



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## OBRÁBĚNÍ MATERIÁLŮ PRO ŘEZNÉ NÁSTROJE, ZA VYUŽITÍM METOD EDM, SE ZAMĚŘENÍM NA OPTIMALIZACI VÝROBNÍHO PROCESU

ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF MATERIALS FOR CUTTING  
TOOLS WITH FOCUS ON MANUFACTURING PROCESS OPTIMALIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

RADANA NOVÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. MARTIN SLANÝ

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Radana Nováková

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:

### **Obrábění materiálů pro řezné nástroje, za využití metod EDM, se zaměřením na optimalizaci výrobního procesu**

v anglickém jazyce:

### **Electrical Discharge Machining of Materials for Cutting Tools with Focus on Manufacturing Process Optimization**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zaměřena na technologii elektroerozivního dělení a obrábění materiálů vhodných pro výrobu řezných nástrojů. Práce by měla zahrnovat stručný popis zvolené technologie, vstupní parametry pro samotný proces obrábění a následně vyhodnocení zvolených výstupních parametrů. Na základě provedených kvalitativních měření výsledného povrchu bude provedena optimalizace procesu. Výstupem tedy bude zefektivnění samotného procesu obrábění a následně shromáždění a zanesení vstupních dat, pro nastavení řezných podmínek pro opakovanou výrobu, do materiálové knihovny spolupracující firmy.

Cíle bakalářské práce:

Princip a charakteristické vlastnosti elektroeroze, rozbor obráběných a obráběcích materiálů, studie a nastavení optimálních obráběcích podmínek pro konkrétní díl, porovnání a vyhodnocení dosažených výsledků, návrh pro efektivnější opakovanou výrobu.

Seznam odborné literatury:

OBERG, E., JONES, F.D., HORTON, H.L., RYFFEL, H.H. Machinery's hand-book. 25th Edition. New York: Industrial Press Inc., 1996. 2547 s. ISBN 0-8311-2595-0.

MAŇKOVÁ, I. Progresivní technologie, 1 vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

ŘASA, J., POKORNÝ, P. a GABRIEL, V. Strojírenská technologie 3 – 2. díl. Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění. 1. vyd. Praha: Scientia 2001. 221 s. ISBN 80-7183-227-8.

MIKOVEC, M. Obrábění materiálů s velkou tvrdostí a pevností. 1. vyd. Praha: SNTL, 1982. 196 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Slaný

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

V Brně, dne 29.11.2011

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

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

**ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou elektroerozivního hloubení, se zaměřením na optimalizaci výrobního procesu. Především poukazuje na faktory ovlivňující vlastní průběh obrábění.

**Klíčová slova**

elektroerozivní hloubení, generátor, nástrojová elektroda, dielektrikum, test efektivity

**ABSTRACT**

This bachelor thesis describes and deals with the electro discharge machining, with a focus on optimizing the production process. In particular points to the factors influencing the course of machining.

**Key words**

electrical discharge sinking, generator, tool electrode, dielectric, test of affectivity

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

NOVÁKOVÁ, Radana. *Obrábění materiálů pro řezné nástroje, za využitím metod EDM, se zaměřením na optimalizaci výrobního procesu*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 41 stran. 7 příloh.

### **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Obrábění materiálů pro řezné nástroje, za využitím metod EDM, se zaměřením na optimalizaci výrobního procesu** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Radana Nováková

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych ráda poděkovala Ing. Martinu Slanému za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce.

Zejména také děkuji zaměstnancům firmy Tyco Electronics Czech s.r.o. Kuřim, konkrétně Ing. Jiřímu Konrádovi a Ing. Adamovi Šurdovi za možnost realizace. Petru Hladíkovi a Davidu Beťákovi za znalecké posudky a podporu při uskutečnění praktického testu.

Poděkování patří také aplikačnímu a servisnímu technikovi Miloslavu Pernicovi z diagnostického centra Agie Charmilles s.r.o., za poskytnuté informace a konzultace.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ .....	7
OBSAH.....	8
ÚVOD.....	10
DEFINOVÁNÍ CÍLŮ .....	11
1 HISTORIE A ROZVOJ ELEKTROEROZIVNÍHO OBRÁBĚNÍ.....	12
1.1 Základy elektroeroze.....	12
1.2 Historie elektroerozivního obrábění .....	12
1.3 Rozvoj technologie po současnost.....	13
1.4 Základní rozdělení NMO .....	14
2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ .....	15
2.1 Princip technologie .....	15
2.2 Průběh jednoho impulzu .....	17
2.3 Charakteristika výboje .....	21
2.3.1 Základní fyzikální charakteristiky .....	22
2.3.2 Typy elektrických výbojů.....	24
3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PROCES EDM OBRÁBĚNÍ .....	25
3.1 Zdroje elektrické energie (generátory) .....	25
3.1.1 Vývoj generátorů .....	25
3.1.2 Rozdělení generátorů.....	25
3.1.3 Vůle jiskrového výboje (GAP).....	27
3.1.4 Charakteristika generátorů.....	28
3.1.5 Údržba generátorů .....	29
3.1.6 Volba generátorů .....	29
3.2 Technologická příprava elektrody .....	30
3.2.1 Volba rozměrů .....	30
3.2.2 Opotřebení .....	30
3.3 Dielektrikum .....	31
3.3.1 Vyplachování.....	32
3.4 Úpnutí součásti a nástroje .....	33
3.5 Geometrie stroje.....	33
3.6 Teplota prostředí .....	33
4 PRAKTICKÝ TEST .....	34
4.1 Cíl testu .....	34



4.2 Stroj pro realizovaný experiment.....	34
4.3 Analýza a číselné vyhodnocení testu .....	35
4.4 Grafické vyhodnocení testu .....	36
ZÁVĚR .....	37
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	38
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	39
SEZNAM PŘÍLOH.....	41

## ÚVOD

Elektroerozivní hloubení je využíváno zejména pro obrábění obtížně obrobitelných materiálů a tvarově složitých součástí, vnějších i vnitřních ploch. Používá se pro vyrábění forem speciálních tvarů a dutin nebo objemů složitého tvaru. Dutina je vyrobena pomocí nástrojové elektrody, jejíž tvar je totožný, pouze offsetově zmenšený. Tento způsob obrábění nachází velké uplatnění při výrobě střížných a lisovacích nástrojů pro sériovou výrobu kovových, plastových a skleněných součástí. Dále pro výrobu tvářecích a vstřikovacích forem a speciálně tvarovaných dutin.

Pro práci jsem si zvolila téma „Obrábění materiálů pro řezné nástroje, za využitím metod EDM, se zaměřením na optimalizaci výrobního procesu“. K tomuto rozhodnutí přispěla především skutečnost, že v současné době pracuji v této oblasti nekonvenční metody technologie (dále jen NMO) jako Toolmaker ve společnosti Tyco Electronics s.r.o.

Na rozdíl od klasického třískového obrábění, není obrobitelnost materiálu při využití NMO vázána mechanickými vlastnostmi (pevnost, tvrdost), nýbrž vlastnostmi fyzikálními, jako je tepelná vodivost, elektrická vodivost, teplota tavení, chemické složení a jiné.

Průběh procesu elektroerozivního hloubení ovlivňuje množství vstupních faktorů, které mají podstatný vliv nejen na výslednou kvalitu obrobenej plochy, ale i na rozměrovou či tvarovou přesnost součástí.

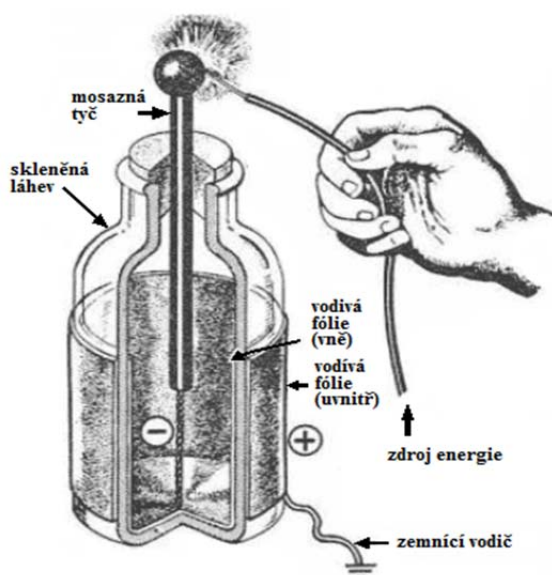
## **DEFINOVÁNÍ CÍLŮ**

Cílem práce je náhled do problematiky v oblasti elektroerozivního hloubení, s úmyslem možné optimalizace výroby, poukázáním na sekundární parametry doprovázející vlastní průběh obrábění. U těchto jednotlivých parametrů budou definovány vlivy, které kvalitu obrábění zhoršují. Dalším cílem je analýza praktického testu se zaměřením na efektivitu obrábění v závislosti na použití tří druhů materiálů pracovního nástroje – elektrody.

# 1 HISTORIE A ROZVOJ ELEKTROEROZIVNÍHO OBRÁBĚNÍ

## 1.1 Základy elektroeroze

Počáteční výzkumy elektrostatického jevu byly zpozorovány v roce 1745, kdy byla vynalezena takzvaná Leydenova láhev (název dle univerzity Leyden v Nizozemí) při experimentech s elektřinou. Tuto láhev, která byla prvním záměrně konstruovaným kapacitorem, vytvořil německý fyzik Jürgen George von Kleist, když hledal způsob jak akumulovat energii. Baňka obsahovala vodu nebo rtuť a byla oplepena oboustranně vodivým materiálem. Z vnitřního polepu byl hrdlem veden do láhve kovový vodič a sklo sloužilo jako dielektrikum oddělující oba polepy (viz. Obr. 1). O pár let později skupina vědců zjistila, že voda není nezbytná, ale kovová slupka vně i uvnitř baňky je pro tvorbu elektrostatické energie postačující. Tak tedy vznikly první kapacitory.<sup>1</sup>



Obr. 1 Leydenova nádoba<sup>2</sup>.

## 1.2 Historie elektroerozivního obrábění

Tento elektro-tepelný způsob úběru materiálu pracuje na základě fyzikálního jevu, běžně označovaný jako elektroeroze. Roku 1766 anglický vědec Joseph Priestley vyzoroval při studii chování plynů, že na vodivých (kovových) plochách při elektrickém výboji v plynu, vznikají krátery (viz. Obr. 2a). Tento jev se stal předmětem výzkumu v oblasti fyziky.

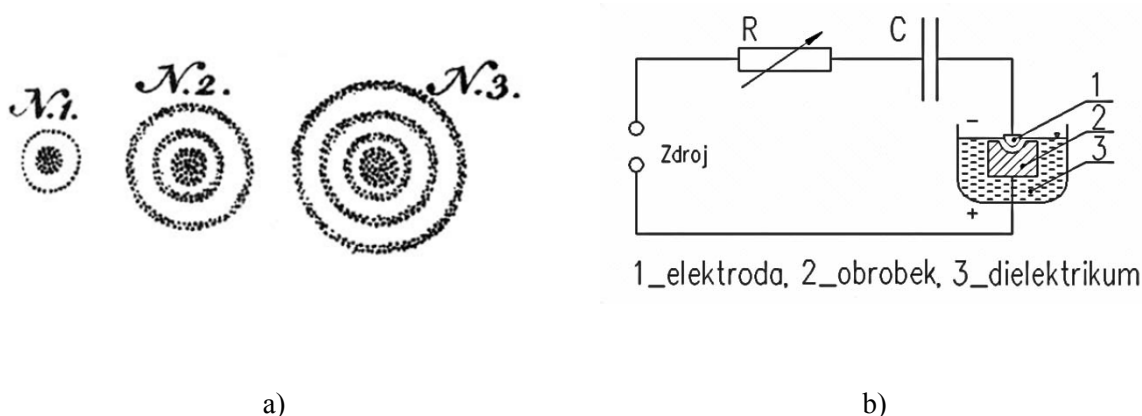
S nápadem využití destruktivních účinků elektrických výbojů a vytvoření procesu kontrolovaného obrábění kovů přišel Ruský pár vědců Dr. Boris and Dr. Natalya Lazarenko, kteří v letech 1938 až 1944 prováděli průzkum zaměřený na eliminování erozivního efektu na elektrických kontaktech. Roku 1943 vylepšili proces jiskrového obrábění, který se takto nazývá kvůli elektrickým výbojům mezi dvěma proudovými vodiči ponořenými v kapalině. Na základě svých výzkumů definovali následující zákonitosti elektroeroze:

- všechny elektricky vodivé materiály podléhají elektrické erozi,

- materiály podléhají elektrické erozi jak v plynném tak v kapalném prostředí s vysokým elektrickým odporem (dielektrikum),
- správnou volbou pracovních parametrů a vhodným zapojením obvodu, lze docílit dvou různých druhů výboje:
  - stacionární výboj, tj. oblouk,
  - nestacionární výboj, tj. jiskra.

Vhodným zapojením a volbou parametrů obvodu lze docílit přeměnu stacionárního výboje (oblouku) na opakované nestacionární výboje umožňující podstatně přesnější rozrušování materiálu (viz. Obr. 2b). Princip tehdy použitelného výbojového generátoru nazval Lazarenko obvod a používal se mnoho let při konstrukci generátorů pro elektroerozivní obrábění (dále jen EDM) stroje. V určitých aplikacích se tento typ, poněkud vylepšený, používá ještě v dnešní době.

V roce 1952 společnost Charmilles (Švýcarsko) zahájila program výzkumu a vývoje, v jehož rámci zkonstruovala první stroj na jiskrové obrábění. Tento stroj byl roku 1955 vystaven na Evropské výstavě obráběcích strojů v Miláně.<sup>3</sup>



Obr. 2 a) Nákresy elektroerozivních kráteru na katodě od J. Priestleyho.<sup>4</sup>

b) Lazarenkovo zapojení.<sup>5</sup>

### 1.3 Rozvoj technologie po současnost

Impulz k rozvoji nekonvenčních metod samých pocházel zejména ze zvyšujících se požadavků zbrojního a kosmického průmyslu na obrábění těžkoobrobitelných nových materiálů nebo složitých tvarů. Pro tyto oblasti byly soustředěny potřebné finanční prostředky a vědeckovýzkumné kapacity pro úspěšné dokončení vývoje a zavedení nových zařízení do výrobní praxe. Jednotlivé NMO se rychle rozšířily do všech odvětví strojírenské výroby a jejich další vývoj neustále pokračuje.

K rozšiřování těchto progresivních technologií vedly nároky kladené na tvarovou složitost střížných, tvářecích a řezných nástrojů (z RO a SK), na výrobu přesných a drobných součástí nebo také na konstrukci strojních elementů, kdy je požadován nárůst podílů těžkoobrobitelných materiálů (žárovzdorné, žárupevné materiály).

Využití technologických operací při výrobě náradí uskutečněné elektrickými metodami obrábění, je cca 10 % v celosvětovém měřítku (ve vyspělých státech 40 až 60 %). Až v

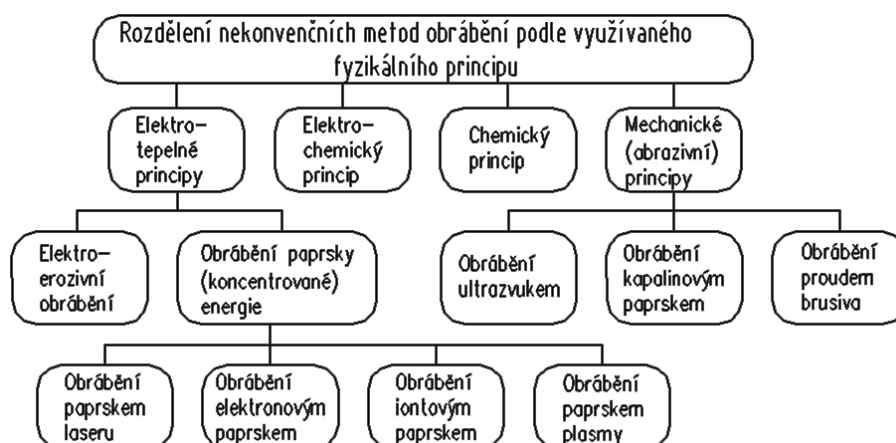
posledních 20 letech se tato technologie začala prosazovat proti konvenčnímu obrábění. Společnost Charmilles Technologies stále vynakládá úsilí v oblasti vývoje generátorů a zdokonaluje své programy pro obráběcí stroje. Z důvodu zvýšení produktivity se pro vlastní obsluhu procesu obrábění stále více používá měřicích stanic a robotizovaných pracovišť pro manipulaci s obrobkem a elektrodami. Pracovníkům obsluhy poté vzniká prostor pro zvládnutí dalších úkolů. Pozoruhodný vývoj elektrojiskrového obrábění EDM je rovněž důsledkem vytrvalosti mnoha dalších výzkumníků, kteří přispěli k demonstraci základních charakteristik této metody obrábění a maximálně dnes využili její výhody.<sup>3 6</sup>

#### 1.4 Základní rozdělení NMO

Jednotlivé NMO se liší především dle fyzikálních účinků použitých pro obrábění. Na obr. 3 je celkové rozdělení NMO na základě využívaného fyzikálního principu. Uvedené názvy jsou běžně užívány v praxi.

NMO s elektro-tepelným principem využívají pro řízené odpařování materiálu převážně teplo. Elektrochemické obrábění kovů je založeno na intenzivní elektrolyze známé z galvanických procesů. Elektroerozivní a elektrochemické obrábění zahrnujeme pod společný název *elektrické metody obrábění*, díky přímému působení elektrického proudu na úběr materiálu.

Podstatou NMO s chemickým principem je přímé využití chemických reakcí pro obrábění. Mechanické (abrazivní) metody obrábění jsou založeny na stimulaci abrazivních nebo erozivních účinků vhodných látek, např. kapalin a brusiv.<sup>6</sup>



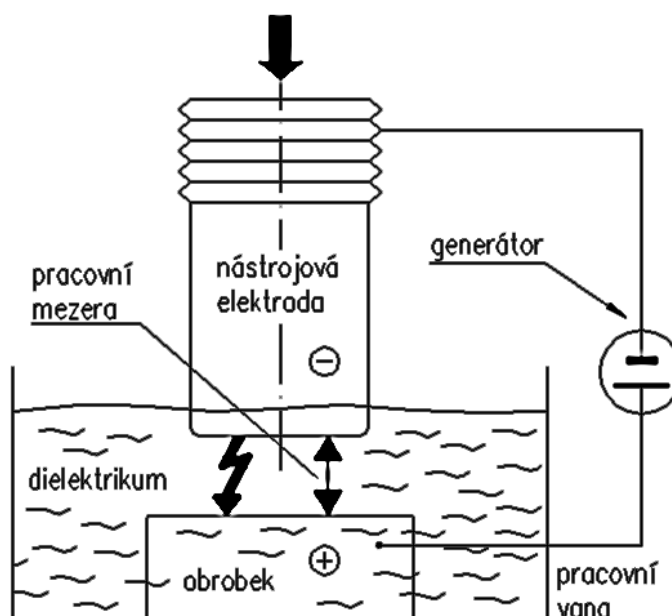
Obr. 3 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění.<sup>6</sup>

## 2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

### 2.1 Princip technologie

Úběr materiálu pomocí elektrického výboje je komplexní fyzikální jev. Elektroerozivní obrábění probíhá mezi dvěma elektrodami ponořených do pracovního média, jak je patrné z obr. 4. Tímto médiem je kapalina s vysokým elektrickým odporem, tj. dielektrikum. Abychom vygenerovali výboj mezi dvěma elektrodami, je nutné přivést na elektrody napětí, které je větší než vypínací napětí mezery (prostor mezi elektrodou a obrobkem). Faktory ovlivňující velikost tohoto napětí závisí na:

- vzdálenosti mezi elektrodou a obrobkem,
- izolačních vlastnostech dielektrika (vodivost),
- stupni znečištění dielektrika.



Obr. 4 Schéma principu elektroerozivního obrábění.<sup>7</sup>

Ke vzniku výboje dochází v místě nejintenzivnějšího působení elektrického napětíového pole. Mezi elektrodami se vlivem působení elektrického napětíového pole uvádějí do pohybu volné kladné a záporné ionty, které postupně nabývají vysoké rychlosti. Tímto se vytvoří vodivý (ionizovaný) kanál. V tomto stádiu začíná mezi elektrodou a obrobkem protékat elektrický proud s následným vznikem výboje, který způsobuje řadu dalších srážek částic. Plazmové pásmo, které tímto vzniká, dosahuje vysokých teplot (3 000 až 12 000°C, dáno typem výboje), při kterých dochází k tavení a odpařování materiálu na povrchu elektrod.

Současně s tímto procesem dochází k odpařování dielektrika, což způsobuje vznik plynové bubliny s vysokým tlakem. V momentě přerušení proudu vyvolá snížení teploty implozi této bubliny. Poté dielektrikum začne pronikat do uzavřeného prostoru a velké dynamické síly vymrštují roztavený materiál z kráteru. Tento materiál v důsledku

chladícího účinku dielektrika tuhne a je jím odváděn ve formě drobných částec (tisíciny  $\text{mm}^3$ ). Optimální vzdálenost mezi elektrodami je udržována vhodným mechanismem (zpětná vazba). Při opakujících se výbojích mezi elektrodami ponořenými v kapalném dielektriku je odebrání materiálu na jedné z elektrod značnější než na druhé (v rozsahu 70% až 99% na obrobku).

Objem tohoto erodovaného kovu závisí na časové a energetické charakteristice výboje a na termofyzikálních vlastnostech kovu (tavná teplota a tepelná vodivost). Předpoklad úspěšného procesu obrábění je dosažení maximálního úbytku materiálu obrobku při minimálním úbytku nástrojové elektrody. Proto používáme podmínku zajišťující relativní objemový úbytek materiálu na nástroji a obrobku, viz. výpočtový vztah (1).

Relativní objemový úbytek:

$$\delta = \frac{V_n}{V_o} \cdot 100 [\%], \quad (1)$$

kde:  $\delta$  [%] je relativní objemový úbytek,

$V_n$  [ $\text{mm}^3$ ] je objemový úbytek nástroje,

$V_o$  [ $\text{mm}^3$ ] je objemový úbytek obrobku.

Úbytek nástrojové elektrody se dá ovlivnit volbou následujících podmínek obrábění:

- konstrukcí generátoru (charakteristika a četnost výbojů, polarita zapojení nástroje a obrobku),
- vhodným pracovním prostředím (dielektrikem),
- volbou správného materiálu nástrojové elektrody v závislosti na materiálu obrobku.

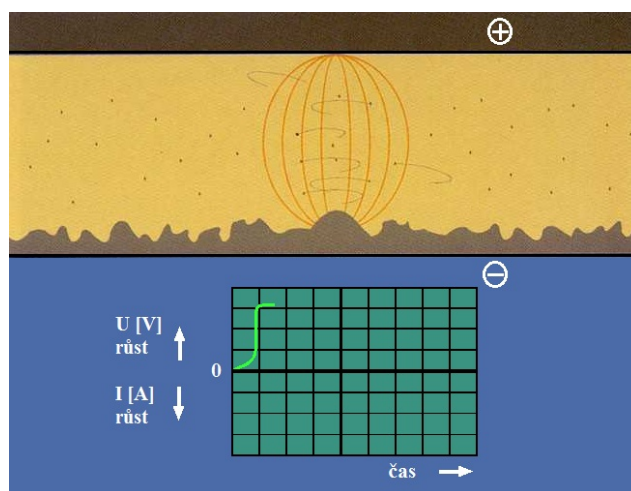
Při výboji mezi elektrodami převládá na počátku vodivost elektronová, později vzrůstá vodivost iontová. Převážná část energie se prvně uvolňuje v oblasti anody (+) a později v oblasti katody (-), přičemž uvolněná energie z anody se zmenšuje úměrně. Proto je vhodné při krátkých výbojových impulsích zapojit obrobek jako anodu, naopak při dlouhých impulsích jako katodu.<sup>3 7</sup>



## 2.2 Průběh jednoho impulsu

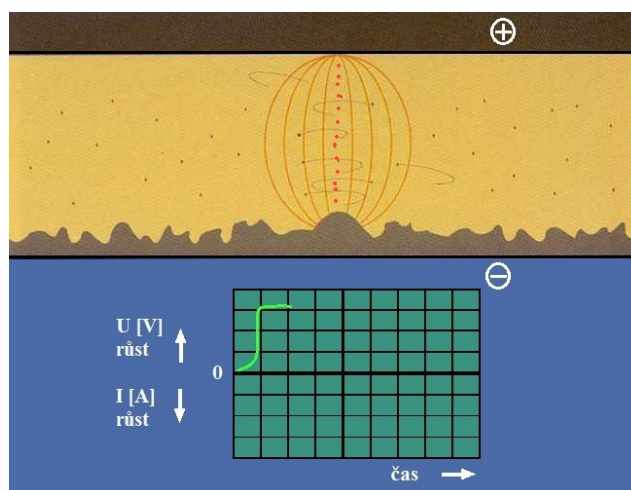
Časový průběh jednoho impulsu výboje se dělí do fází I až IX, které jsou zobrazeny na obr. 5 a-i, včetně grafů průběhu napětí a proudu mezi elektrodami. Tyto fáze lze následovně charakterizovat:

Fáze 1: V momentě přivedení napětí na obě elektrody, se mezi nimi začne generovat silný výboj (elektrické pole). Jeho vlivem začne v místě nejmenší vzdálenosti elektrody a obrobku, docházet k nejsilnější koncentraci kladných a záporných iontů. Do tohoto místa jsou vtahovány vodivé částice (nečistoty). Napětí roste, proud zůstává nulový.



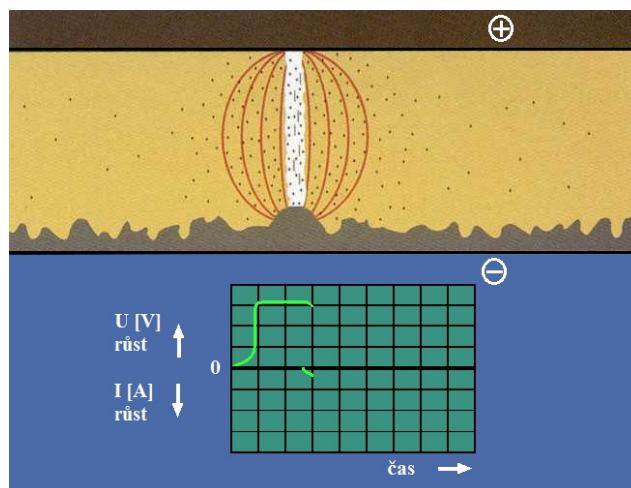
Obr. 5a Fáze I.<sup>8</sup>

Fáze 2: Množství izolovaných částic roste a velmi rychle vytvoří ionizovaný kanál, který je elektricky vodivý. Naopak dielektrikum své izolační vlastnosti podél úzkého kanálu postupně ztrácí. Vytvářejí se můstky potřebné k zapálení výboje. Napětí dosáhlo svého vrcholu, ale proud je stále nulový.



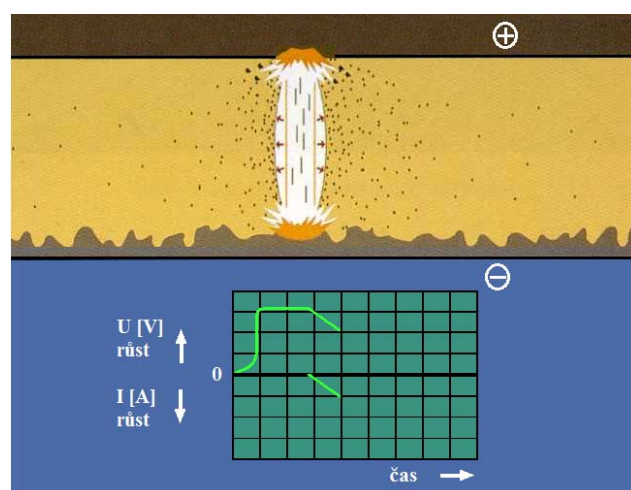
Obr. 5b Fáze I.<sup>8</sup>

Fáze 3: Působením elektrického pole se z katody začnou uvolňovat elektrony. Ty se sráží v prostoru s neutrálními částicemi a tříští se. Vzniká tak ionizační prostředí. Napětí klesá a proud začíná růst.



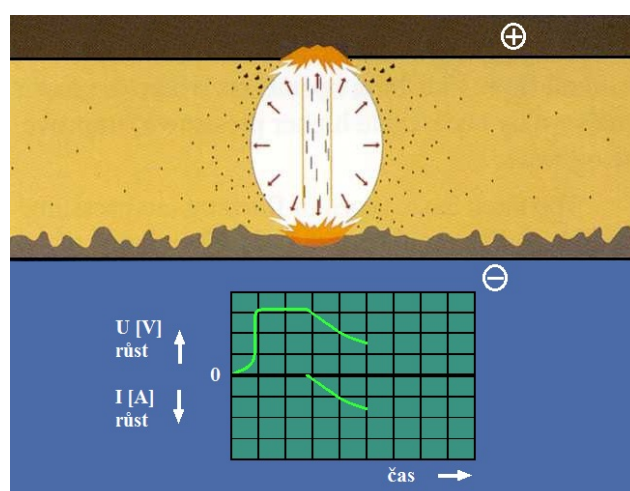
Obr. 5c Fáze III.<sup>8</sup>

Fáze 4: Ionty obalují střed budoucího výbojového kanálu. Začíná se vytvářet zóna plazmy. Dochází k odpařování malých částec obrobku a elektrody. Napětí na elektrodách klesá a proud rapidně roste, čímž se zvyšuje teplota v místě výboje.

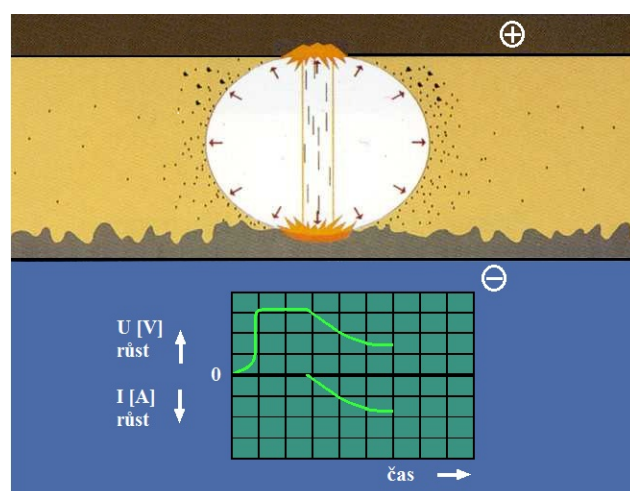


Obr. 5d Fáze IV.<sup>8</sup>

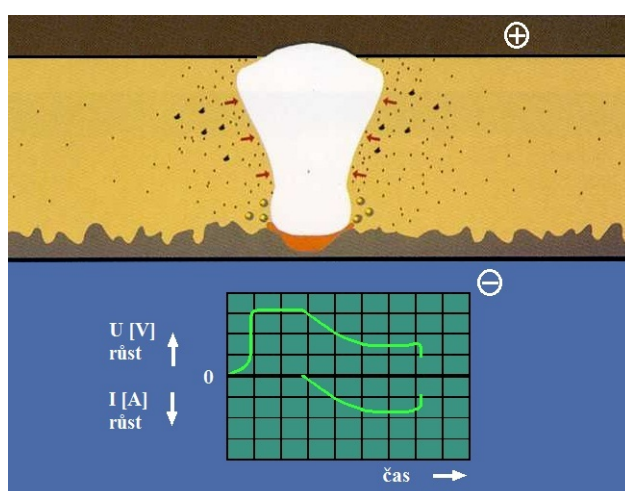
Fáze 5: Nastává odpařování dielektrika a vytváří se plynová bublina, jejíž tlak rovnoměrně vzrůstá až na velice vysokou hodnotu. V důsledku nárazu částic dochází k uvolnění vysokého množství tepelné energie v rozsahu 8 000 až 12 000°C. Nárazy elektronů na anodu a iontů na katodu způsobují ohřev povrchů obou elektrod, jejich tavení a odpařování. Protékající proud stále roste a napětí se ustaluje na tzv. zápalnou hodnotu výboje.

Obr. 5e Fáze V.<sup>8</sup>

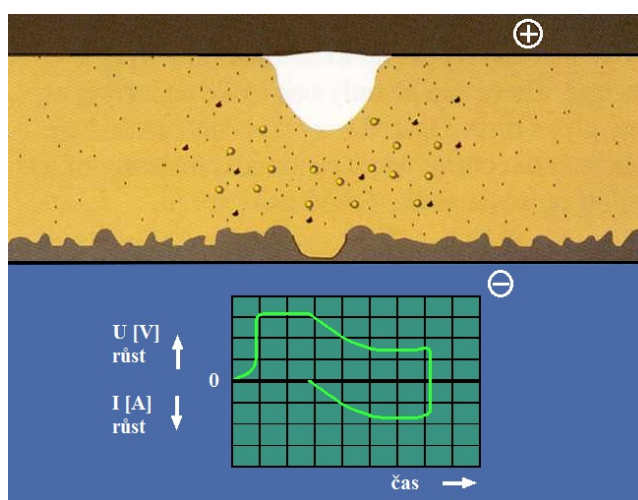
Fáze 6: Teplota a tlak uvnitř bubliny dosahují maxima. Tato intenzivní expanze má za následek intenzivní tavení a vypařování materiálu. Vrstva kovu přímo pod výbojovým sloupcem je v roztaveném stavu, ale je držena tlakem par bubliny. Proud již dosahuje maximální hodnoty.

Obr. 5f Fáze VI.<sup>8</sup>

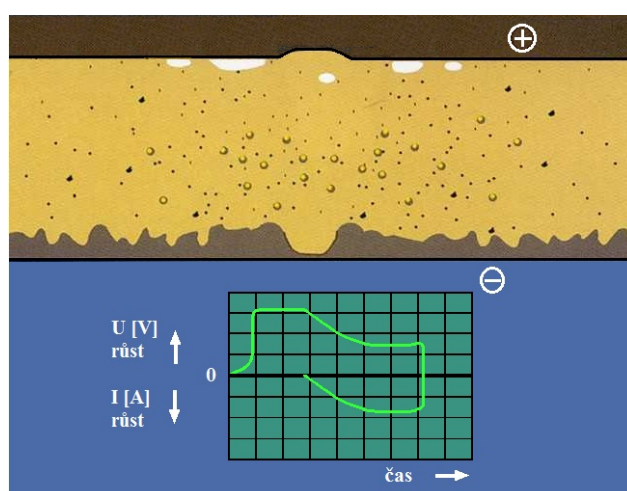
Fáze 7: Dochází k poklesu teploty způsobené přerušením přiváděné energie a úbytkem proudu v mezielektrodové mezeře. To má za příčinu začátek imploze plynové bubliny. Vlivem elektrického pole a poklesem tlaku plynů, dochází k vyvržení taveniny do prostoru (vznik kráteru). Pracovní proud a napětí v mezielektrodové mezeře se snižuje.

Obr. 5g Fáze VII.<sup>8</sup>

Fáze 8: Po zániku bubliny a výboje, vniká do vzniklého kráteru dielektrikum, které ochlazuje taveninu a zabraňuje průniku tepla do hlubší vrstvy obrobku. Erodivaný materiál poté tuhne v dielektriku do formy malých kuliček, které jím jsou následně vyplachovány. Proud i napětí klesá až na nulovou hodnotu.

Obr. 5h Fáze VIII.<sup>8</sup>

Fáze 9: Stav před začátkem nového výboje. Dielektrikum je znečištěno produkty eroze a obsahuje volné ionty, které jsou základem tvorby nového výboje. Zbývající páry stoupají k povrchu. Bez dostatečného času by se odpad mohl kumulovat, což by mohlo vést k vytvoření DC oblouku, který může poškodit elektrodu a obrobek.

Obr. 5h Fáze VIII.<sup>8</sup>

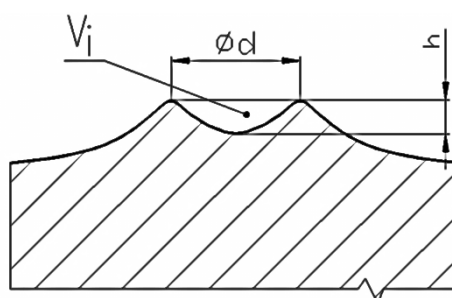
Tato sekvence reprezentuje jeden EDM cyklus. Eroze je v soustavě elektroda – obrobek asymetrická a závisí zejména na polaritě, tepelné vodivosti, teplotách tavení materiálů a na intenzitě výboje. Projevy této eroze na elektrodě nazýváme opotřebením, erozi na obrobku označujeme jako úběr materiálu.<sup>7,8</sup>

### 2.3 Charakteristika výboje

Rozměry vytvořeného kráteru jsou závislé na hodnotě přivedené energie a na časové prodlevě výboje. Trvání výboje se pohybuje mezi 0,0001 až 0,0001 sekundy. Drsnost a přesnost obrobenej plochy je přímo závislá na velikosti kráteru, ta je určena průměrem  $d$  a hloubkou  $h$ . Množství odebraného materiálu lze spočítat dle výpočtového vztahu (2). Zvětšený profil vzniklého kráteru je zobrazen na obr. 6.

$$V_i = k \cdot W_i [mm^3], \quad (2)$$

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

Obr. 6 Profil kráteru.<sup>7</sup>

Z rovnice (2) plyne, že velikost odebraného materiálu je přímo úměrná velikosti energie jednotlivého výboje, viz. výpočtový vztah (3).

Energie jednotlivého výboje:

$$W_i = \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt [J], \quad (3)$$

kde:  $T$  [ $\mu\text{s}$ ] je perioda výboje,  
 $u$  [V] je napětí,  
 $i$  [A] je proud.

Celkové množství odebraného materiálu za jednotku času (resp. objemový výkon obrábění), je dán součtem úbytků na obou elektrodách, viz. výpočtový vztah (4). Z této rovnice vyplývá, že rychlost úběru je přímo úměrná frekvenci výbojů, napětí, proudu a tvorbě trvání výboje. Dosahovaný úběr materiálu se pohybuje v rozmezí 8 až 10  $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ .

Objemový výkon obrábění:

$$Q_v = k \cdot f \cdot r \cdot \eta \cdot W_i [mm^3 \cdot s], \quad (4)$$

kde:  $k$  [—] je součinitel úměrnosti pro anodu a katodu,  
 $f$  [ $\text{s}^{-1}$ ] je frekvence výbojů,  
 $r$  [%] je účinnost elektrického výboje,  
 $\eta$  [%] je účinnost generátoru,  
 $W_i$  [J] je energie jednotlivého výboje.

### 2.3.1 Základní fyzikální charakteristiky

Následující charakteristiky umožňující popis výboje, jsou znázorněny na obr. 7. Jsou zde dva grafy, závislosti napětí a proudu na čase pro tři elektrické výboje. Schéma přesně popisuje vznik výboje při současném vzrůstu napětí a proudu.<sup>3 7</sup>

- Přivedené napětí  $U_Z$  — Zápalné napětí výboje (napětí při zapnutí generátoru). Rozsah 80 až 200 V.
- Prodleva, zpoždění výboje  $T_d$  — Doba nezbytná pro vytvoření ionizovaného kanálu (okamžik vzrůstu proudu v pracovní mezeře). Řádově 1  $\mu\text{s}$ .
- Doba výboje  $A$  — Časový úsek mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru (činná doba výboje). Při zvětšení  $A$  vzrůstá energie výboje. Rozsah 0,2 až 2  $\mu\text{s}$ .
- Doba mezi dvěma impulzy (bez napětí)  $B$  — Časový úsek mezi vypojením a novým zapojením generátoru. Rozsah 0,2 až 2,5  $\mu\text{s}$ .

- Doba impulsu  $T_i$  – Časový úsek mezi zapojením a vypojením generátoru. Pro dobu impulsu platí výpočetní vztah (5).

$$T_i = T_d + A [\mu s], \quad (5)$$

kde:  $T_d [\mu s]$  je prodleva, zpoždění výboje,

$A [\mu s]$  je doba výboje.

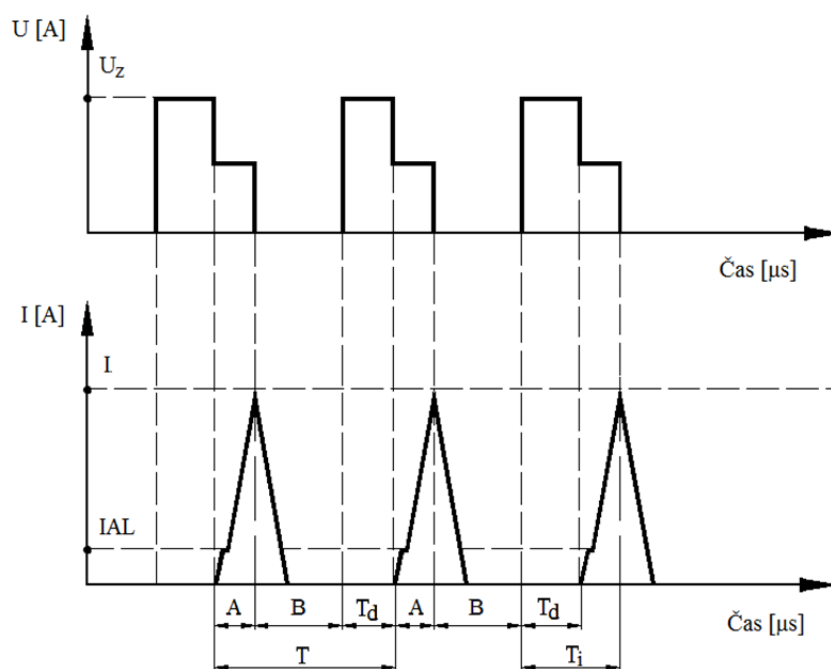
- Doba periody  $T$  – Časový úsek určený dobou impulsu a pauzou, určující frekvenci výbojů  $F$ . Pro výpočet doby periody platí výpočetní vztah (6). Rozsah trvání impulsu se pohybuje mezi 1 až 25  $\mu s$ .

$$T = T_i + B [\mu s], \quad (6)$$

kde:  $T_i [\mu s]$  je doba impulsu,

$B [\mu s]$  je doba mezi dvěma impulzy.

- Pracovní proud výboje  $I$  – Maximální vybíjecí proud protékající mezi elektrodami v okamžiku výboje.
- Vybíjecí proud  $I_{AL}$  – Střední hodnota, jejíž rozsah je mezi 1 až 20 A.
- Frekvence  $F$  – Pohybuje se v rozsahu 40 000 až 1 milion výbojů za sekundu.



Obr. 7 Časový průběh vzniku výboje.<sup>3</sup>

### 2.3.2 Typy elektrických výbojů

Charakteristika formy elektrického výboje je umožněna číselnou hodnotou pomocí veličiny  $q$  tzv. časové využití periody výboje, která je poměrem doby impulzu  $T_i$  a doby periody  $T$ . Průběh výboje je díky této veličině názornější. Výboje rozdělujeme dle časového průběhu dodávané energie do místa na:

a) Výboje elektrickou jiskrou (tj. obrábění stabilní frekvencí):

- Konstantní perioda  $T$  a frekvence  $F$ .
- Mění se energie výboje  $W_i$ .
  
- vysoké frekvence výbojů,
- krátká doba impulzu  $T_i = 10^{-4}$  až  $10^{-6}$  [ $\mu\text{s}$ ],
- nižší energie jednotlivých výbojů  $W_i = 10^{-5}$  až  $10^{-1}$  [J],
- časové využití periody  $q = 0,03$  až  $0,2$  [-],
- vysoká teplota ve výbojovém kanále cca  $10\,000^\circ\text{C}$ .

Tyto generátorové výboje se používají spíše pro operaci dokončování z důvodu malých úběrů materiálu.

b) Výboje krátkým elektrickým obloukem (tj. obrábění shodnými impulzy):

- Konstantní doba výboje  $A$  a energie výboje  $W_i$ .
- Mění se perioda  $T$  a frekvence  $F$ .
  
- nízké frekvence výbojů,
- delší doba impulzu  $T_i > 10^{-4}$  [ $\mu\text{s}$ ],
- vyšší energie jednotlivých výbojů  $W_i = 1 \cdot 10^2$  [J],
- časové využití periody  $q = 0,03$  až  $0,2$  [-],
- nízká teplota ve výbojovém kanále cca  $3600^\circ\text{C}$ .

Na základě vyšší hodnoty energie jednotlivých výbojů se obrábění shodnými impulzy využívá pro hrubovací operace.

Jednotlivé typy výbojů tedy ovlivňují podobu kráteru především v závislosti na energii jednotlivých výbojů a také na době jejich trvání. Délka výboje má mimo jiné vliv i na drsnost a strukturu obráběného povrchu.<sup>37</sup>



### 3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PROCES EDM OBRÁBĚNÍ

#### 3.1 Zdroje elektrické energie (generátory)

Zdrojem elektrické energie při EDM obrábění jsou generátory, které patří mezi hlavní části stroje. Jeho správná konstrukce, tedy pracovními parametry, které charakterizují výboje i četnost, podstatně ovlivňuje vlastní proces obrábění.<sup>6</sup>

##### 3.1.1 Vývoj generátorů

- 1959 První plně tranzistorový generátor řízených impulzů.
- 1964 Generátor impulzů shodné energie typu ISOPULS (doposud vyrobeny desetitisíce generátorů tohoto typu).
- 1976 Generátor typu ISOPULS 80 s automatickým adaptivním řízením.
- 1983 Generátor typu SPS, který umožňuje jemné hlazení (zrcadlový lesk).
- 1995 Generátor typu SI, který zamezuje odchyškám obráběných ploch.<sup>3</sup>

##### 3.1.2 Rozdělení generátorů

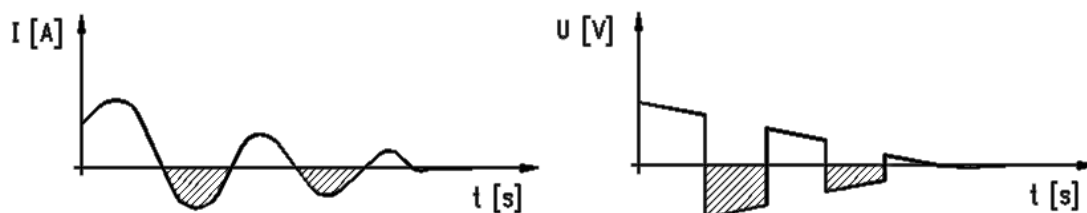
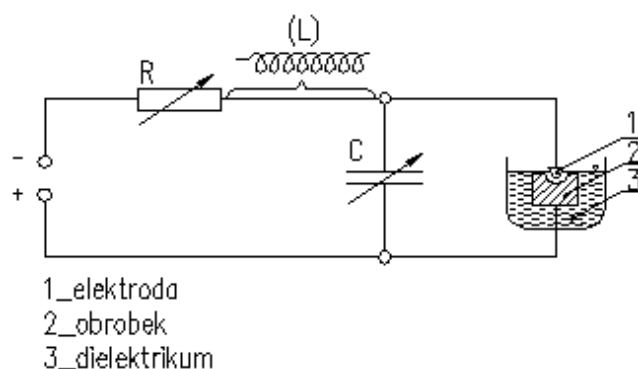
Zdroje elektrické energie se dělí na:

- a) Závislé (RC a RLC)
- b) Nezávislé (pulsní)

add. a) Závislé (RC a RLC)

Závislé zdroje, rovněž zvané jako elektrojiskrové (relaxační) zdroje patří k nejstarším zdrojům výbojů. Generátor pracuje na principu opakovaného nabíjení kondenzátoru přes odpor ze zdroje stejnosměrného proudu a jeho vybíjení v pracovní mezeře, přičemž velikost napětí dosáhne průrazné hodnoty. Frekvence a energie jednotlivých výbojů je závislá na změně poměrů v jiskřišti a proto tyto generátory nazýváme „ZÁVISLÉ“. Závislé generátory dávají poměrně krátké výboje, ve kterých převažuje elektronová vodivost. Jejich nevýhodou je značný objemový úbytek nástroje (cca 30%). Ten je způsobený vznikem střídavého proudu se zápornou půlvlnou (viz. obr. 8), omezenou možností regulace tvaru a frekvencí výbojů.

Zapojení indukčnosti (L) do nabíjeného obvodu, tj. zapojení RLC, prodlužuje délku trvání výboje a omezuje intenzitu vybíjecího proudu. Toto zapojení je zobrazeno na obr. 9.<sup>6</sup>

Obr. 8 Grafy závislostí proudu a napětí na čase.<sup>6</sup>Obr. 9 Závislý generátor.<sup>6</sup>add. b) Nezávislé (pulzní)

Nezávislé generátory umožňují nastavovat pracovní podmínky eroze bez ohledu na změnu poměrů v pracovní mezeře. De-facto existují dva typy nezávislých generátorů:

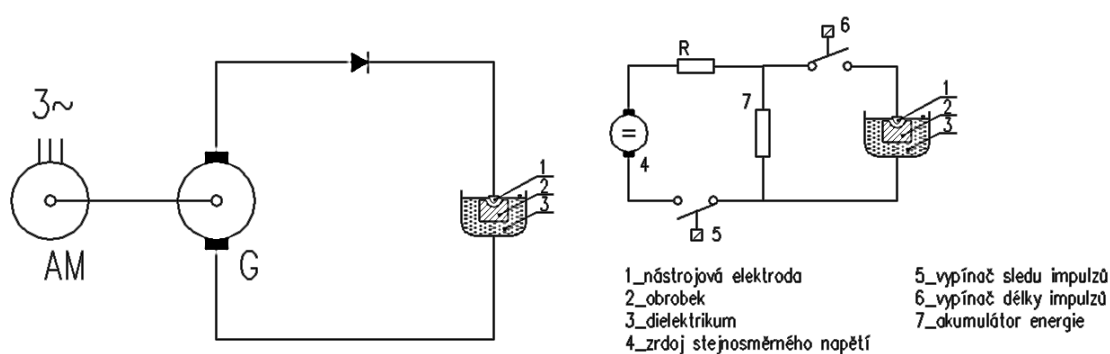
*Rotační (viz. obr. 10a)*

Pomocí asynchronního motoru dochází k roztáčení dynama a tím ke vzniku impulsů. Obvykle mají pravidelnou frekvenci, např. 400 Hz a umožňují vysokou úběrovost ( $5000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ). K nevýhodám patří vysoká hlučnost a náročná regulace frekvence pulsů.

*Polovodičové (obr. 10b)*

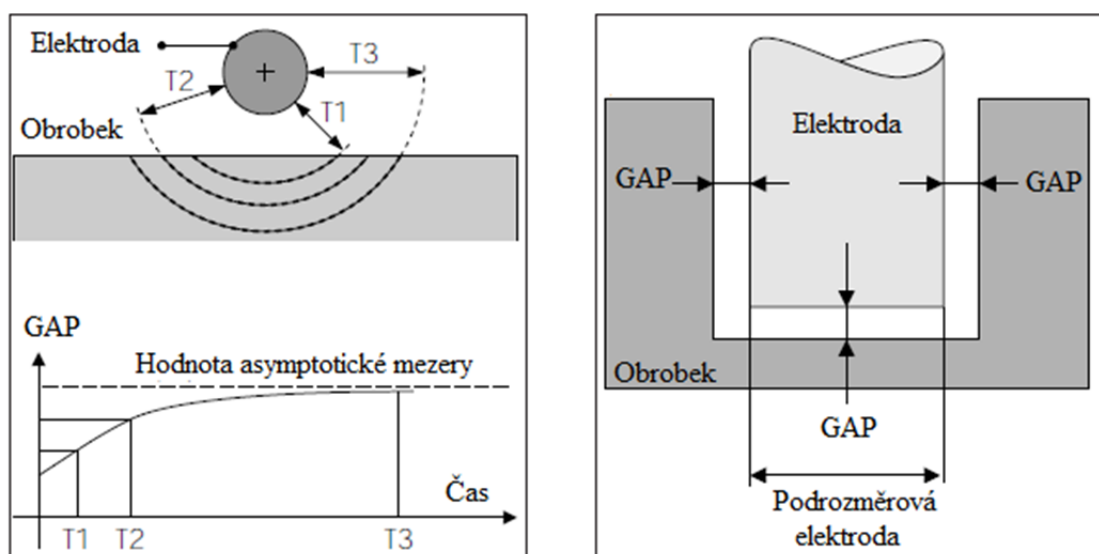
Tyto typy generátorů umožňují variabilitu nastavení elektrických parametrů. Frekvenci je možno měnit v rozsahu 0,5 až 50 kHz (kondenzátorem). Úběrovost se zde pohybuje v rozsahu  $7000$  až  $25000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Výhodou je, že při výbojích nevzniká negativní půlplna a je tedy dosahován malý relativní objemový úbytek nástroje cca 1% (poměr úbytku materiálu nástroje vůči materiálu obrobku). Charakteristická je delší doba trvání impulsů s převahou iontové vodivosti a proto se obrobek zapojuje většinou jako katoda.

Moderní elektroerozivní stroje již převážně používají polovodičové (impulsní) generátory, které jsou automaticky (adaptivně) řízeny CNC řídicími systémy dle zadaných technologických pracovních parametrů.<sup>6</sup>

Obr. 10 a) Nezávislý rotační generátor. b) Nezávislý polovodičový generátor.<sup>6</sup>

### 3.1.3 Vůle jiskrového výboje (GAP)

Jedna z charakteristik elektrojiskrového obrábění EDM je, že mezi elektrodou a obrobkem nedochází ke kontaktu. Vůle jiskrového výboje neboli GAP (viz. obr. 11a), je základní charakteristikou obrábění technologií EDM. „Akční rádius elektrody“ (viz. obr. 11b) je dán součtem poloměru a jiskrové mezery, která závisí na technologických podmínkách obrábění (parametry generátoru a použitý výkon).

Obr. 11a) Vůle jiskrového výboje  
11 b) Akční rádius elektrody.<sup>3</sup>

Jakmile dojde k zapnutí generátoru, nastane mezi součástí a elektrodou jiskření, způsobující vznik erozivní rýhy, který se po určitém čase prohlubuje (prvně rychle a poté pomaleji). Hloubka rýhy se přestane zvětšovat při dosažení tzv. hodnoty asymptotické mezery, což je vzdálenost, kdy nastane nulová pravděpodobnost vzniku jiskry. Velikost jiskrové mezery se v praxi liší v závislosti na prováděné operaci a na použitém nastavení od 1 mm do 1/100 mm. Určuje se dle normativů daných výrobcem stroje.<sup>3</sup>

### 3.1.4 Charakteristika generátorů

#### a) Výkon

Stroje jsou standardně dodávány s generátorem o proudu 32 A/ 15 kW. Výkon generátoru je možno dle požadavku zákazníka zvýšit přidáním další generátorové karty na 64 A. Je možná varianta i 128 A, tato možnost je však nestandardní a musí být řešena ve výrobním závodě. Výkon jedné generátorové karty (32 A) lze nastavit na výkonové stupně 1-11 (viz. tab. 1).<sup>9</sup>

Tab. 1 Výkonnostní stupně.

Stupeň	Označení karty
1	1A
2	1,5A
3	2A
4	3A
5	4A
6	6A
7	8A
8	12A
9	16A
10	24A
11	32A

#### b) Parametry generátoru

Existují dva druhy parametrů: sekundární a primární. Sekundární parametry mohou být snadno měněny bez fyzické změny jiskry. Naopak u primárních parametrů dochází regulací jejich hodnot ke změně jiskry a tím i její délky. Parametry primární jsou zobrazené v tabulce 2., parametry sekundární jsou v tabulce 3. U obou parametrů jsou také popsány jejich činnosti.<sup>9</sup>

Tab. 2 Primární parametry.<sup>3</sup>

Primární parametry	Pojem, funkce	Rozsah, typ
P a A	Určují velikost mezery (délku jiskry), která způsobí vznik kráteru. Ten určuje jakost povrchu.	A = 0,2 až 3 200 [ms]
M	Stanovuje režim obrábění (režim Isopulze pro hrubování a Relaxion pro obrábění načisto).	M4 (Relaxační), M6 (Isopulze).
C	Zajišťuje kapacitu obrábění načisto, tím že umožňuje stroji volbu hodnoty kondenzátoru.	—
V	Stanovuje zápalné napětí.	80 až 200 [V]

Tab. 3 Sekundární parametry.<sup>3</sup>

Sekundární parametry	Pojem, funkce	Rozsah, typ
B	Doba klidu stanovující dobu přerušení mezi dvěma impulzy.	0,8 až 3 200 [ $\mu$ s]
R a U	Stanovuje „mechanickou“ impulzní dobu při dopředném a zpětném pohybu během obrábění.	U je doba obrábění [s] R je doba pohybu [s]
RF	Stanovuje napětí referenčního oblouku. Toto napětí zajišťuje stálost obrábění.	—
SV (servo)	Stanovuje tlak obrábění neboli vzdálenost mezi obrobkem a elektrodou.	—
INV	Řídí obrácení polaroty mezi elektrodou a obrobkem. Funkce je užitečná pro inverzní obrábění.	0 je klasická polarita 1 je obrácená polarita
EL	Umožňuje nastavení typu materiálu při obrábění.	1 je pro měď, 2 je pro grafit, 3 je wolfram

### 3.1.5 Údržba generátorů

Generátory jsou chlazeny ventilátory (zpravidla 3-6 kusů, dle počtu výkonových karet) o průměru 120 mm. Některé typy strojů mají klimatizované generátorové skříně. Cirkulace vzduchu pro chlazení generátorů je řešena přes prachové filtry, jejichž kontrola je vizuální. Výměna filtrace se odvíjí od prašnosti prostředí, množství a typu obrobeneho materiálu (např. při obrábění slinutého karbidu nebo hliníku se filtr zanáší rychleji). Samozřejmě také závisí na parametrech filtru, konkrétně na jemnosti, která se pohybuje v rozmezí 3 až 5  $\mu$ m. Filtry umožňují zachycení částic o velikosti 50 mikronů. Avšak nejzazší termín pro jejich výměnu je jednou za tři měsíce.<sup>9</sup>

Údržba generátoru má na jejich správnou činnost zásadní vliv. Kromě kontroly ventilátorů a filtrů se provádí časový test pro kontrolu HW, stanovený dle norem výrobce. Cílem testu je vyhloubení otevřeného otvoru o rozměrech: délka  $l = 15$  mm, šířka  $b = 10$  mm a hloubka  $h = 7$  mm do 60 minut na konečnou drsnost  $Ra = 3,2$   $\mu$ m. Pokud je překročena tato časová hranice, následuje kalibrace generátoru.<sup>3</sup>

### 3.1.6 Volba generátorů

Kritérium pro volbu generátoru je tzv. podrozměr elektrody (Gap) a předepsaná drsnost v technické dokumentaci. Poté je dle technologické křivky (v příloze číslo 3 až 5) volen startovací (hrubovací) generátor. Ten se volí z červeného pole, což je oblast minimálního opotřebení elektrody a zároveň musí v daném rozměru podávat nejvyšší výkon. Generátor je v grafu vyznačen tučně (např. 273, 303, 323, 373, apod.), pod tímto číselným označením je uveden tenkým písmem další číselný údaj. Ten udává velikost „jiskry“ v tisícinách milimetru. To znamená např., že když je hodnota podrozměru 0,15 mm, obrábění lze začít maximálně generátorem 323 který má velikost výboje 140 (údaj je v tisícinách, tzn. 0.14 mm). Pokud by byl zvolen větší generátor např. 373, který má rozměr 175, došlo by k podhloubení a povrch by byl hrubý.

Pozn. V praxi se používá tzv. sled generátorů. Generátor s vysokým výkonem je použit pro operaci hrubování a postupně se po technologické křivce snižuje, až na požadovanou drsnost. Tento proces je spojen s obráběcím cyklem, nejčastěji DOWN/ORB.<sup>9</sup>

### 3.2 Technologická příprava elektrody

Použitými nástroji pro EDM obrábění jsou nástrojové elektrody, které jsou vyráběny technologií frézováním, drátovým řezáním, soustružením a broušením. Jednoduché tvary navrhuje obsluha stroje. Složité tvary (pro tvarově náročné součásti) jsou vyráběny programátory s využitím výpočetních systémů CAD/CAM tak, že se provede obtisk ploch finálního tvaru z 3D modelu.

Volba materiálu elektrody ovlivňuje objemový úbytek materiálu. Velikost opotřebení elektrod v praxi dosahuje od desetin procenta až do desítek procent. K největšímu opotřebení dochází zejména u dokončovacích operací.

Pro výrobu elektrod se nejčastěji používají elektrolytická měď, grafit a wolfram. V posledních letech se značně rozšířila výroba grafitových elektrod, které jsou dobře obrobitelné (rychlost obrábění dosahuje  $40\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , stroje pro obrábění grafitových elektrod musí být vybaveny kvalitním odsáváním). Zastupující firmou specializující se na výrobu grafitových elektrod v České republice je Americká firma POCO Graphite, jejíž grafity Ultrafine mají stejnou pevnost jak v podélném tak v příčném směru.<sup>9</sup>

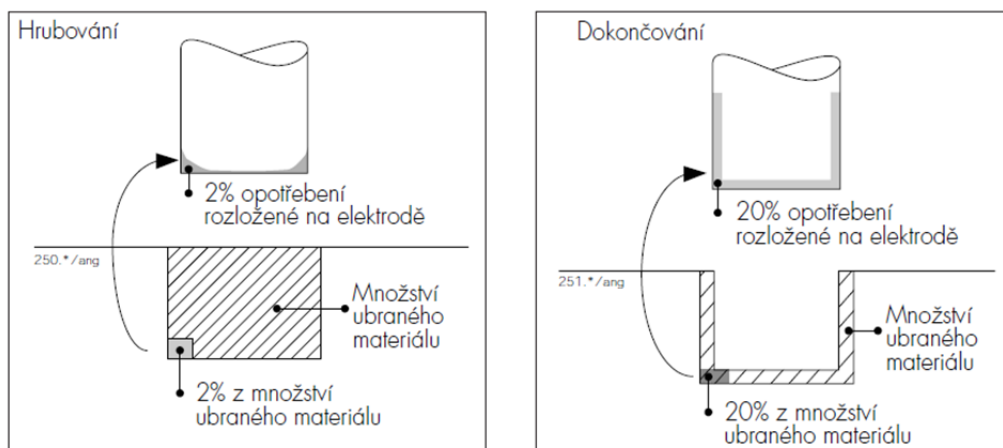
#### 3.2.1 Volba rozměrů

Správná volba strategie výroby nástroje se odvíjí od typu hloubeného tvaru. Elektroda má stejný tvar jako součást, pouze „offsetově“ zmenšený o optimální mezeru, zvanou podrozměr (Gap). čím větší je tato mezera, tím je rychlost obrábění vyšší. Dle velikosti této mezery se definuje počáteční hrubovací generátor.

Podrozměr je volen podle velikosti čelní plochy elektrody. Obecně platí, že čím je tvar objemnější, tím je podrozměr větší (řádově několik desetin mm). Pro mělké a plošné malé tvary se stanoví podrozměr maximálně 0,10 mm. V běžné praxi se volí 0,15 až 0,50 mm pro operaci hrubování a 0,06 až 0,10 mm pro dokončování. Hrubování a dokončování se provádí za použitím dvou elektrod hrubovacích a dokončovacích z důvodu opalu, rychlosti obrábění, dodržené přesnosti a zachování ostrosti kontury. Elektroda musí mít hladký povrch z výroby, a dále se po každé operaci očišťují otřepy pomocí brusných (lapovacích) kamenů o různé zrnitosti.<sup>9</sup>

#### 3.2.2 Opotřebení

V průběhu opotřebení je obrobek erodován, při čemž dochází k opotřebování nástrojové elektrody. Tento jev je pravidelný a bohužel nevyhnutelný. Hodnoty opotřebení jsou pro jednotlivé operace různé. U procesu hrubování se pohybují v rozmezí 0% až 2%, u dokončovacích operací mezi 2% až 30%. Ačkoliv se tyto hodnoty zdají vysoké, musí být chápány jen relativně k množství úběru materiálu u obrobku, jak vyplývá z obr. 12 a.<sup>3</sup> Při obrábění načisto je procento opotřebení vyšší, množství úběru je však menší. Znamená to tedy že konečné opotřebení je menší.



Obr. 12 a) Opořebení při hrubovací operaci

12 b) Opořebení při dokončovací operaci.<sup>3</sup>

### 3.3 Dielektrikum

Při procesu obrábění hraje přítomnost dielektrické kapaliny (tj. s nepatrnou elektrickou vodivostí) rozhodující roli. Pro dielektrikum se používají kapaliny na bázi ropy – směs uhlovodíků (voda pro drátové řezání). Čím více je v dielektriku obsaženo vodivé zrna, tím se stává více vodivým a vznikají nepřesnosti.

Součást musí být ponořena minimálně 4 cm jak z důvodu účinného chlazení, tak i s bezpečnostních důvodů, aby nedošlo ke vznícení dielektrika. Přejít jiskry dosahuje teploty až 12 000°C a při malém ponoru může dojít k samovznícení. Z tohoto důvodu nesmí být nikdy startovní bod programu nad hladinu dielektrika.<sup>9</sup>

#### a) Požadavky na dielektrické kapaliny:

- Dielektrikum musí být čisté a nevodivé, (jeho znečištění závisí na procesu a době obrábění)
- Bod vzplanutí musí být vyšší než 80°C (např. DIEL MS 5000 má teplotu vzplanutí větší než 130°C),
- Hygienická a ekologická nezávadnost.<sup>6</sup>

#### b) Funkce dielektrické kapaliny:

- Odstraňování erodovaných částic,
- Řízení jiskrové eroze,
- Teplotní stabilizace obrobku,
- Zamezení vylučování částic z povrchu nástrojové elektrody (proti vzniku zkratu).<sup>6</sup>

#### c) Termostabilizace:

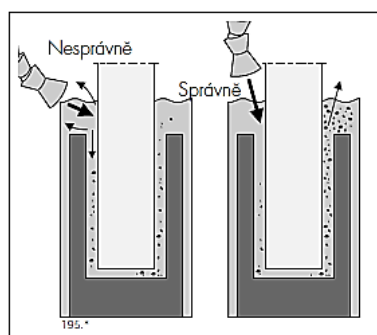
Termostabilizace je důležitá pro úspěšné provádění přesného obrábění. Důsledkem značné produkce tepla jiskřením dochází k dilataci. Stroje firmy Charmilles jsou vybaveny zásobníkem tepla, díky němuž je zachována stálá teplota dielektrické kapaliny v nádrži.

V případě překročení teploty  $45^{\circ}\text{C}$  v pracovním prostoru, sepnou se čidla a obrábění je přerušeno.<sup>5</sup>

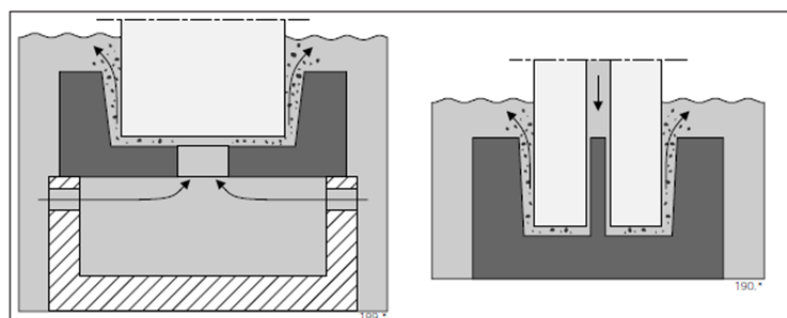
### 3.3.1 Vyplachování

Je to proces oběhu dielektrika mezi elektrodami pro docílení nejlepší účinnosti. Řadí se mezi další důležité sekundární parametry. Důležitý je směr výplachů, například pro otevřené tvary vede směr od uzavření po otevření (na základě specifikace obsluhy stroje). Dalším parametrem je tlak, který se pohybuje okolo 0,5 atmosféry (lepší je menší, aby nedošlo ke vzniku vírům). Avšak záleží na velikosti tvaru, čím větší je tvar, tím větší je tlak pro výplach.

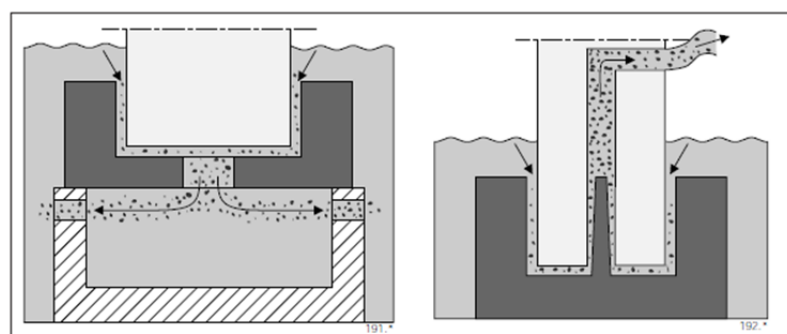
Vyplachování lze provádět z vnějšku (boční) anebo vnitřně (přes „C“ osu). Boční výplachy jsou levé a pravé a mohou být sepnuty ve třech stavech. Buď vyplachují současně a nepřetržitě po celou dobu obrábění, nebo pulzně (střídavě). Třetí možnost je, že po dobu elektrody v záběru je výplach odstaven a sepne se při „pauze“ kdy elektroda vyjede z tvaru. Vnitřní vyplachování lze rozdělit na tlakové (sáním) nebo podtlakové. Uvedené způsoby jsou zobrazeny na obr. 12 a-c.<sup>9</sup>



Obr. 12 a) Boční výplach.<sup>9</sup>



Obr. 12 b) Vyplachování sáním.<sup>9</sup>



Obr. 12 c) Vyplachování podtlakem.<sup>9</sup>



### 3.4 Upnutí součástí a nástroje

#### a) Upnutí do svěráku

Používá se především pro rozměrově větší obrobky. Je to nejlepší varianta pro upnutí kusu z důvodu okolního prostoru, tím je myšlena vhodná cirkulace dielektrika korektní vyplachování obrobků z prostoru mezi elektrodou a obrobkem. Systém upnutí do vřetene je řízen tlakově (vzduchem), tlak vzduchu ve vřetení slouží k uchycení nástrojového držáku.

#### b) Upnutí na magnetickou podložku

Toto upínání se používá pro menší obráběné součásti. Avšak nevýhodou je, že při tomto upínání dochází k přitahování magnetického pole, které působí na odhloubené částice. Tyto potom mají nepříznivý vliv na kvalitu povrchu ve smyslu zvlnění. Pro načtení referenčních bodů obrobku se využívá příslušenství, tzv. referenční kuličky od firmy Erowa, která dodává upínací nástroje do 3D strojů.

Je také možnost provedení inverze (příkaz INV), tj. přepólování vřetene a pracovního stolu. Elektrody jsou upnuty do držáků na pracovním stole a součást je upnuta ve vřetení. Tato možnost se využívá především pro složitější tvary a pro větší série z důvodu časové úspory (jelikož u EDM strojů je posuv řádově menší než např. u strojů pro třískové obrábění) a lepších výplachů.

### 3.5 Geometrie stroje

Jedním z dalších parametrů ovlivňujících proces hloubení je i geometrie stroje. Zaměření patří především na vedení, které je kuželové. Díky bodovému styku má větší přesnost než například kuličkové vedení. Druhým parametrem je osa C (vřetene), u které musí být dodržena kolmost a nepatrná házivost. Tato osa je bržděná elektromagneticky.

### 3.6 Teplota prostředí

Konstantní teplota zaručuje dodržení přesnosti výroby, jejíž kolísání má vliv na tepelnou roztažnost materiálů. V průběhu dne se může teplota na neklimatizovaném pracovišti pohybovat v rozmezí od 15 do 25°C. Při skutečnosti, že jeden metr oceli se při zvýšení teploty o 1°C prodlouží cca o 0,01mm, dosáhneme při rozdílu 10°C prodloužení o 0,1mm. Výrobce požaduje pro zaručení přesnosti stabilní teplotu mezi 19-25°C s maximálním kolísáním teploty  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Stroj je schopný pracovat v teplotním rozmezí 15-25°C, při vlhkosti ovzduší v rozmezí 40-80%. Podstatná však není nižší nebo vyšší okolní teplota, ale teplotní výkyvy v průběhu dne.

## 4 PRAKTICKÝ TEST

### 4.1 Cíl testu

Test byl zaměřen na efektivitu obrábění v závislosti na použití tří druhů materiálu pracovního nástroje – elektrody. Pro tyto tři různé materiály elektrod byly nastaveny jednotné parametry stroje v souvislosti s požadavky na výslednou integritu povrchu.

Dle požadavku na výslednou drsnost povrchu  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$  byl zvolen příslušný podrozměr 0.415 mm s následným přiřazením generátoru s označením 473 pro hrubování a 240 pro dokončování (zvoleno dle přílohy. 3). Obráběná část byla upnuta ve svěráku a nástrojová elektroda ve vřetení. Nastavení sekundárních parametrů nebylo prováděno z důvodu automatického režimu stroje. Použité dielektrikum bylo označeno Total EDM 2, jehož bod vznícení je  $121^\circ\text{C}$ . Druh vyplachování bylo na základě experimentu zvoleno boční (pravé).

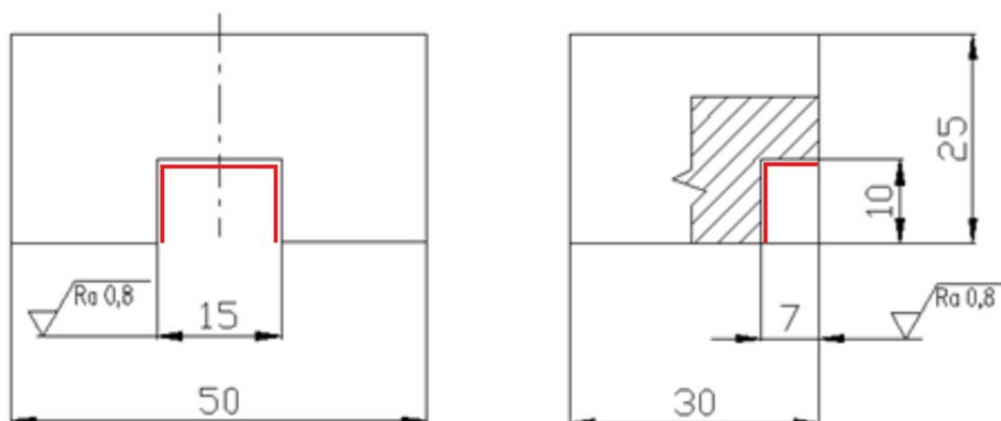
### 4.2 Stroj pro realizovaný experiment

Pro experiment bylo použito EDM centrum Roboform Charmilles 350 série CHARM-100 521, rok výroby 1997 na obrázku v příloze č. 7. Technické parametry stroje jsou uvedeny v tabulce č. 4.

Tab. 4 Technické parametry stroje.

Parametr	Velikost, rozsah
Rozjezdy os X/Y/Z	780 x 530 x 300 mm
Objem vany	410 litrů
Řízení	CT 1000
Generátor	ISOPULS 64/128 A

Výsledným parametrem měření byl celkový čas procesu (operace hrubování a dokončování), porovnání přesnosti konečného tvaru a zjištění opotřebení pracovních nástrojů. Pro obě operace byla použita vždy jen jedna elektroda, zároveň hrubovací a dokončovací. Jako materiály jednotlivých elektrod byly použity: měď, wolfram a grafit. Pro materiál obráběného kusu byla zvolena nástrojová ocel označená 1.2358 s tvrdostí 54 HRC. Náčrt hloubeného tvaru a jeho rozměry jsou uvedeny na obr. 14. Výsledné rozměry mají toleranci 0,01 mm.



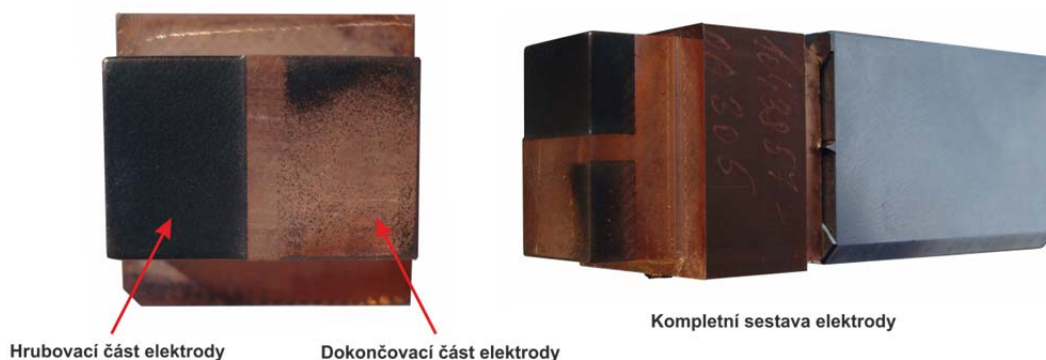
Obr. 13 Náčrt obráběného tvaru.

### 4.3 Analýza a číselné vyhodnocení testu

Jednotlivé testy byly ukončeny po dosažení požadovaných rozměrů dle předlohy (viz. Obr. 13) a drsnosti povrchu  $Ra = 0,8 \mu\text{m}$ . Výsledné naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 5. Na obrázku 14 a 15 jsou ukázky nástrojových elektrod z mědi a grafitu.

Tab. 5 Naměřené hodnoty.

Materiál elektrody	Měď	Grafit	Wolfram
Čas hrubovací operace obrábění [min]	40	29	17
Čas dokončovací operace obrábění [min]	15	6	5
Celkový čas obrábění [min]	55	35	22
Výsledná hodnota x [mm]	-0,005	-0,004	-0,002
Výsledná hodnota y [mm]	+0,008	-0,005	-0,003
Výsledná hodnota z [mm]	-0,004	+0,007	+0,000
Opal elektrody [%]	3,5	2,0	0,5



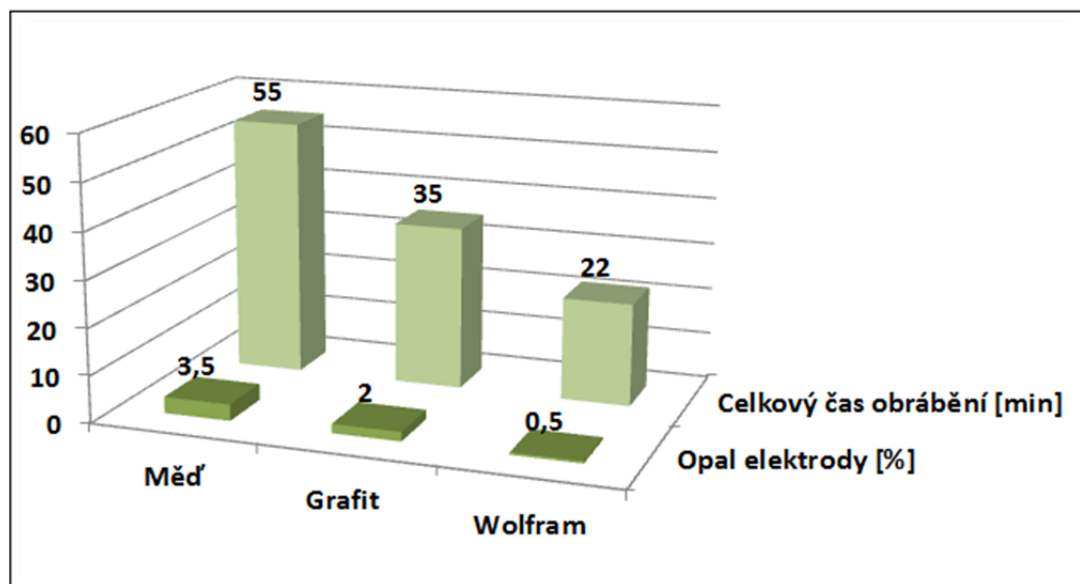
Obr. 14 Nástrojová elektroda – Měděná.



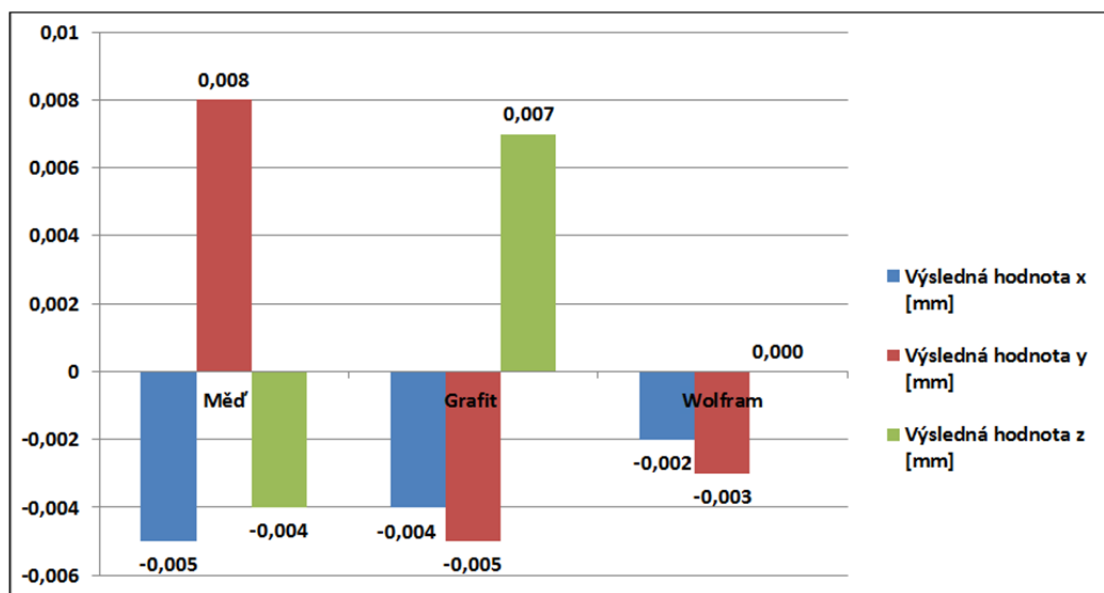
Obr. 15 Nástrojová elektroda – Grafitová.<sup>10</sup>

#### 4.4 Grafické vyhodnocení testu

Pro grafické zhodnocení byly zvoleny dva grafy. První závislost materiálů na délku obrábění a procentuální opotřebením (viz. Obr. 15a), druhý jako závislost materiálu na výsledné přesnosti (viz. Obr. 15b).



Obr. 15a) Graf závislosti nástrojového materiálu na celkovém čase [min] a opalu elektrody [%].



Obr. 15b) Graf závislosti nástrojového materiálu na přesnosti [mm].

## ZÁVĚR

V úvodu práce byly rozebrány základní vlastnosti a parametry elektrojiskrového obrábění se zaměřením na zvýšení efektivity a stability procesu. Pro každý faktor, tj. generátor, dielektrikum, výplachy, způsob upínání a nástrojová elektroda, byla provedena analýza zaměřující se na dosažení optimálních hodnot. Jako kritérium optimálních hodnot bylo stanoveno dosažení požadovaných rozměrových a kvalitativních parametrů.

Jako nejvíce ovlivňujícím parametrem nastavení se prokázala vhodná volba generátoru, který se určuje dle hodnoty podrozměru v závislosti na integritě a kvalitě výsledného povrchu obrobku. V průběhu hloubení je možné korigovat mimo jiné sekundární parametry generátoru (B, R, U, SF, SV, EL), které mohou mít vliv na výslednou dobu obrábění.

Teoretická část práce jednoznačně popsala význam ostatních činitelů ovlivňující proces elektroerosivního hloubení, jako je čistota dielektrika, správně zvolený typ výplachu, adekvátní upnutí nástroje a obrobku, či odpovídající technologický proces na základě daného materiálu elektrody.

Materiál elektrody ve vztahu k materiálu obráběného dílce byl hlavním zkoumaným předmětem praktické části této práce. Porovnávány byly vlastnosti měděné, grafitové a wolframové elektrody. Ze změřených hodnot byly sestaveny grafy závislosti použitých druhů materiálu na přesnosti, opotřebení a délky procesu. Z těchto grafů bylo vyhodnoceno, že nejvhodnější je wolframová elektroda, která měla nejnižší hodnotu opalu (tj. 0,5 %) při současně nejkratší době obrábění (tj. 22 minut). Nevýhodou tohoto druhu materiálu jsou ovšem náklady, proto se používá zejména pro obrábění slinutých karbidů. Výsledné hodnoty opalu měděné (3,5%) a grafitové elektrody (2%) se příliš neliší, zatímco časové údaje vykazovaly větší rozptyl (od 35 minut pro měď do 55 minut pro grafit).

V praxi je momentálně nepoužívanější měděná elektroda, což odpovídá i jejímu poměrnému zastoupení v nástrojárně firmy Tyco Electronics s.r.o., kde byl tento test realizován. V budoucnu lze předpokládat výraznější vzestup grafitových elektrod, současně s odhalováním jejich širšího uplatnění.

Po seznámení s výše uvedenými parametry ovlivňující vlastní průběh elektrojiskrového obrábění, v podmínkách firmy Tyco Electronics s.r.o. v Kuřimi, bylo navrženo doporučení pravidelnější údržby strojů, v podobě pravidelné kontroly s následnou výměnou filtrů a dielektrika nebo proměřování a případná kalibrace generátoru, jsou-li zpozorovány neobvyklé výrobní nepřesnosti (podmínky viz. kapitoly 3.1.5 a 3.3). Zmíněné návrhy přinesou kvantitativní i kvalitativní obrábění.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *History of Electrostatic Generators*. [online]. [vid. 2012-05-20].  
Dostupné z: <http://www.hp-gramatke.net/history/english/page4000.htm>
2. Leyden Bottle. *10 Less Known Special Bottles* [online]. [cit. 2012-05-20].  
Dostupné z: <http://thelistcafe.com/10-less-known-special-bottles>
3. *Roboform 35-2400 Charmilles technologies*. 1. vyd. Charmilles technologies, 1999.
4. SCHALLER, Robert. *Characterization of electrical discharge machining plasmas* [online]. Lausanne: EPFL, 2006 [vid. 2012-05-20]. ISBN nemá. Dostupné z: <http://cadm.zut.edu.pl/pub/prawie%20wszystko%20o%20edm%20%28ang%29.pdf>
5. *Historical background* [online]. [vid. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarollo/edm-eng/2-historical-background>
6. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. 120 s. ISBN 80-7082-518-9.
7. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1989. 122 s. ISBN nemá.
8. *Evolution of the EDM process* [online]. [vid. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.docstoc.com/docs/53732930/Evolution-of-the-EDM-process>
9. Osobní rozhovor s Miroslavem Pernicou, aplikační technik firmy Charmilles. Kuřim 8. 12. 2011 a 15. 03. 2012
10. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [vid. 2012-05-20].  
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/drazsi-avsak-vykonnejsi-edm-grafit.html>
11. *Equip matching* [online]. [vid. 2012-05-20].  
Dostupné z: [http://www.equipmatching.com/used\\_equipment/6/88/287686.php](http://www.equipmatching.com/used_equipment/6/88/287686.php)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

Zkratka	Jednotka	Vysvětlení
CAD	–	Computer Aided Design
CAM	–	Computer Aided Manufacturing
DC	–	Direct Current (stejnoseměrný proud)
EDM	–	Electrical Discharge Machining (elektrojiskrové obrábění)
GAP	–	Jiskrová mezera
HRC	–	Tvrдость Rockwella
HW	–	Hard ware
NMO	–	Nekonvenční metody obrábění
RC	–	Závislé generátory
RLC	–	Závislé generátory
RO	–	Rychlořezná ocel
SK	–	Slinutý karbid

Symbol	Jednotka	Vysvětlení
A	$\mu\text{s}$	Doba výboje, primární parametr pro velikost mezery
B	$\mu\text{s}$	Doba mezi dvěma impulzy (bez napětí)
B	$\mu\text{s}$	Sekundární parametr pro stanovení doby klidu
C	–	Kondenzátor
C	–	Primární parametr pro zjištění kapacity
EL	–	Sekundární parametr pro nastavení typu materiálu
F	$\text{s}^{-1}$	Frekvence výbojů
I	A	Pracovní proud výboje
IAL	A	Vybíjecí proud
INV	–	Sekundární parametr pro řízení polarity
L	H	Indukčnost
M	–	Primární parametr pro režim obrábění
P	$\mu\text{s}$	Primární parametr výkonu
$Q_v$	$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Objemový výkon obrábění
R	ohm	Odpor
R	s	Sekundární parametr pro stanovení impulzní doby
RF	–	Sekundární parametr pro stanovení napětí referenčního bodu
Ra	$\mu\text{m}$	Drsnost
SV	–	Sekundární parametr pro stanovení tlaku obrábění
T	$\mu\text{s}$	Perioda
$T_i$	$\mu\text{s}$	Doba impulzu
$T_d$	$\mu\text{s}$	Prodleva, zpoždění výboje
U	s	Sekundární parametr pro stanovení impulzní doby
$U_z$	V	Přivedené napětí
V	V	Primární parametr pro stanovení zápalného napětí
$V_i$	$\text{mm}^3$	Množství odebraného materiálu

Symbol	Jednotka	Vysvětlení
$V_n$	$\text{mm}^3$	Objemový úbytek
$V_o$	$\text{mm}^3$	Objemový úbytek obrobku
$W_i$	J	Energie jednotlivého výboje
b	mm	Šířka
f	$\text{s}^{-1}$	Frekvence výbojů
h	mm	Hloubka
i	A	Proud
l	mm	Délka
k	–	Součinitel úměrnosti pro katodu a anodu
q	–	Časové využití periody výboje
r	%	Účinnost elektrického výboje
u	V	Napětí
$\eta$	%	Účinnost generátoru
$\rho$	%	Relativní objemový úbytek



**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1	Řídící program
Příloha 2	Podprogram
Příloha 3	Technická křivka měď/ocel <sup>3</sup>
Příloha 4	Technická křivka grafit/ocel <sup>3</sup>
Příloha 5	Technická křivka wolfram/ocel <sup>3</sup>
Příloha 6	Tabulka pro nastavení stroje <sup>3</sup>
Příloha 7	Obráběcí centrum Roboform Charmilles 350 <sup>11</sup>

## PŘÍLOHA 1

- 1: PN / EL1 — Název programu.  
4: TECHNO / F, UGRAC — Technologie obráběcího procesu v závislosti na použitém materiálu.  
5: FLUSH / LL, 1, LR, 1 — Funkce zapnutí výplachu (pravý, levý).  
6: L1 = -5.0 — Hloubka obrábění.  
7: AXE / Z — Zvolena hlavní pracovní osa.  
8: FROM / X, 0, Y, 0, Z, 10 — Startovací bod.  
10: DOWN / L, L1, H, -0.415, E, 432 — Najetí vřetene na požadovanou hloubku s odskokem o 0.415 mm od výše zvolené míry.  
12: ORB / L, L1, H, 0.300, E, 432 — Funkce pro „orbitální rozjetí“ elektrody ze středové polohy na požadovanou hodnotu definovanou v řádku DOWN 0.415  
12: ORB / L, L1, H, 0.276, E, 422  
12: ORB / L, L1, H, 0.222, E, 402  
12: ORB / L, L1, H, 0.200, E, 392  
12: ORB / L, L1, H, 0.160, E, 373  
12: ORB / L, L1, H, 0.130, E, 353  
12: ORB / L, L1, H, 0.090, E, 323  
12: ORB / L, L1, H, 0.075, E, 303  
12: ORB / L, L1, H, 0.058, E, 281  
13: ORB / L, L1, H, 0.050, E, 261  
13: ORB / L, L1, H, 0.044, E, 253  
14: ORB / L, L1, H, 0.039, E, 242  
14: ORB / L, L1, H, 0.035, E, 220, RET — Generátor posledního řádku udává finální drsnost povrchu.  
Příkaz RET znamená návrat vřetene do startovacího bodu.  
18: FLUSH / LL, 0, LR, 0 — Vypnutí výplachu.  
20: END — Konec programu.

## PŘÍLOHA 2

MOVT, H215 — Vysunutí obráběcí vany na požadovanou výšku  $H = 215$  mm.

AUX, 22 — Napouštění vany dielektrikem.

ZCL — Nulování hodin stroje.

VLD, V1, 0.0; X — Odchylky od výchozího kusu v ose x, zapsané po opětovném upnutí kusu.

VLD, V1, 0.0; Y — Odchylky od výchozího kusu v ose y, zapsané po opětovném upnutí kusu.

VLD, V1, 0.0; Z — Odchylky od výchozího kusu v ose z, zapsané po opětovném upnutí kusu.

TCH, 1 — Výměna nástroje.

GOP, 1 — Go to point = Najetí vřetene na uloženou pozici pro nástroj 1,

MVR, XS1, YS2, ZS3 — Relativní posunutí o hodnoty x, y, z.

DRS, MED — Grafické znázornění programu. MED = název programu.

SPG — Příkaz spuštění programu „MED“.

GOP,2 — Elektroda se otočí a najede na souřadnice x, y, z.

MVR, XS1, YS2, ZS3

DRS

SPG

AUX, 23 — Funkce na vypuštění obráběcí vany.

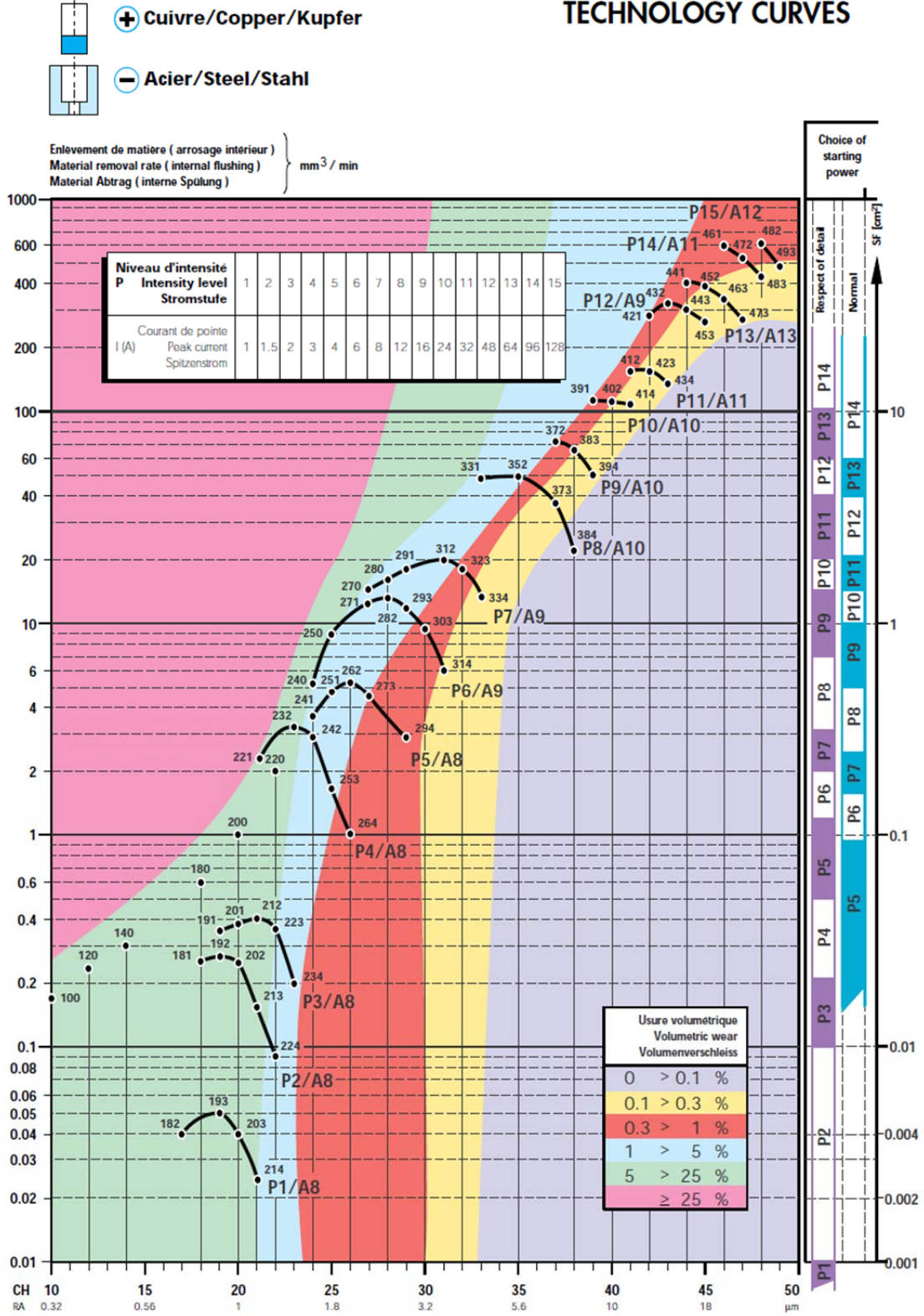
MOVT, H0 — Pokles vany do výchozí (nulové) pozice.

MSG — Zobrazení poznámek obsluhy.

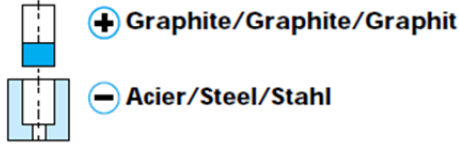
KONEC

# PŘÍLOHA 3

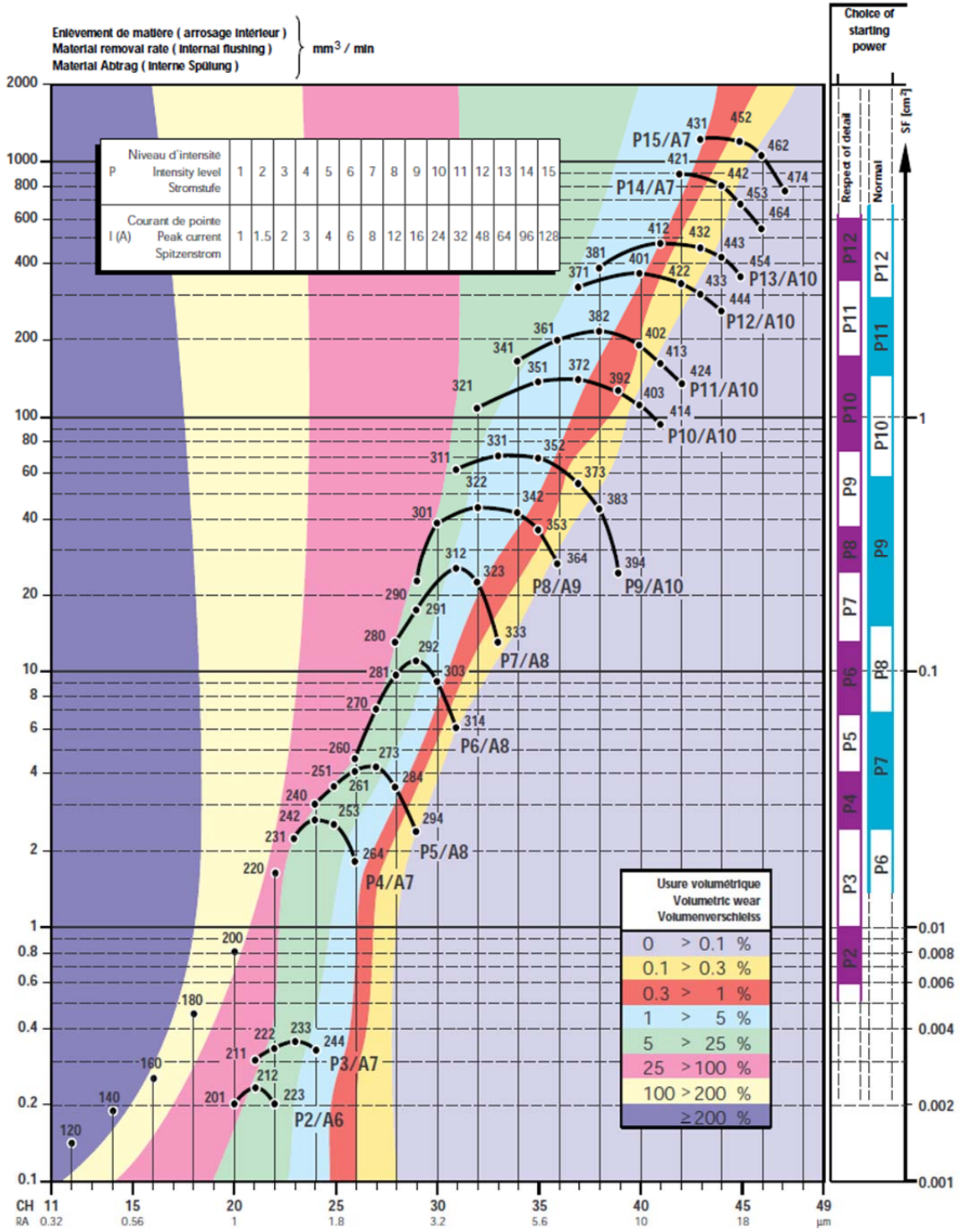
## TECHNOLOGY CURVES



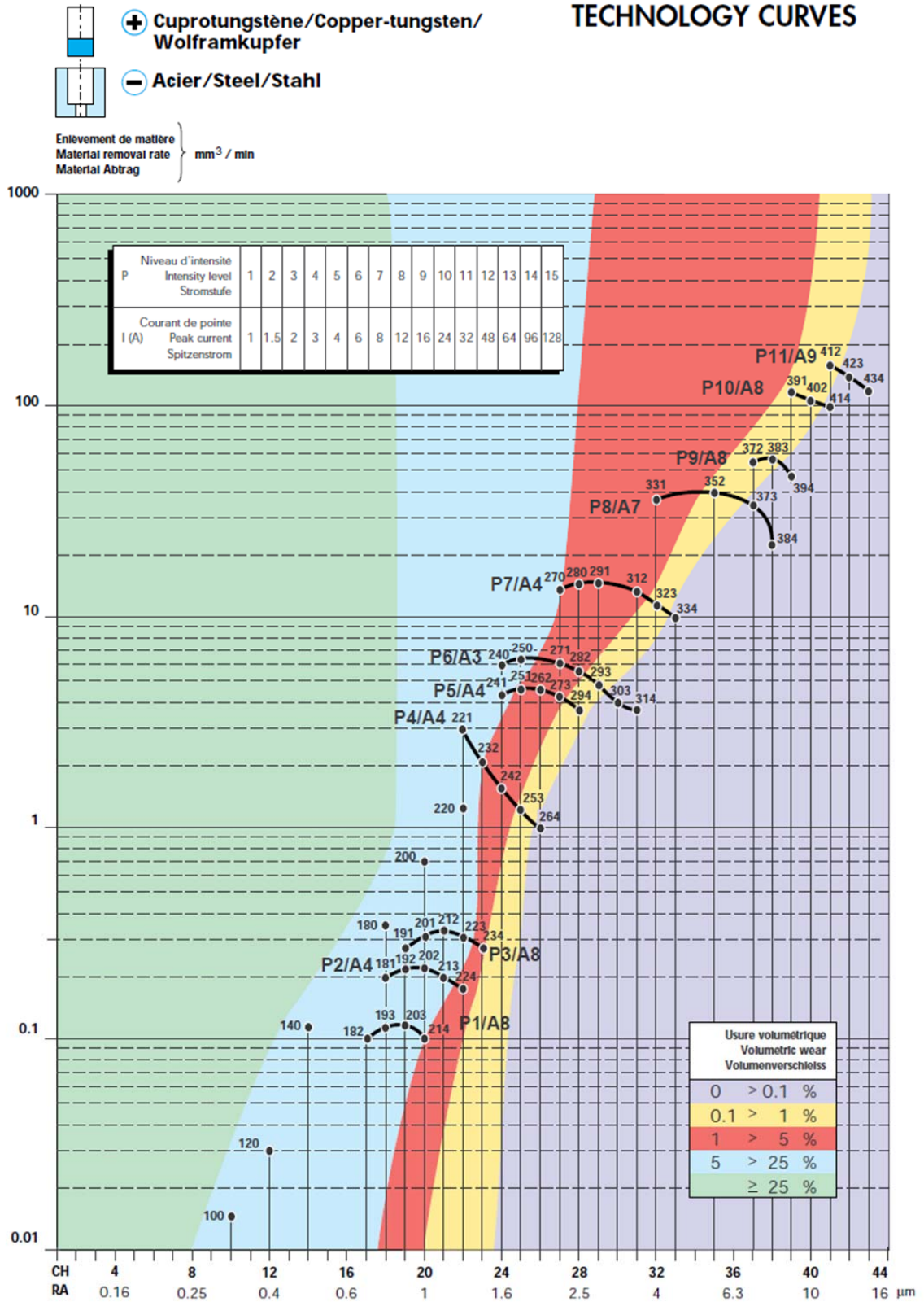
# PŘÍLOHA 4



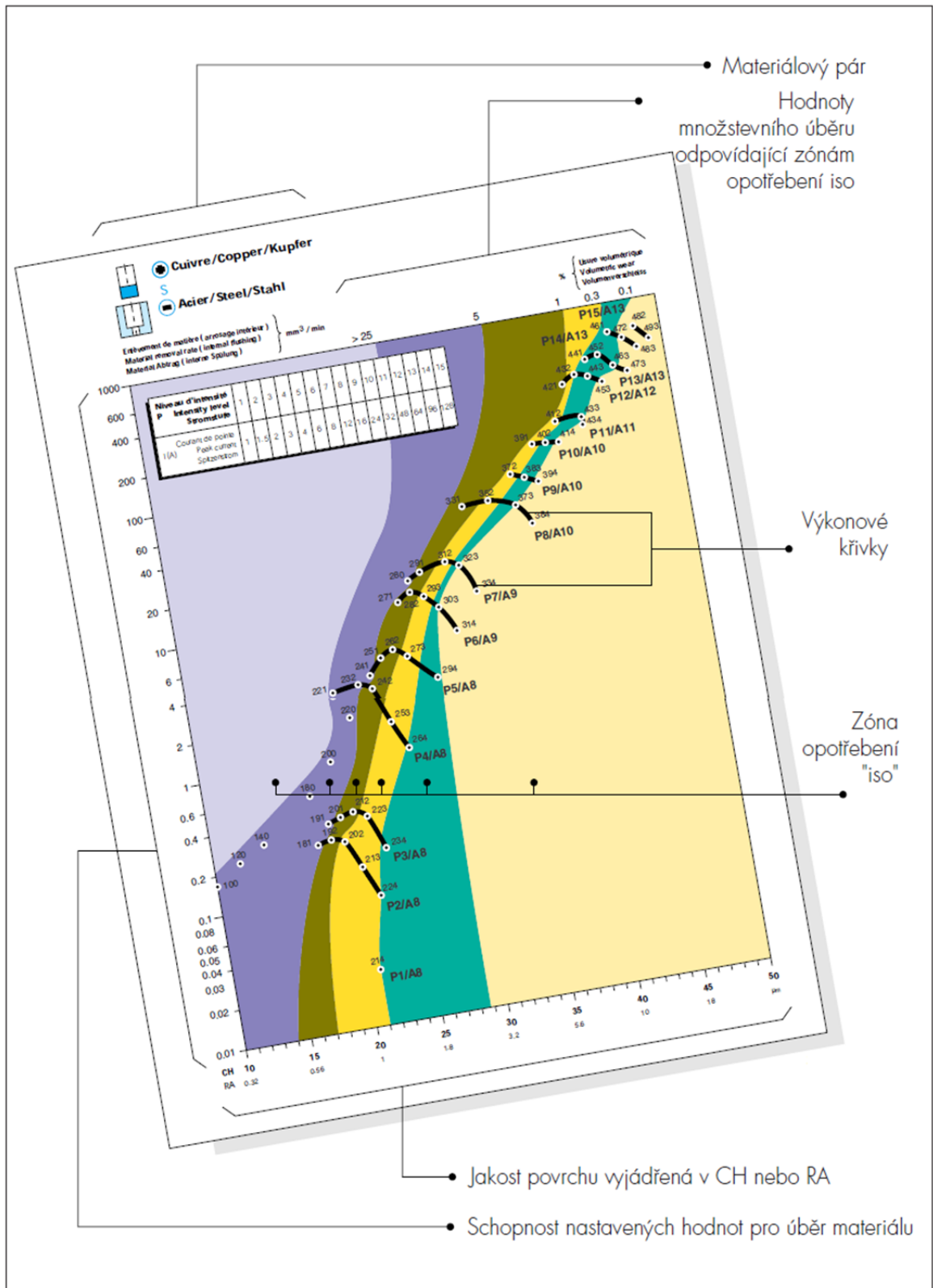
## TECHNOLOGY CURVES



# PŘÍLOHA 5



# PŘÍLOHA 6



## PŘÍLOHA 7

