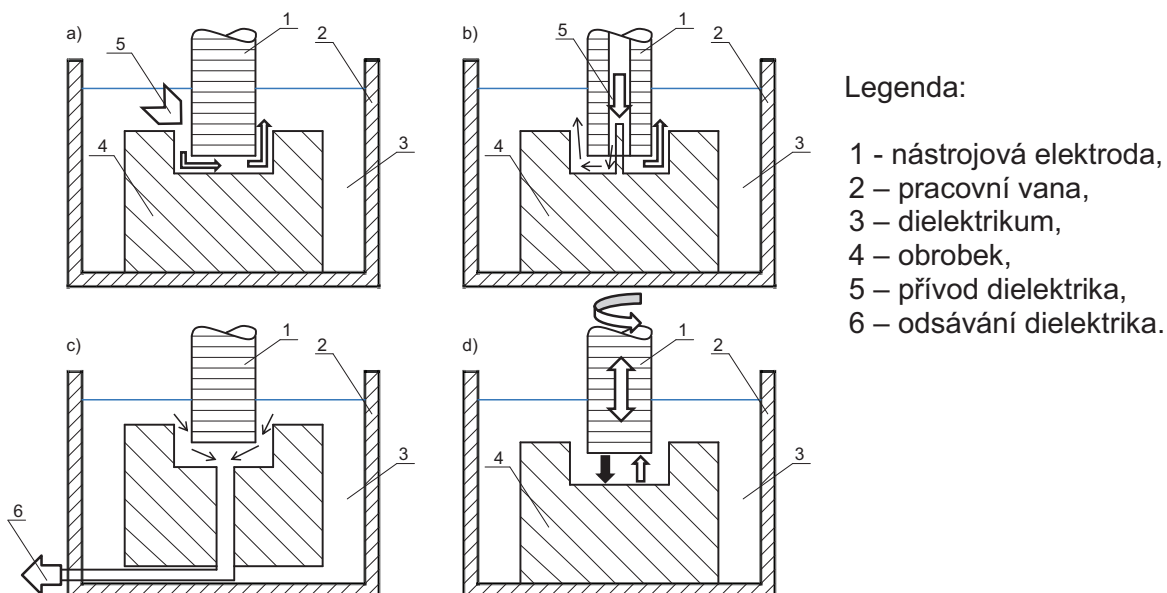
Jako dielektrikum se používají kapaliny na bázi petroleje, petrolej, voda a pro EDM drátové řezání deionizovaná voda. Tato voda je zbavená všech iontově rozpustných látek a křemíku (obvykle se vyskytuje ve formě oxidu křemičitého). Řada světových výrobců vyrábí speciální kapaliny, vyznačující se zejména tím, že neobsahují aromatické složky jako klasické petroleje [1,16].

Elektroerozivní stroje jsou vybavovány zařízeními pro přívod, chlazení a čištění dielektrika. EDM drátové řezací stroje jsou vybaveny deionizační kolonami pro zlepšení dielektrických vlastností vody.

Pro vyplachování mezielektroodového prostoru (viz Obr. 16) je používáno několik způsobů:

- Vnější vyplachování – Tato varianta se nejčastěji používá při obrábění hlubokých dutin. V praxi se toto vyplachování kombinuje s pulzním,
- Tlakové vyplachování vnitřní – Dielektrikum je přiváděno otvorem v nástroji přímo do pracovního prostoru. Nevýhodou je vznik nežádoucích výbojů na bočních stěnách, což zhoršuje tvarovou přesnost.
- Vyplachování odsáváním – provádí se odsáváním dielektrika dutinou v nástrojové elektrodě nebo v obrobku. Tato varianta se vyznačuje velmi dobrou tvarovou přesností.

- d) Pulzní vyplachování – Řešené pomocí oddalování elektrody. Při vyplachování dochází ke krátkému přerušení eroze, které je synchronizováno. Při vyjíždění elektrody se vypíná pracovní proud a do pracovního prostoru se začíná přivádět dielektrikum. Po nastavení nástrojové elektrody na pracovní vzdálenost je proud opět spuštěn. V případě hloubení složitých dutin je vhodné kombinovat tlakové vnitřní vyplachování a odsávání [1,3].

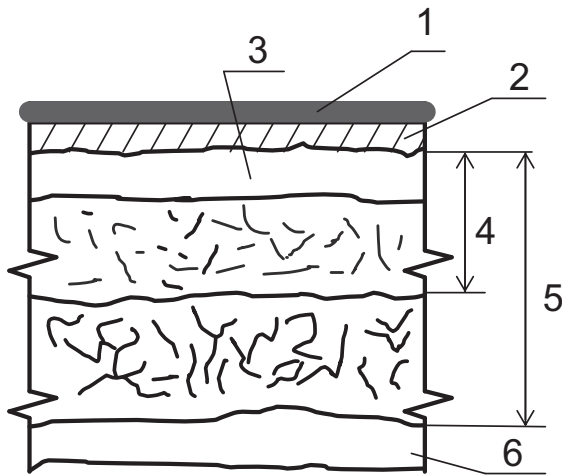


Obr. 16 Přívod dielektrika mezi obrobek a nástrojovou elektrodu [4].

### 1.10 Kvalita opracovaného povrchu

Drsnost povrchu a stav povrchové vrstvy náleží k nejdůležitějším technologickým charakteristikám, vymezující oblast použití elektroerozivního obrábění. Kvalita povrchu je úzce vázána na energii jednotlivých výbojů, která určuje rozměry vytvářeného kráteru.

Při elektroerozivním obrábění obecně platí, že nejlepší kvality povrchu je dosaženo při nižších hodnotách proudu, krátkých impulzech a vysokých frekvencích výbojů. Dosažení vysoké kvality povrchu je provázeno ale zvýšením opotřebení nástrojové elektrody. Kromě energií výboje je velikost kráteru také ovlivněna použitým dielektrikem a druhem nástrojové elektrody. Studium povrchu obrobku byly zjištěny změny povrchu (viz Obr. 17) [1].



Legenda:

- 1) mikrovrstva tvořená chemickými sloučeninami vzniklými difuzí prvků dielektrika,
- 2) vrstva obsahující prvky materiálu nástrojové elektrody,
- 3) tzv. bílá vrstva (silně nauhličená znovu ztuhlá tavenina),
- 4) pásmo tepelného ovlivnění,
- 5) pásmo plastické deformace vyvolané rázy pulzů,
- 6) základní materiál obrobku.

Obr. 17 Složení povrchu opracované plochy [4].

### 1.11 Technologické využití elektroeroze

Nejčastěji využívané metody elektroeroze v průmyslu jsou:

- Hloubení dutin a vyjiskřování ulomených nástrojů,
- Elektroerozivní mikroděrování,
- Elektrokotáční obrábění,
- Nanášení povlaků,
- Anodomechanické řezání,
- **Elektroerozivní drátové řezání [3].**

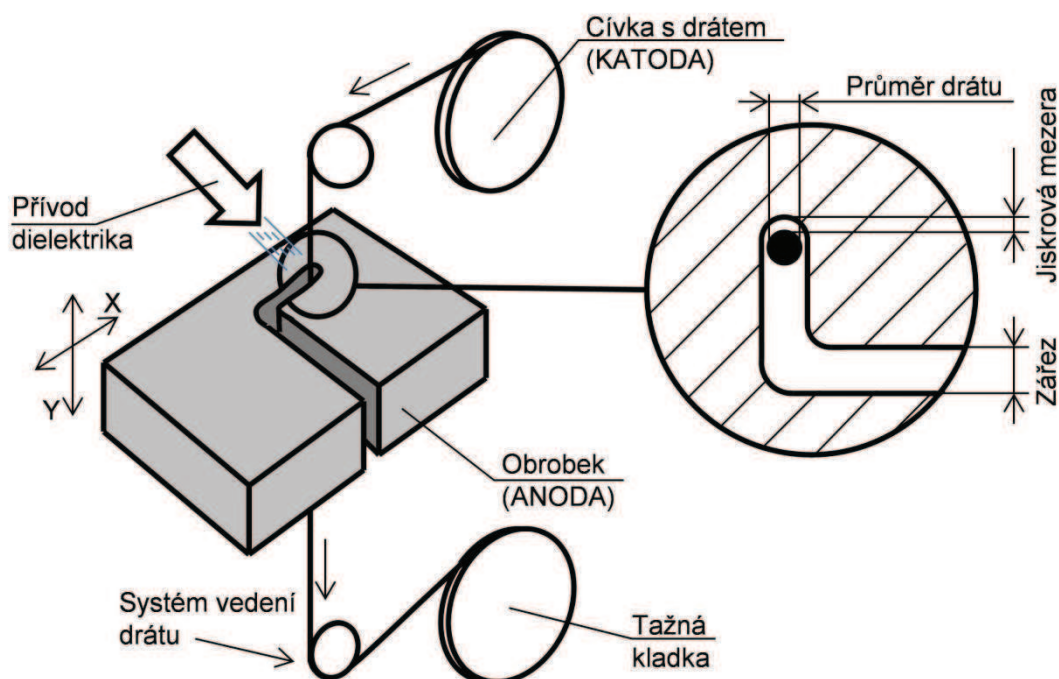
## 2. ELEKTROEROZIVNÍ DRÁTOVÉ ŘEZÁNÍ (WEDM)

Elektrojiskrové drátové řezání, které je často označováno mezinárodní zkratkou WEDM (wire electrical discharge machining, často také nazývané traveling wire EDM) je progresivní modifikací elektrojiskrového obrábění. Jeho zavedení znamenalo výrazný pokrok ve výrobě tvářecích nástrojů, především střížných a lisovacích nástrojů [2].

V současné době je elektroerozivní řezání drátovou elektrodou používáno pro obrábění ultratvrdých vodivých materiálů, jako jsou SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> – TiN. K dalším aplikacím náleží řezání nitridu bóru pro ohrnování brousících kotoučů a řezání polykrystalů diamantu pro výrobu tvarových řezných nástrojů [3].

### 2.1 Princip metody

Princip této metody je znázorněn viz Obr. 18. Tato technologie využívá veškeré výše zmíněné zákonitosti elektrické eroze (viz Obr. 21) uvedené v 1. kapitole. Elektroeroze probíhá mezi nástrojovou elektrodou, kterou tvoří tenký drát převíjený pomocí speciálního zařízení a obráběnou součástí, připojenou ke generátoru jako elektroda opačné polarity. Způsob zapojení je dán polaritou a typem výbojů. Dnes se v převážné míře používají tranzistorové generátory, pro které je charakteristická přímá polarita (nástroj jako katoda, obrobek jako anoda). Elektrickými výboji, vznikajícími mezi drátovou elektrodou a obrobkem se vytváří pracovní mezera a tím i příslušný řez [1].

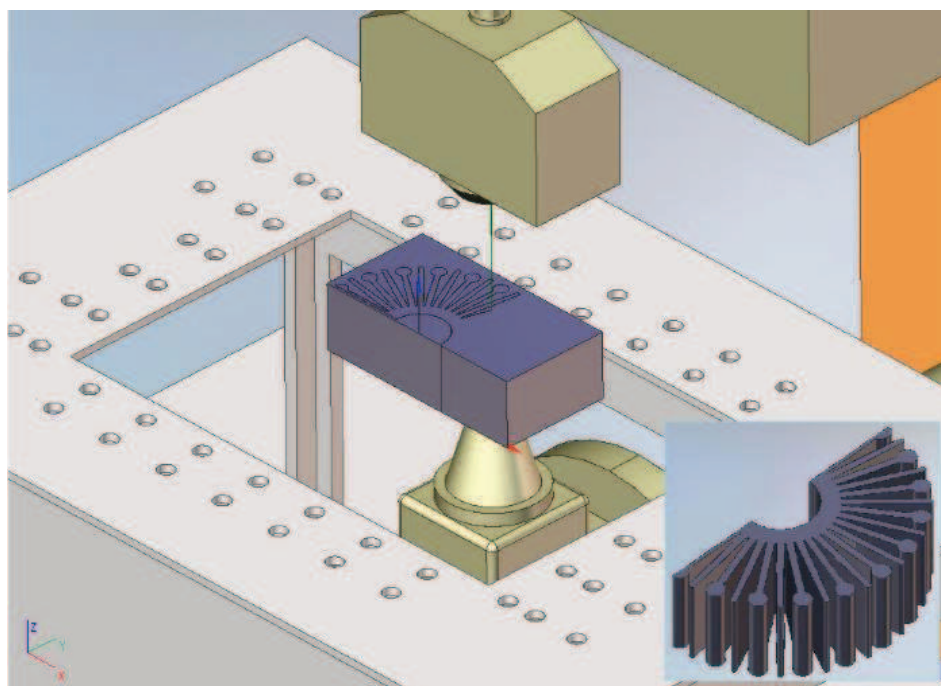


Obr. 18 Princip WEDM [7].

#### 2.1.1 Možnosti WEDM

##### 2D Drátové řezání

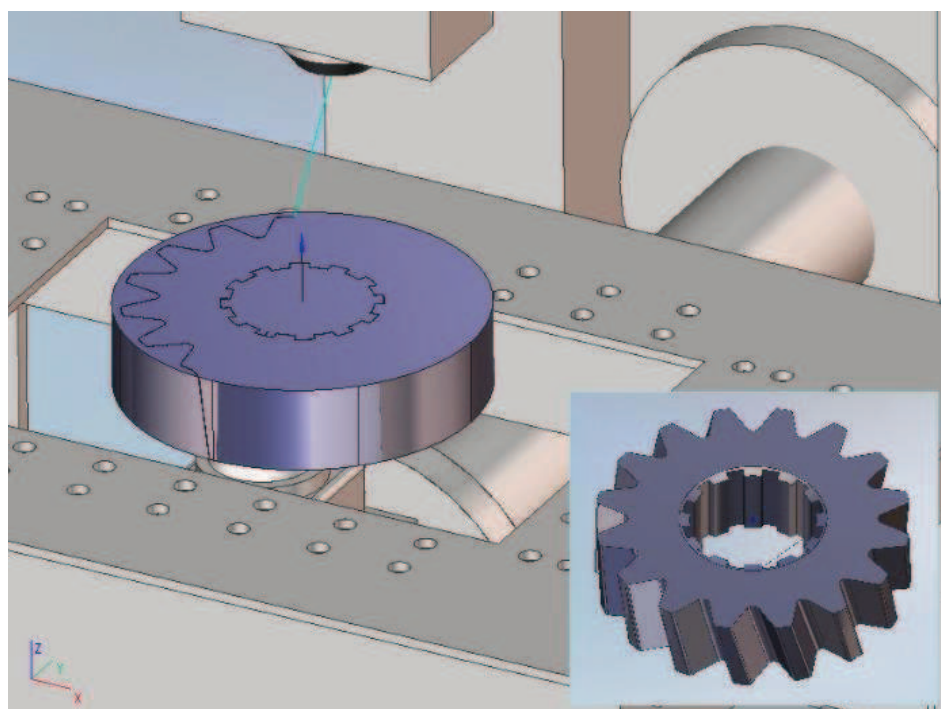
Tato technologie je určena pro vytváření součástí a otvorů vertikálními řezy. Ty se vyznačují velkou přesností a precizností (viz Obr. 19) [7].



Obr. 19 ukázka 2D řezání [7].

#### 4D drátové řezání

Hlavní rozdíl mezi 2D a 4D drátovým řezáním je v tom, že u 2D vykonává horní a spodní hlava tentýž pohyb (po stejné trajektorii) - program je tedy tvořen pouze pro horní hlavu a spodní jí následuje, zatímco u 4D je pohyb horní a spodní hlavy řízen zvlášť (trajektorie horní a spodní hlavy jsou odlišné). Lze tak vytvářet složitější tvary, vést řezy s úkoly pod různými úhly (viz Obr. 20) [7].



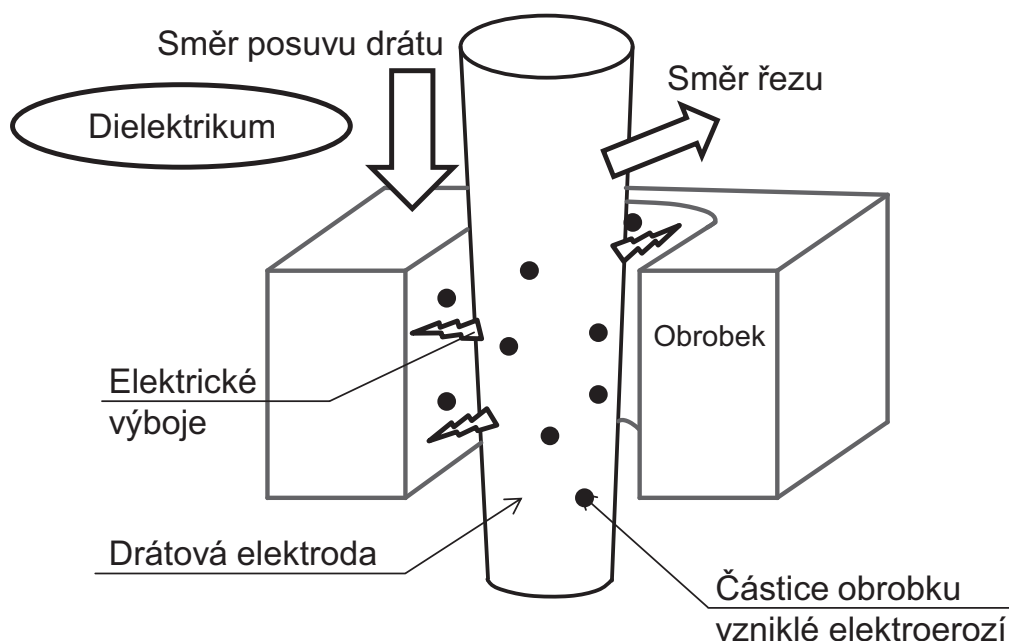
Obr. 20 Ukázka 4D řezání [7].

## 2.2 Pracovní prostředí (dielektrikum)

Pro elektroerozivní drátové obrábění se používá zejména deionizovaná voda nebo lehké oleje. Úkolem dielektrika je zabezpečit chlazení oblasti obrobku a odplavování nežádoucích částic po řezání. WEDM vyžaduje plynulé proudění dielektrika do oblasti řezu, důsledkem špatného proudění dielektrika bývá přetrhnutí drátové elektrody [2].

## 2.3 Drátová elektroda

Používaný materiál na drátové elektrody je měď (používaný na větší průřezy), mosaz a pro velmi jemné řezy molybden. Drátová elektroda představuje nástroj, který není orientovaný a může odebírat materiál v každém směru. Těto vlastnosti se využívá zejména při programování vzájemného pohybu obrobku a elektrody. Správně a vhodně zvolená drátová elektroda má velký vliv na výslednou produktivitu práce, jakost obrobené plochy a rychlost úběru materiálu [3].



Obr. 21 fyzikální princip WEDM [5].

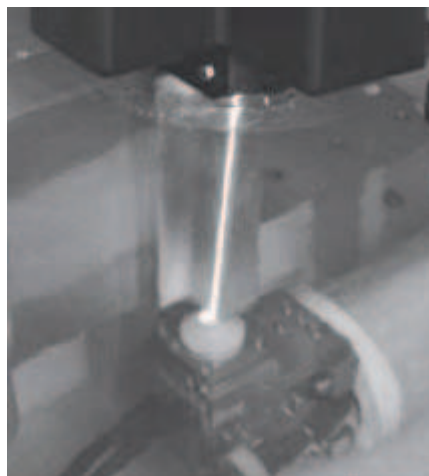
V průběhu řezání jsou na nástrojovou elektrodu kladeny specifické požadavky:

- vysoká elektrická vodivost,
- dostatečná mechanická pevnost, vysoký bod tání,
- dodržení tolerancí rozměrů a tvaru,
- přijatelná cena.

První požadavek vyplývá ze situace obrábění, kdy nástrojová elektroda přivádí do jiskřiště elektrickou energii a obvykle je protékajícím proudem vysoce zatěžována.

Druhý a třetí faktor souvisí zejména s tvorbou pracovní mezery. Pro přesný řez je žádoucí, aby elektroda vstupovala do místa řezu řádně napnutá a vyrovnaná, jelikož každá nerovnost na jejím povrchu se negativně promítne na povrchu obrobku

a kvalitě řezu, přesnosti výrobku i výkonu řezání. Z tohoto důvodu jsou drátové elektrody před vstupem do pracovní zóny kalibrovány diamantovými průvlaky a žihány [1,3,5].

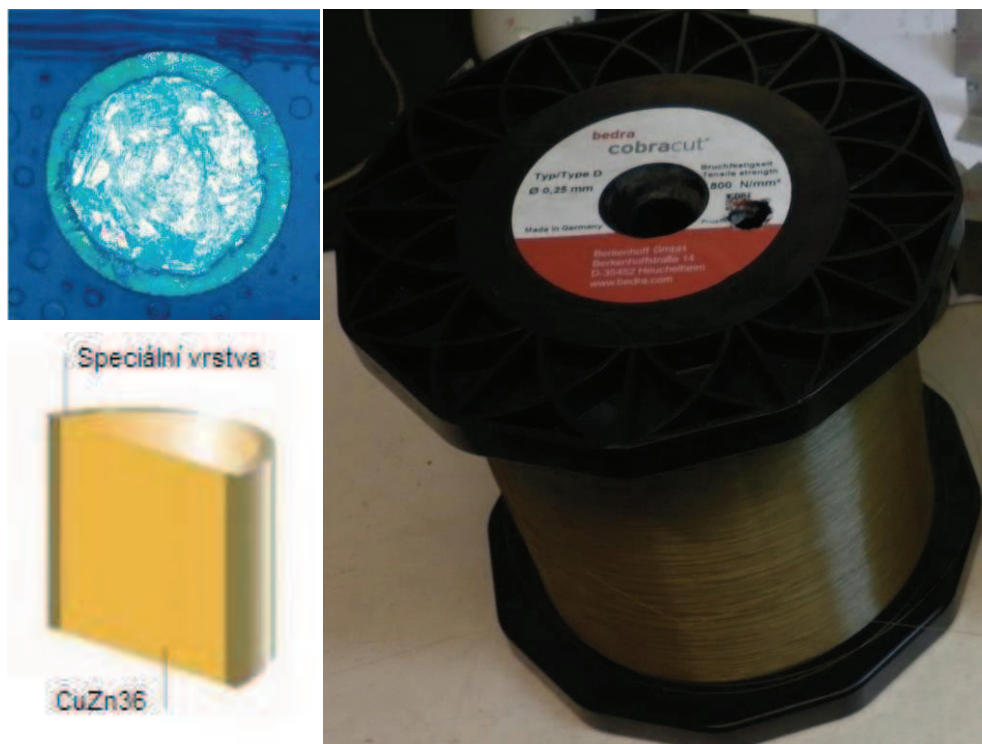


Obr. 22 ukázka elektroerozivního řezání [15].

Automatické navlékání drátu lze realizovat:

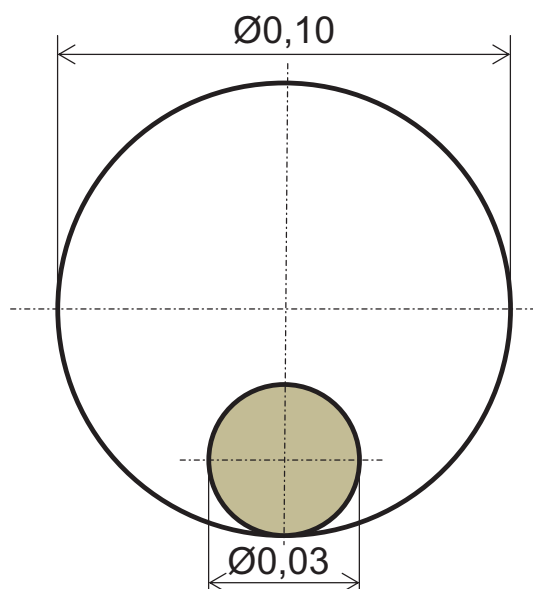
- Proudem dielektrika, který tryská z horního vodítka drátku přes technologický otvor k tělesu spodního vodítka a do odváděcího mechanismu,
- Mechanickými podávacími prostředky přes trubičku vysunutou do technologického (startovacího) otvoru k tělesu spodního vodítka se volný konec drátku posouvá k odebíracím kladkám.

Při automatickém navlékání se používají dráty o průměru 0,2-0,25 mm [1,3].



Obr. 23 Příčný a podélný řez povlakované elektrody, ukázka cívky [9].

Pro získání představy jaký je obráběcí drát o průměru 0,03 mm můžete jej srovnat s lidským vlasem (viz Obr. 24). Takový vlas je asi 3 krát silnější a má asi 11 krát větší průřez než samotný drát. ED výrobní drát s tak minimálním průměrem je nástroj nejvyšší přesnosti a jako s takovým se s ním musí i zacházet s největší pečlivostí. Ústřížky 0,03 mm drátu odpadlé a zachycené v podávacím a posuvném systému nejsou pouhým okem viditelné bez odpovídajícího osvětlení. Jelikož se 0,03 mm drát přetrhne již nejslabším záchvěvem, je nutné zajistit, že tato práce je prováděna v klidu a bez jakéhokoli tlaku nebo spěchu. Aby takhle tenký drát mohl být veden, posunován a tažen extrémně přesně a bezchybně během výroby a přes x-násobek délky lidského vlasu, musíme zabezpečit práci ve stabilních podmínkách [10].



Obr. 24 Srovnání ED drátku s lidským vlasem [10].

Velmi důležitým parametrem elektroerozivního drátového obrábění je tvarová přesnost, která je ovlivněna vlastnostmi stroje, přesností systému, stabilitou parametrů generátoru a kvalitou přívodu dielektrika. Stroje dnes pracují s rovnoběžností stroje 2  $\mu\text{m}$  při tloušťce obráběného materiálu 100mm. Přesnost tvaru je závislá na tepelné stabilizaci stroje. Při kolísání teploty kolem  $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$  je dosažitelná odchylka v rozmezí 4  $\mu\text{m}$ . Pro zajištění přesnosti v rozsahu 1  $\mu\text{m}$  je požadovaná tepelná stabilizace  $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$  [1].

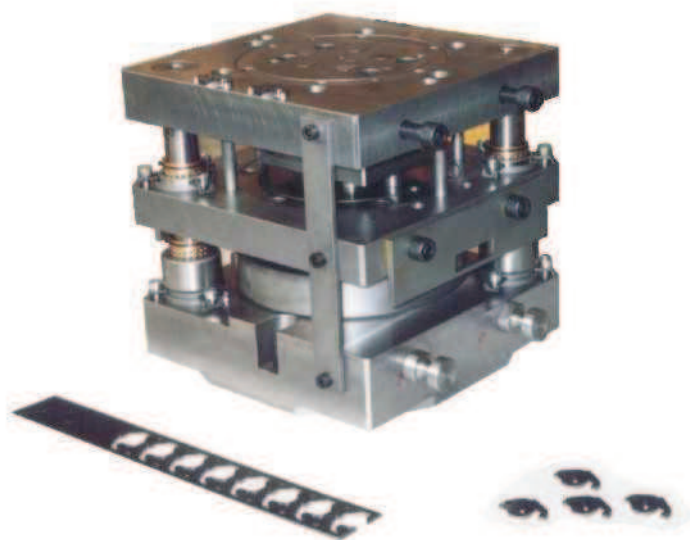
Je možné vyřezávat složité kónické tvary, jejichž povrch je tvořen jako obalovaná plocha přímek (viz Obr. 25), tj. okamžitých poloh řezacího drátu. Systémy umožňují plynulou změnu sklonu řezacího drátu až o  $\pm 30^\circ$  podle typu a výrobce stroje, provádí korekci dráhy, reverzaci chodu na programované dráze, automatickou regulaci rychlosti v závislosti na okamžitém průběhu řezání [3].



### 3. PRAKTICKÁ ČÁST

#### 3.1 Seznámení s firmou Kovo Jančo

Firma Kovo Jančo byla založena roku 1998. Hlavním výrobní programem této nástrojárny je výroba lisovacích nástrojů a forem, upínacího nářadí a měřidel. Tuto činnost vykonává kolektiv 7 pracovníků. Sídlo firmy se nachází v prostorách Výzkumného ústavu chemických zařízení v Brně, na Křížíkově ulici. Na obrázku 26 je příklad výroby této firmy.



Obr. 26 Příklad výroby Kovo Jančo. Nástroj pro přesné stříhání [6].

##### 3.1.1 Strojní vybavení

###### 1x drátová řezačka AGIE CLASSIC 2S

1x souřadnicová vyvrtávačka WKV 63 nbsp

1x souřadnicová bruska HAUSER 3.S.M. nasp

1x bruska na plocho vertikální BPV 300 x 1500

1x bruska na plocho horizontální BPH 200 x 600

1x bruska na plocho horizontální BPH 320 x 1000

1x bruska na kulato BUA 250 x 750

1x soustruh SV 18 RA

1x frézka vertikální

1x frézka univerzální

Měřicí trojdotek byl vyřezán na drátové řezačce AGIE CLASSIC 2S (viz Obr. 26). Její základní parametry jsou uvedeny viz příloha č. 5.



Obr. 27 drátová řezačka AGIE CLASSIC 2S.

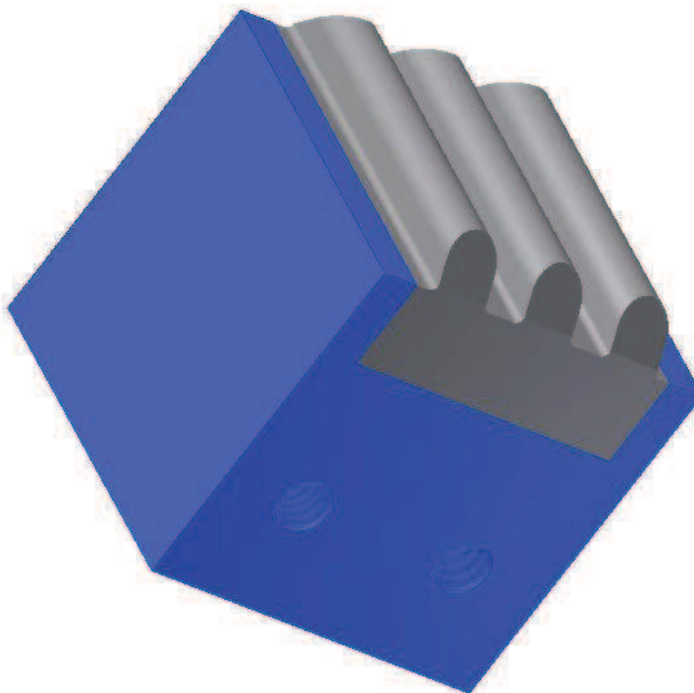
### 3.2 Použití měřících trojdoteků

Měřicí trojdotek (viz Obr. 29 a příloha č. 1) má své uplatnění v automobilním průmyslu při kontrole motorových ventilů. Většina ventilů má v horní části stopky jeden zářez na 2 klínky. U některých motorů byly montovány ventily se 3 zářezy (náš případ viz Obr 28). Ventily dělíme na sací a výfukové. Sací a výfukové ventily se od sebe odlišují (průměr ventilu sacího je větší než průměr výfukového). Sací/výfukové ventily hrají důležitou roli v každém motoru. Motor používá ventily pro otevírání a zavírání sacího a výfukového kanálu. Úkolem ventilového rozvodu je řízení výměny plynů ve válci spalovacího motoru. Řešení ventilového rozvodu má velký vliv na výkon a točivý moment motoru. Z těchto důvodů dbáme na kontrolu při výrobě ventilů [13].



Obr. 28 ukázka motorových ventilů [14].

Měřicí trojdotek funguje jako 100% kontrola ventilů, neboť si nemůžeme dovolit instalovat do motoru auta či motorky vadný ventil – mohlo by to vést ke katastrofě. V tomto případě trojdotek kontroluje správnou rozteč zářezů ve stopkové části ventilu (viz příloha č. 2), trojdotek musí do zářezů volně vklouznout.



Obr. 29 Model měřicího trojdoteku

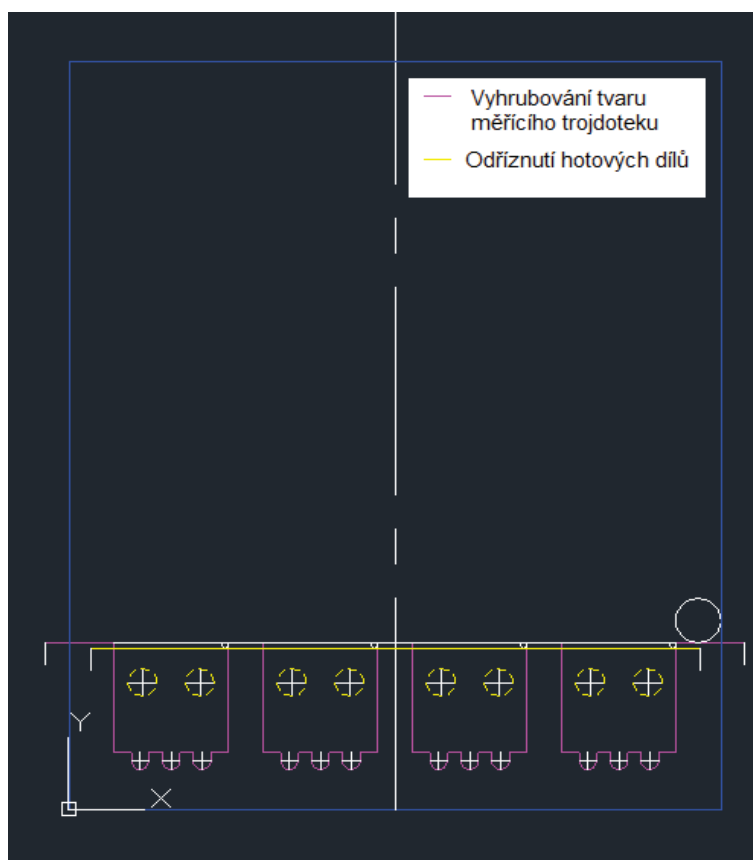
### 3.3 Popis problému při výrobě měřících trojdoteků

Měřicí trojdotek je vyráběn pro firmu TRW - DAS a.s. Dačice, která patří mezi největší dodavatele komponentů pro automobilový průmysl.

Při stávající technologii výroby měřících trojdoteků docházelo k 50% výrobě zmetků, jelikož hlava trojdoteků je tolerována v rozmezí  $\pm 0,003-0,005$  mm. Při výrobě docházelo k nedodržení těchto úzkých tolerancí a tím pádem k výrobě zmetků. Elektroerozivní drátové řezání je téměř jedinou možností výroby měřících trojdoteků. Mezi další možnosti výroby hlavy trojdoteku můžeme zařadit broušení na horizontální brusce (BPH), tato varianta by však byla časově i výrobně velice náročná (velká spotřeba brousících kotoučů, časté přeměňování, nestálá teplota v neklimatizované dílně). Takto přesná výroba vyžaduje striktní dodržení výrobních pravidel při výrobě na elektroerozivních drátových řezačkách (Teplotní stálost, bezprašné prostředí, atd.). Tyto nepřesnosti při výrobě byly zapříčiněny vnitřním napětím v materiálu vzniklé při pájení. Měřicí trojdotek se vyrábí v sérii po čtyřech kusech (viz Obr. 30)

Místní ohřev svařovaného materiálu je příčinou vzniku nejen teplotního, ale současně i napěťového a deformačního pole. Tím, že chladný základní materiál nedovoluje, aby oblast svařového spoje volně dilatovala. Vytváří se jak v teplém zasažené oblasti, tak i v jejím okolí složitý napěťový stav provázený elastickými i plastickými deformacemi. Tyto deformace mají negativní vliv na konečné rozměry svařované

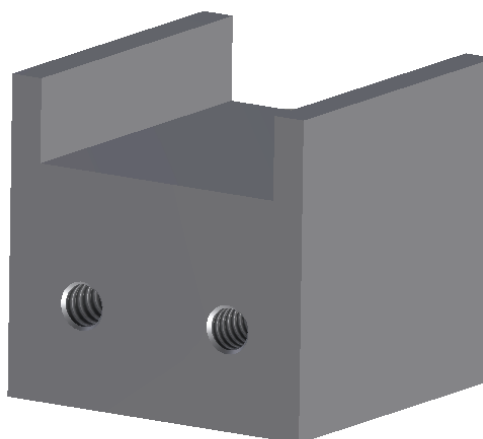
součástí. Pokud tepelné pnutí  $\sigma_t$  přesáhne mez kluzu, svařovaného materiálu dojde k elastické a i částečně k plastické deformaci [17].



Obr. 30 schematické znázornění výroby měřících trojdoteků

### 3.4 Technologičnost konstrukce trojdoteku

Tělo trojdoteku: (viz Obr. 31)

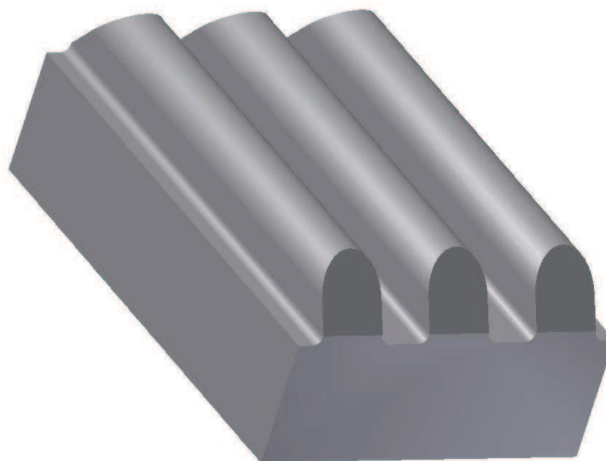


Obr. 31 Model Těla trojdoteku

**Materiál: 11 600.0** - Neušlechtilá konstrukční ocel obvyklé jakosti s vyšším obsahem uhlíku. Vhodná na strojní součásti namáhané staticky i dynamicky, u nichž

se nevyžaduje svařitelnost. Součásti vystavené velkému měrnému tlaku. Hřídele, osy, ozubená kola. Mez pevnosti  $R_m$  590 až 705 MPa.

Hlava trojdoteku: (viz Obr. 32)

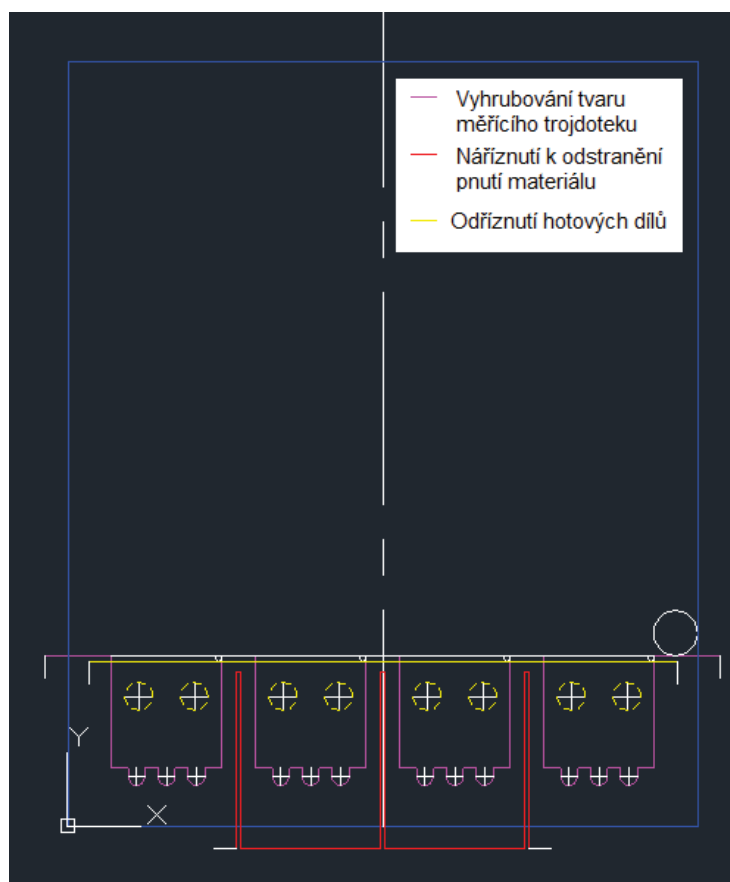


Obr. 32 Model Hlavy trojdoteku

**Materiál: CF-H40S** - Slinutý karbid od firmy Ceratizit Austria Gesellschaft m.b.h. je určený pro elektroerozivní drátové řezání (CF znamená corrosion free – nekorodující). Slinutý karbid se skládá z karbidu wolframu a kobaltu. Pojícím kovem je kobalt, který propůjčuje odolnost vůči zlomení. Z elektrochemického hlediska patří kobalt k neušlechtilým kovům. Při kontaktu s dielektrikem dochází k elektrochemické reakci (korozi materiálu), která je nazývána důlková koroze. Materiál dosahuje tvrdosti HRA 90.3 [11,8].

### 3.5 Řešení problému při výrobě

Aby bylo odstraněno pnutí v materiálu, byl navržen nový krok při elektroerozivním obrábění – vytvoření drážek mezi každým trojdotekem. V tomto naříznutí se pnutí, vzniklé při napájení hlavy trojdoteku k tělu, tzv. ztratí a tím nedochází k deformaci součásti. Před samotným vyřezáváním obrysu součásti se prvně vytvoří tyto zářezy a až po dokončení zářezů se začne s vyřezáváním (Obr. 33). Zařazením tohoto nového kroku při výrobě součásti docílíme odstranění zmetokovitosti. Drát typu CobraCut D objíždí tvar součásti 4x než dosáhneme požadovaných rozměrů, od hrubovacího cyklu až po dokončovací. Po dokončení vyřezávání obrysu dojde k odříznutí hotových dílů. Výroba 4 kusů měřících trojdoteků trvá zhruba 8 hodin, což činí výrobu velice nákladnou.



Obr. 33 Schematické znázornění výroby měřicích trojdoteků se zářezy

**Nástroj**

Při řezání byl použit drát CobraCut typ D (viz Obr. 23). Drát je vhodný pro vysokorychlostní řezání i pro přesné vyřezávání kontur obrobku. Drát má vysokou tepelnou a elektrickou vodivost. Základní charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 2.2 a jeho podélný průřez je zobrazen na obrázku 34 [12].

Tab. 2.2 Charakteristika drátu CobraCut type D [12].

	Materiál jádra	Materiál povlaku	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	Barva
Cobracut type D	CuZn20	CuZn50	800	1	Žlutá Hnědá



Obr. 34 Příčný řez drátem Cobracut typ D [12].

### 3.6 Technologický postup výroby

Postup:

1. Operace – Stroj: vertikální frézka FSG 25/32  
Zúhlovat materiál, vybrání pro plátky ze slinutého karbidu, hotově.
2. Operace – Stroj: souřadnicová vyvrtávačka WKV 63 nbsp (viz Obr. 35)  
Vrtat otvory pro závity včetně vyřezání závitů.



Obr. 35 souřadnicová vyvrtávačka WKV 63 nbsp

3. Operace – Pájení hlavy měřícího trojdoteku k tělu.
4. Operace – Stroj: bruska na plocho horizontální BPH 200 x 600 (viz Obr. 36)  
Zúhlovonat pro ED.



Obr. 36 Bruska na plocho horizontální BPH 200 x 600

5. Operace – Stroj: řezačka AGIE CLASSIC 2S (Obr. 27)

**a) Nařiznutí k odstranění pnutí materiálu,**

b) vyhrubování tvaru,

c) kalibrace (4x objetí),

d) odříznutí hotových dílů.

6. Operace – Pracoviště: zámečnická dílna: Odjehlení, popis, úprava.

Základní parametry strojů použitých při výrobě jsou uvedeny v příloze č. 3,4,5,6.

## ZÁVĚR

Práce se zabývá jednou z nekonvenčních metod obrábění - elektrojiskrovým drátovým řezáním. V úvodní části pojednává o principu a historickém vývoji elektrojiskrového obrábění. Dále se zabývá technologií elektroerozivního drátového řezání (WEDM), popisuje tuto metodu a její uplatnění ve výrobě. Elektroerozivní drátové řezání patří mezi technologie bez nutnosti dalšího opracování obráběné součásti, což činí tuto metodu velice efektivní. Metoda v dnešní době dosahuje dobrých drsností povrchů Ra 0,1  $\mu\text{m}$  a přesnosti až  $\pm 0,001$  mm což v praxi znamená, že metoda dokáže nahradit i broušení.

Při výrobě přesných měřících trojdoteků, v malé nástrojárně Kovo Jančo, byl podceňen vliv vnitřního pnutí materiálu při pájení hlavy trojdoteku a následného řezání na elektroerozivní drátové řezačce AGIE CLASSIC 2S. Čím více vneseme měrného tepla, tím větší budou i deformace součásti. Vlivem tohoto napětí docházelo k nedodržení tolerancí a tím pádem k výrobě zmetků. Aby bylo odstraněno toto napětí, došlo při výrobě měřících trojdoteků na základě spolupráce s nástrojárnou Kovo Jančo v rámci bakalářské práce k upravení technologického postupu – samotné řezání součásti předchází nový krok – vytvoření zářezů mezi jednotlivými trojdoteky. Vytvořením těchto zářezů bylo zamezeno plastické deformaci součásti a tím byla odstraněna zmetkovitost při výrobě.

Vývoj nových konstrukčních materiálů a potřeba k uspokojení poptávky trhu po flexibilní a přesné výrobě vede k zařazení nekonvenčních technologií, zvláště pak elektroerozivního drátového řezání při výrobě přesných dílců a nástrojů.

V každé nástrojárně nebo výrobním závodě zabývajícím se obráběním a výrobou přesných součástí, nastává v současné době situace, kdy je nutno řešit potřebu co nejefektivnějšího obrábění. Z tohoto důvodu má elektroerozivní drátové řezání slibnou budoucnost.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1989. 122 s.
2. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
3. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 1994. 102 s. ISBN 80-7082-161-2.
4. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. Nekonvenční metody obrábění. [online], kód článku: 070710.[vid. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
5. KURODA, H. Development of High Performance Coated Wire Electrodes for High-speed Cutting and Accurate Machining. Hitachi cable [online]. 2003, č. 11 [vid. 2012-04-18]. Dostupné z: [http://www.hitachi-cable.com/about/publish/review/\\_icsFiles/afieldfile/2005/11/29/h11.pdf](http://www.hitachi-cable.com/about/publish/review/_icsFiles/afieldfile/2005/11/29/h11.pdf)
6. *Kovo Jančo* [online]. 1998 [vid. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/kovo.janco/>
7. Elektroerozivní řezání drátem (Wire EDM). Sprutcam [online]. ©2010 [vid. 2012-04-18]. Dostupné z: <http://www.sprutcam.cz/metody-obrabeni/dratove-rezani>
8. Hard materials matters. Hard metal for tool and die industry [online]. 2008[vid. 2012-04-18]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/ceratizit/hard-metal-for-the-tool-and-die-industry/24084-128934.html>
9. When to EDM. [online]. 2008[vid. 2012-04-18]. Dostupné z: [http://us.gfac.com/products/edm/When\\_to\\_EDM\\_JULY08.pdf](http://us.gfac.com/products/edm/When_to_EDM_JULY08.pdf)
10. FISHER, G. et al. Příručka pro uživatele C. AGIE CHARMILLES GROUP. 2000
11. ŠTIPÁK, V. Nová výkonová dimenze pro drátové obrábění tvrdokovů. MM průmyslové spektrum [online]. 2006, č. 12 [vid. 2012-04-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-vykonova-dimenze-pro-dratove-obrabeni-tvrdokovu.html>
12. Coated EDM wires. Cobracut® type D [online]. © 2012 [vid. 2012-04-19]. Dostupné z: [http://www.bedra.com/products/edm\\_wire/coated\\_edm\\_wires/cobracut/cobracut\\_type\\_d/index\\_eng.html](http://www.bedra.com/products/edm_wire/coated_edm_wires/cobracut/cobracut_type_d/index_eng.html)
13. Ventily, ventilové pružiny, vodítka ventilů. Vačkový hřídel, ventily [online]. [vid. 2012-04-19]. Dostupné z: [http://kotamuda.humlak.cz/navody\\_manualy/127/HTM/HTM2/motor/vackovy.htm](http://kotamuda.humlak.cz/navody_manualy/127/HTM/HTM2/motor/vackovy.htm)

14. Engine valves. *TRW Engine components* [online]. © TRW Automotive 2012 [vid. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.trw-ec.com/en/products/product-range/engine-valves/>
15. SOMMER, C a S SOMMER. Complete EDM handbook. *Wire EDM* [online]. 2009[vid. 2012-04-19]. Dostupné z: <http://www.reliableedm.com/Free-Complete%20EDM%20Handbook.htm>
16. Demineralizovaná voda. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [vid. 2012-04-22]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Deionizovan%C3%A1\\_voda](http://cs.wikipedia.org/wiki/Deionizovan%C3%A1_voda)
17. ŽÁK, Jan a Miroslav NOVÁK. *Teorie svařování*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1988, 142 s.
18. Brusky na plocho. *BPH 200* [online]. 2009 [vid. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.opravybrusek.cz/stroje/BPH200/>
19. Fermat. *Frézka FGS 25/32* [online]. 2008 [vid. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.fermatmachinery.com/cs/used-machines/20-Frezka/101813-FGS-2532.html>
20. Fermat. *Souřadnicová WKV63* [online]. 2008 [vid. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.fermatmachinery.com/cs/used-machines/13102-souradnicova/101472-WKV-63.html>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

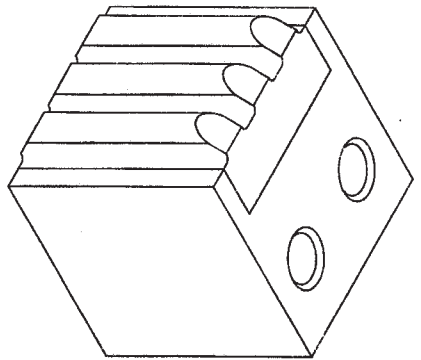
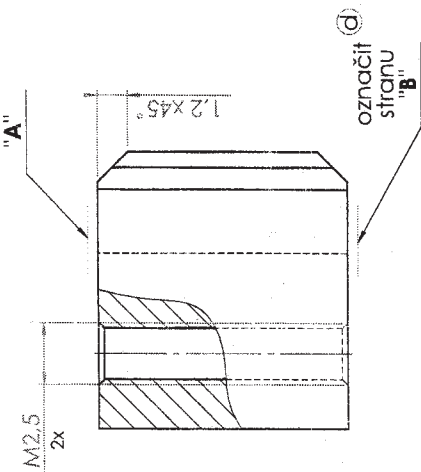
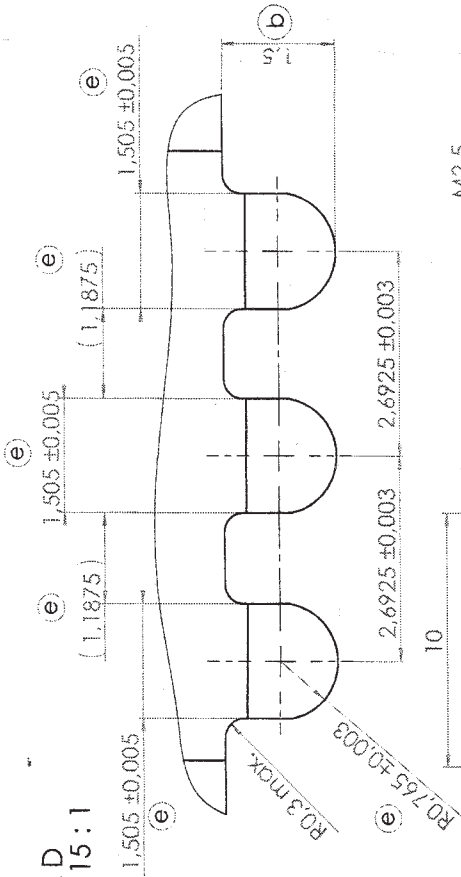
<b>Zkratka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
AJM	[-]	Obrábění proudem brusiva (z angl. Abrasive Jet Machining)
CAD	[-]	počítačové projektování, počítačem podporované navrhování (z angl. Computer Aided Design)
CAM	[-]	počítačem podporovaná výroba (z angl. Computer Aided Manufacturing)
CIM	[-]	Počítačem integrovaná výroba (z angl. Computer integrated manufacturing)
CM	[-]	Chemické obrábění (z angl. Chemical Machining)
CNC	[-]	Řízení obráběcího stroje počítačem, resp. Programem (z angl. Computer Numerical Control)
EBM	[-]	Obrábění elektronovým paprskem (z angl. Electron Beam Machinig)
EDM	[-]	Elektroerozivní obrábění (z angl. Electro Discharge Machining)
HRA	[-]	Hodnota tvrdosti podle Rockwella
IBM	[-]	Obrábění iontovým paprskem (z angl. Ion Beam Machinig)
KNB	[-]	Kubický nitrid bóru
LBM	[-]	Obrábění paprskem laseru (z angl. Laser Beam Machinig)
NC	[-]	Číslicové ovládání (z angl. Numeric kontrol)
NMO	[-]	Nekonvenční metody obrábění
PAM	[-]	Obrábění paprskem plasmu (z angl. Plasma Arc Machining)
PCM	[-]	Fotochemické obrábění (z angl. Photochemical Machining)
RC	[-]	Obvod s odporem a kondenzátorem
RLC	[-]	Obvod s odporem, kondenzátorem a indukčností

RO	[-]	Rychlořezná ocel
SK	[-]	Slinutý karbid
USM	[-]	Obrábění ultrazvukem (z angl. Ultrasonic Machining)
WEDM	[-]	Elektroerozivní drátové řezání (z angl. Wire Electrical Discharge Machining)
WJM	[-]	Obrábění kapalinovým paprskem (z angl. Water Jet Machining)
Al	[-]	Chemická značka – hliník
Cu	[-]	Chemická značka – měď
Si3N4	[-]	Nitrid křemíku – neoxidická keramika
SiC	[-]	Karbid křemíku
TiN	[-]	Nitrid titanu
<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
I	[A]	pracovní proud výboje
I <sub>e</sub>	[A]	střední vybíjejíci proud
R <sub>a</sub>	[μm]	Střední aritmetická úchylka
R <sub>m</sub>	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
T	[s <sup>-1</sup> ]	Doba periody
U	[V]	napětí
U <sub>e</sub>	[V]	střední vybíjejíci napětí
U <sub>k</sub>	[V]	napětí při zhasnutí výboje
U <sub>z</sub>	[V]	napětí naprázdno
V <sub>0</sub>	[mm <sup>3</sup> ]	objemový úbytek obrobku
V <sub>i</sub>	[mm <sup>3</sup> ]	množství odebraného materiálu
V <sub>n</sub>	[mm <sup>3</sup> ]	Objemový úbytek nástroje
W <sub>i</sub>	[J]	energie výboje
I <sub>e</sub>	[A]	střední vybíjejíci proud
h	[Mm]	Hloubka kráteru
k	[-]	součinitel úměrnosti pro katodu a anodu
t <sub>d</sub>	[s <sup>-1</sup> ]	doba zpoždění výboje
t <sub>e</sub>	[s <sup>-1</sup> ]	doba výboje
t <sub>i</sub>	[s <sup>-1</sup> ]	doba impulsu
t <sub>o</sub>	[s <sup>-1</sup> ]	doba pauzy
γ	[%]	relativní poměrné opotřebení
Ø d	[mm]	Průměr kráteru
σ <sub>t</sub>	[MPa]	Tepelné pnutí

**SEZNAM PŘÍLOH**

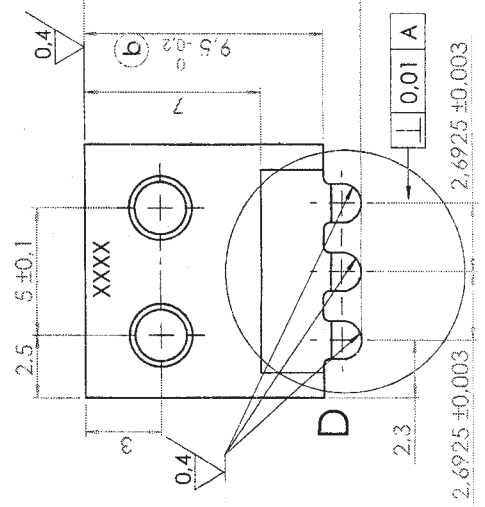
- Příloha 1 Výrobní výkres měřícího trojdoteku
- Příloha 2 Výkres motorového ventilu
- Příloha 3 Technické parametry souřadnicové vyvrtávačky WKV 63 [20]
- Příloha 4 Technické parametry horizontální brusky na plocho BPH 200 x 600 [18]
- Příloha 5 Technické parametry elektroerozivní drátové řezačky AGIE CLASSIC 2S [10]
- Příloha 6 Technické parametry vertikální frézky FGS 25/32 [19]

DETAIL D  
MÉRÍTKO 15 : 1



XXXX  
OZNAČIT  
3 - 51 - 031 / 4  
R 0.786

ODCHYLKA VÝŠKY  
JEDNOTLIVÝCH VRCHOLŮ RÁDIUSŮ  
MAX. 0.003 MEZI SEBOU



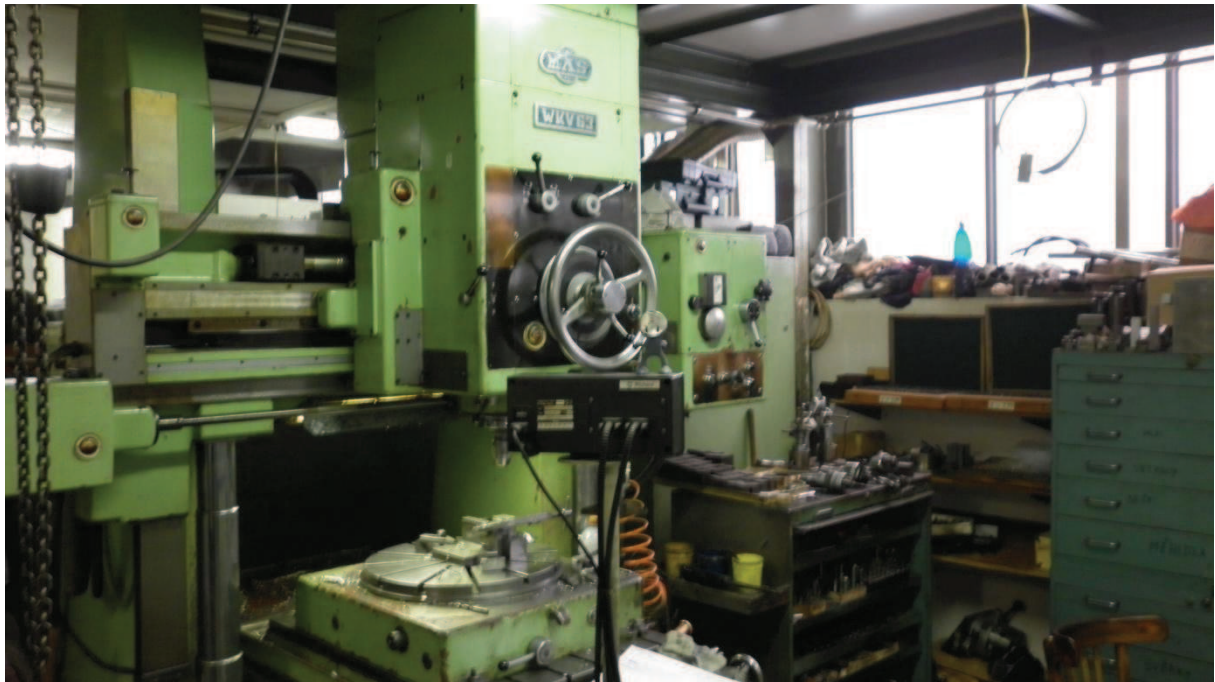
TVRDOKOV PÁJET MOSAZÍ

1	TVRDOKOV	SK	11600	číslo výkresu	2
1	TĚLESO TROJDOTEKU	11600	1	poz.	1
kusů	název - rozměr	11600	1	číslo výkresu	2
e	ZMĚNA KÓT	14.1.08	Štokr	TRW-DAS a.s. Dačice	
d	DOPLNĚNÍ OZNAČENÍ STRAN	12.12.06	Štokr	ZÁVOD VENTILY	
c	ZMĚNA KÓT	13.12.05	Štokr		
IND.	ZMĚNA	DAT.	PODPIS		
NETOLEROVANE ROZMĚRY DIN ISO 2768-m					
HRANY DLE: $\begin{matrix} +0.1 \\ -0.2 \\ -0.2 \end{matrix}$					
DIN ISO 13715					
ZPRACOVÁNO V: SolidWorks 2006					
VÝPRAC. Štokr M. 14.11.2005					
PREZK.					
TYP: STARÝ V. PRO STROJ: AM. Formát					
NÁZEV: ČÍSLO VÝKRESU: 3 - 51 - 031 / 4 A3					





## Příloha 3



Druh stroje:  
Výrobce:

Souřadnicová vyvrtávačka WKV 63  
Kovosvit MAS

### Hlavní parametry:

Rozměry stolu	630x900 [mm]
Výkon elektromotoru	2.2 [kW]
Rozměry délka x šířka x výška	2793x2220x2445 [mm]
Hmotnost stroje	6100 [kg]
Podélné přestavení stolu (Z)	850 [mm]
Svislé přestavení příčnicku	550 [mm]
Vzdálenost mezi vřetenem a stolem	200-750 [mm]
Průměr pinoly koníku	110 [mm]
Posuvy stolu plynule měnitelné	23-230 [mm/min]
Rychloposuv stolu	2300 [mm/min]

## Příloha 4



Druh stroje:

Bruska na plocho horizontální BPH 200 x 600

Hlavní parametry:

upínací plocha stolu (šířka x délka)	200 x 600 [mm]
rozměry brousícího kotouče (průměr x šířka x výška)	250 x 20 x 76 [mm]
půdorysná plocha stroje (výška x šířka x délka)	2100 x 1400 x 1800 [mm]
hmotnost stroje s normálním příslušenstvím	1800 [kg]

## Příloha 5



Druh stroje:  
Výrobce:

AGIE CLASSIC 2S  
Agie Charmilles

### Hlavní parametry:

Rozměr stroje	1640x2040x2220 [mm]
Hmotnost stroje	2580 [kg]
Max. rozměr dílce	750x550x250 [mm]
Max. váha dílce	450 [kg]
Přejížděcí dráhy	350/250/256 [mm] (osy X/Y/Z) ±70/±70 [mm] (osy U/V)
Rychloběh	900 [mm/min] (osy X, Y) 600 [mm/min] (osy U, V, Z)
Navlékatelná výška drátu	až 250 [mm]
Max. váha cívky drátu	až 16 [kg]
Posuvy stolu plynule měnitelné	23-230 [mm/min]
Likvidace drátu	Automatická sekačka

## Příloha 6



Druh stroje:  
Výrobce:

Vertikální frézka FGS 25/32  
TOS Olomouc

Hlavní parametry:

Rozměry stolu	1000x320 [mm]
Podélný posuv (X)	720 [mm]
Svislý posuv (Z)	420 [mm]
Příčný posuv (Y)	360 [mm]
Rozměry stroje	2560x2560x1820 [mm]
Hmotnost stroje	2310 [kg]