

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ PŘI VÝROBĚ TVAROVÝCH DUTIN

THE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING IN PRODUCTION OF SHAPED MODULS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Jan Kalenda

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Karel Osička

BRNO 2009

ABSTRAKT

V práci je teoreticky popsána výroba tvarových dutin za pomoci metody elektroerozivního hloubení. Možnosti použití, upínání a výroby nástrojových elektrod pro vlastní proces elektroeroze. Popsána je také dosahující kvalita obrobené plochy i povrchové vrstvy při použití procesu elektroerozivního hloubení tvarových dutin.

Klíčová slova

elektroerozivní obrábění, nekonvenční technologie, materiály nástrojových elektrod, EDM technologie.

ABSTRACT

In this diploma thesis is theoretically written about the production of shaped cavities using electroerosive sinking. The possibilities of usage and the production of electrodes for own usage likewise development of technology, tools and machines for electroerosive machining. The quality of machined surface and surface layer using own process of electroerosive sinking of shaped cavities are as well mentioned in this project.

Key words

electro machining, EDM technology, unconvertional technology, elektroerosive sinking tools.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KALENDA, Jan. *Elektroerozivní obrábění při výrobě tvarových dutin: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 63 s., příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „**Elektroerozivní obrábění při výrobě tvarových dutin**“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20. 5. 2009

.....
Jan Kalenda

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu práce Ing. Karlu Osičkovi a společnosti Brass s.r.o. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod	9
1.1 Charakteristika nekonvenčního obrábění	10
1.2 Rozdíly konvenčních a nekonvenčních technologií.....	10
1.3 Rozdělení nekonvenčních metod	10
1.3.1 Oddělování materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem ..	10
1.3.2 Oddělování materiálu tepelným účinkem	11
1.3.3 Oddělování materiálu mechanickým účinkem	11
2 Teorie elektroerozivního obrábění	12
2.1 Historie elektroerozivního obrábění	12
2.2 Technologické využití elektroerozivního obrábění	13
2.3 Fyzikální princip elektroerozivního obrábění	13
2.4 Charakteristika výboje	15
2.5 Fáze výboje	15
2.6 Časový průběh výboje	18
2.7 Využití výboje	19
2.8 Charakter impulzů	21
2.9 Generátory - zdroje elektrické energie	22
2.9.1 Závislé elektrojiskrové generátory	22
2.9.2 Nezávislé (pulzní) generátory	23
3 Nástrojové elektrody	25
3.1 Rozměry nástrojových elektrod	25
3.2 Regulace přísuvu nástrojové elektrody	26
3.3 Pohyb nástrojových elektrod při výrobě tvarových dutin	27
3.3.1 Vertikální pohyb v ose z	27
3.3.2 Lineární pohyb ve dvou osách	28
3.3.3 Kruhový pohyb ve dvou osách	28
3.3.4 Pohyb ve dvou osách – odvalování	28
3.3.5 Pohyb ve dvou osách – ve šroubovici	29
3.3.6 Lineární pohyb ve třech osách	29
3.3.7 Planetové cykly	30
3.4 Dosahovaná drsnost po erozivním obrábění	31
3.4.1 Stav povrchové vrstvy	35
3.5 Materiál nástrojových elektrod	36
3.6 Výroba nástrojových elektrod a jejich použití	41
3.6.1 Výroba grafitových elektrod	43
3.6.2 Porovnání rezných podmínek u obrábění mědi a grafitu	45
3.6.3 Vysokorychlostní obrábění	45
3.7 Upínání nástrojových elektrod	47
3.7.1 Upínací systémy 3R Macro Junior	47
3.7.2 Upínací systém 3R Macro	48
3.7.3 Upínací systém 3R Micro	48
3.7.4 Upínací systém Hirschmann	48
3.7.5 Upínací trny	49
3.7.6 Upínání Minifix	49

3.8 Uložení nástrojových elektrod.....	50
3.9 Dielektrikum	50
3.9.1 Konstrukční řešení odvodu nečistot	53
3.9.2 Agregát dielektrika	54
4 Technicko-Ekonomické zhodnocení.....	56
Závěr	58
Seznam použitých zdrojů	59
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	62
Seznam příloh	63

ÚVOD

Pod souhrnný pojem „Nekonvenční metody obrábění“, dále jen NMO, se zahrnují způsoby obrábění, které na rozdíl od klasických technologií třískového obrábění v převážné míře nevyužívají mechanické práce pro úběr materiálu. Nekonvenční metody obrábění jsou založeny na využití některého fyzikálního, nebo fyzikálně-chemického principu k úběru materiálu, za vesměs bezsilového působení na obráběný materiál a bez vzniku třísek. (1)

Technologie na bázi elektroeroze procházela dynamickým rozvojem a první stroj pro hloubení ukázala firma Agie již v roce 1955 na Evropské výstavě obráběcích strojů v Miláně. (1,2)

V současné době se na evropském technickém poli působnosti udržuje několik firem, které způsobily mohutnou invazi strojů do strojírenského průmyslu.

Vysoké nároky na tvarovou složitost nástrojů a konstrukci nástrojů vedou k využívání vyššího podílu těžkoobrobitelných materiálů s vlastnostmi, jako jsou žárupevnost, žáruvzdornost a vysokopevnostní charakteristiky. Pro tuto skupinu materiálů není moc možností vlastního obrobení. Nejvíce se uchytily drátově řezací stroje, hloubící stroje v nástrojárnách a vysokorychlostní obrábění na CNC strojích. Využívají se pro výrobu střížných a lisovacích nástrojů, forem pro tlakové lití atd.

Dnes jsou kladeny zvýšené nároky v odvětvích, jako jsou technologie či konstrukce střížných nástrojů a nemalé uplatnění najde i při výrobě zápuštěk a forem.

1.1 Charakteristika nekonvenčního obrábění

Za využíváním metod NMO stojí užívání materiálů s vysokou pevností, tvrdostí, houževnatostí, odolností proti opotřebení apod. (2)

Charakteristické body pro NMO:

- možnost obrábět složité tvary a tvarové dutiny v materiálech o vysokých mechanických vlastnostech,
- nástroj bývá většinou tvrdší jako obráběný materiál,
- výkonnost a rychlost obrábění nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu,
- u NMO je možná automatizace, plné zavedení mechanizace, a možnost včlenění dané operace do výrobní linky,
- současně NMO umožňuje zvýšení sériovosti výroby při snížení pracnosti v daných operacích,
- při používání některých metod nekonvenčního obrábění se mění vlastnosti povrchové vrstvy, jako je zvýšení únavové pevnosti, odolnosti proti korozi apod.

1.2 Rozdíly konvenčních a nekonvenčních technologií

Obě tyto metody patří do skupin technologií, které byly rozvinuté v posledních šedesáti letech dvacátého století. (2)

Vlastnosti konvenčního obrábění:

- materiál nástroje má být tvrdší, než je materiál obrobku,
- při obrábění je použitý zdroj energie, který je přeměněn na jednoduchou mechanickou energii pro obrobení materiálu,
- je použito určité množství energie na porušení molekulární soudržnosti materiálu. Problém může nastat při nemožnosti působení velké síly.

Vlastnosti nekonvenčního obrábění:

- nezáleží na mechanických vlastnostech obráběného materiálu, jako jsou pevnost, tvrdost a houževnatost,
- vlivem impulzů výboje se oddělují částice materiálu na více pozicích a odchází méně tepla do obrobku,
- při úběru materiálu nevzniká řezný odpor, obrobky se nedeformují vlivem mechanického zatížení.

1.3 Rozdělení nekonvenčních metod

1.3.1 Oddělování materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem

- elektrochemické obrábění (Electro Chemical Machining - ECM),
- chemické obrábění (Chemical Machining – CM),

1.3.2 Oddělování materiálu tepelným účinkem

- elektroerozivní obrábění (Electro Discharge Machining – EDM),
- obrábění paprskem plazmy (Plasma Beam Machining – PBM),
- obrábění paprskem laseru (Laser Beam Machining - EBM),

1.3.3 Oddělování materiálu mechanickým účinkem

- ultrazvukové obrábění (Ultrasonic Machining – USM),
- obrábění paprskem vody (Water Jet Machining – WJM).

Tab. 1.1 Technologické parametry nekonvenčních metod obrábění (4)

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

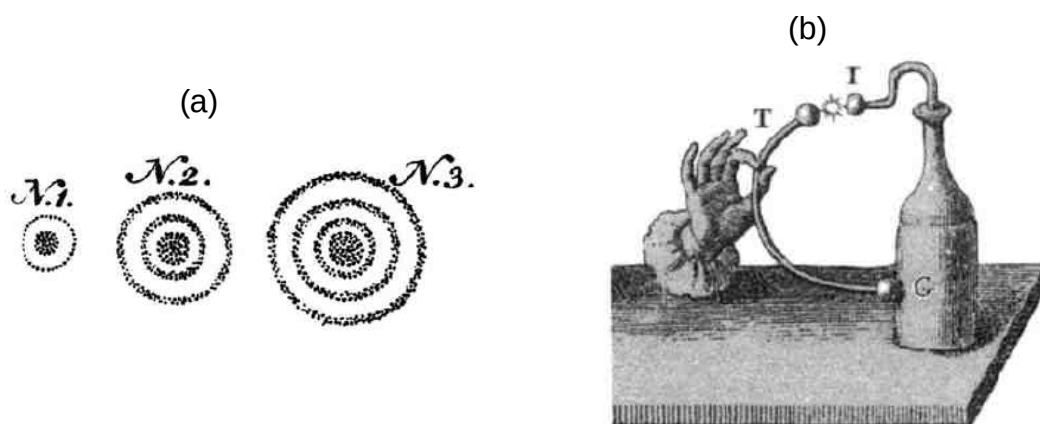
2 TEORIE ELEKTROEROZIVNÍHO OBRÁBĚNÍ

Elektroerozivní obrábění patří mezi jednu z nejrozšířenějších metod nekonvenčního obrábění, mimo jiné využívá též elektrotepelných principů úběru materiálu. Ve firmách se s ní setkáváme pod zkratkou EDM (Elektro Discharge Machining).

2.1 Historie elektroerozivního obrábění

Za první zmínku se považuje objev elektrických výbojů, o které se zajímal anglický vědec a chemik J. Priestley. Samotný objev se datuje k roku 1766, kdy si jako první všimnul erozivních kráterů, které zanechávají elektrické výboje na povrchu katody.(2)

Elektrické pulzní oblouky a první jiskry byly pozorovány při tření již v první polovině 18. století za pomoci Leydenovy nádoby, což byly prvotní kondenzátory. Spojení několika těchto Leydenových nádob do paralelního zapojení vznikly předchůdci prvních baterií. (1)



Obr. 2.1 Leydenova nádoba (1)

- (a) nákresy erozivních kráterů na katodě z roku 1766 od J. Priestleyho,
(b) vznik elektrického výboje na Leydenově nádobě od Alessandro Volty.

Samotný princip elektrických výbojů pro elektroerozi se stal jedním z hlavních předmětů pozdějších výzkumů v oblasti plynné fyziky a kapalně fáze.

Elektroeroze probíhá za určitých specifik, vzdálenost mezi elektrodami je od 5 do 100 mikrometru, celý proces musí probíhat v kapalném prostředí, obráběné materiály musí mít vlastní elektrickou vodivost.

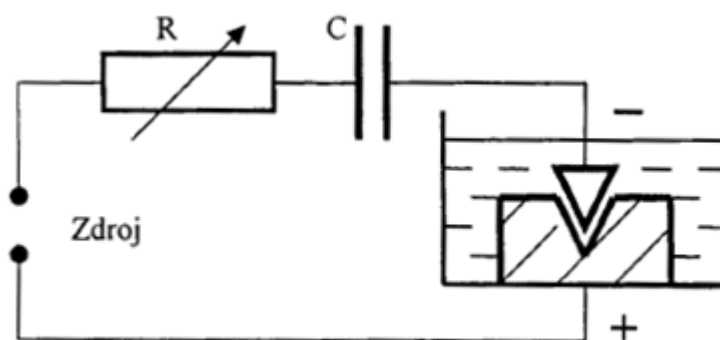
Druhé světové válce vděčíme za nenadálý růst a vznik různých výrobních technologií. Na první technologické využití elektroerozivního obrábění poukázali vědci z Ruska. Byli to manželé Lazarenkovi, kteří prováděli intenzivní výzkumy v oblasti elektrických výbojů pro obrábění kovů.

Manžele Lazarenkovi definovali majoritní zákonitosti elektroeroze:

- všechny elektricky vodivé materiály podléhají elektrické erozi,
- elektricky vodivé materiály podléhají elektrické korozi v kapalném prostředí (dielektriku), tak i v plynném prostředí.

Vědci také navrhli vlastní zapojení pomocí generátoru, které bylo dlouhou dobu považováno za zdroj výbojů v oblasti elektroerozivního obrábění.

Zjistili, že vhodným zapojením a volbou parametrů obvodu lze změnit stacionární výboje (oblouky) na opakované nestacionární výboje. Tím umožnili podstatně přesnější rozrušování materiálu.



Obr. 2.2 Lazarenkovo zapojení (1)

2.2 Technologické využití elektroerozivního obrábění

Technologické využití principu elektroerozivního obrábění existuje v průmyslu v několika modifikacích:

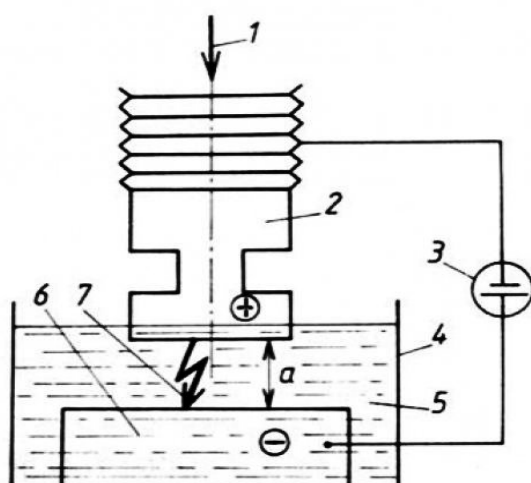
- elektroerozivní hloubení,
- elektroerozivní řezání drátkem,
- elektroerozivní mikroděrování,
- elektroerozivní nanášení povlaků,
- elektrokontaktní obrábění,
- anodomechanické řezání.

2.3 Fyzikální princip elektroerozivního obrábění

Při přiblížení obrobku a nástroje (elektrody), na který je přivedeno elektrické pulzní napětí, dojde k rychle periodicky opakujícímu se jiskrovému výboji. Vlastní proces obrábění musí být ponořen pod pracovním médiem – dielektrikum, to je kapalina s vysokým elektrickým odporem. Za úkol má také odplavovat oderodované částičky a chladicí účinky. (1)

Vzdálenost mezi obrobkem a elektrodou záleží:

- na izolačních vlastnostech dielektrika,
- na stupni znečištění daného dielektrika,
- na vzdálenosti mezi obrobkem a elektrodou.



- 1 – směr posuvu nástrojové elektrody,
- 2 – nástrojová elektroda,
- 3 – generátor,
- 4 – pracovní vana,
- 5 – tekuté dielektrikum,
- 6 – obrobek,
- 7 – elektrický výboj.

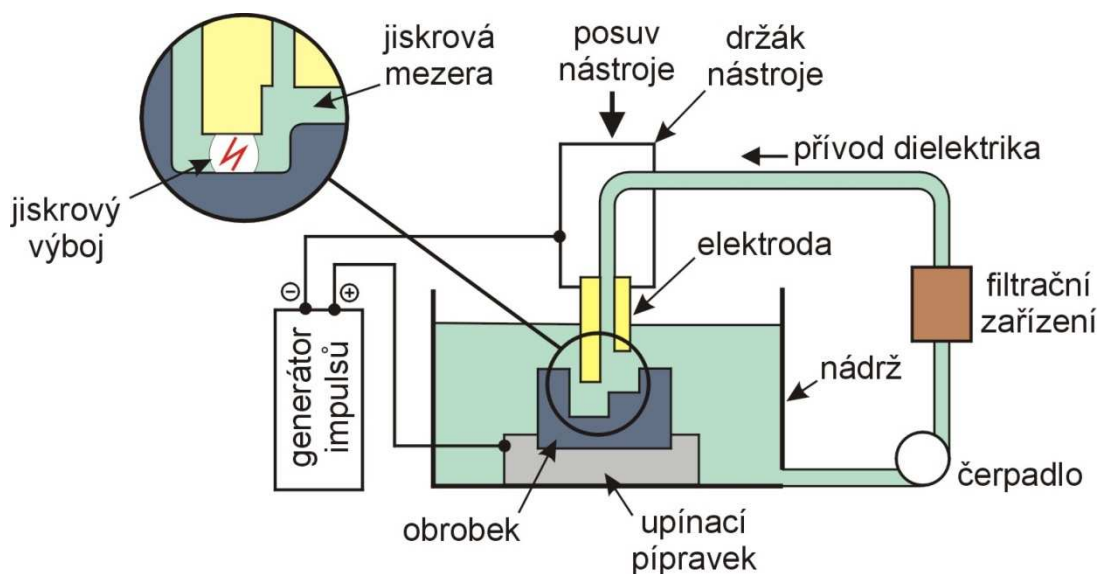
Obr. 2.3 Detail elektroeroze (10)

Výboj vzniká na místě s nejsilnějším napětovým elektrickým polem. Vlivem působení elektrického napětového pole mezi elektrodami se uvádějí do pohybu volné záporné a kladné ionty. Ty se zrychlují a nabývají vysoké rychlosti. Tímto způsobem se vytvoří ionizovaný (vodivý) kanál. Díky němu začíná mezi elektrodami protékat elektrický proud a vznikají výboje, které mají za následek řadu dalších srážek částic.

V takto vzniklém plazmovém pásmu se teplota pohybuje kolem 3000 – 12.000 °C. Vlivem této vysoké teploty se taví a odpařuje určité množství materiálu na elektrodách.

Protože se současně vlivem vysoké teploty odpařuje dielektrikum, vzniká plynová bublina, jejíž tlak obsahuje vysoké hodnoty. Pokud dojde k přerušení proudu, vyvolá se pokles teploty a tím imploduje bublina. Do uzavřeného prostoru ihned proniká dielektrikum, které s vysokými hodnotami dynamických sil mají za následek vymrštění roztaveného materiálu z kráteru. Chladícím účinkem dielektrika materiál tuhne a je odváděn ve formě drobných částíček.

Na povrchu elektrod vznikají drobné krátery.(9)



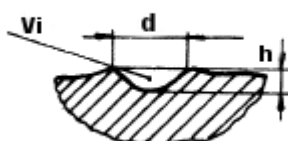
Obr. 2.4 Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění (2)

2.4 Charakteristika výboje

Tvar a velikost kráteru, který vznikne po elektrickém výboji, je dán velikostí vybíjecí energie. Profil vzniklého kráteru závisí na hodnotě přivedené energie a době působení. Tyto vlastnosti mají významný vliv na drsnost opracované plochy, přesnosti rozměrů a účinnost procesu.(1)

Množství odebraného materiálu je přímo úměrné vybíjecí energii. Lze se vypočítat dle vztahu:

$$V_i = K \cdot W_i \quad (2.1)$$



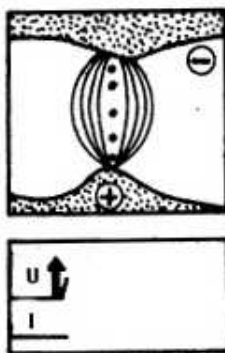
Obr. 2.5 Profil kráteru (1)

2.5 Fáze výboje

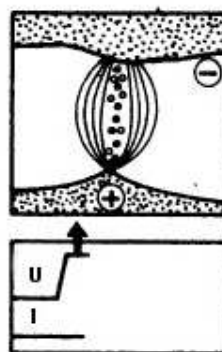
Před zahájením obráběcího procesu jsou pozitivní ionty a elektrony volně rozptýleny v obrobku i v nástroji.(1)

Fáze č. 1:

Vytváření elektrického pole začíná v okamžiku přiložení napětí na obě elektrody. Elektrody nejsou ideálně rovné, proto se v místě minimální vzdálenosti elektrod od sebe vytváří místo maximálního gradientu. Do tohoto místa jsou vtahovány elektricky vodivé částice (nečistoty).(1)



Obr. 2.6 Fáze č. 1.(1)



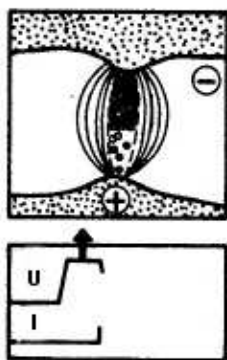
Obr. 2.7 Fáze č. 2. (1)

Fáze č. 2:

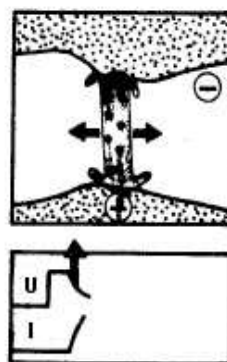
Napětí, které je přiložené na elektrody, dosahuje maximální hodnoty. Základem použitelným k zažehnutí výboje jsou elektricky vodivé částice, které tvoří můstky.(1)

Fáze č. 3:

Ze záporně nabitých elektrod se vlivem elektrického pole začínají uvolňovat částice – elektrony. V prostoru mezi elektrodami se srážejí s neutrálními částicemi a vznikají tak kladné a záporné ionty. Tento proces je nazýván ionizací prostředí.(1)



Obr. 2.8 Fáze č. 3. (1)



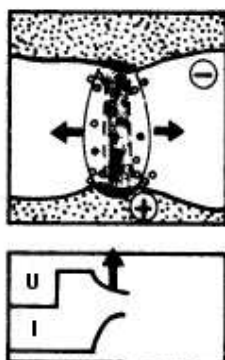
Obr. 2.9 Fáze č. 4. (1)

Fáze č. 4:

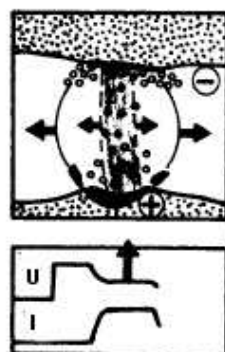
Klesá odpor výbojového kanálu vlivem obalujících se iontů na střed budoucího výbojového kanálu. Začíná protékat proud mezi elektrodami, vzrůstá proudová hustota a vytváří se plasmatický, vodivý kanál. Napětí mezi elektrodami má klesající charakter, ale proud nadále roste.(1)

Fáze č. 5:

V této fázi se začíná odpařovat dielektrikum, čímž v něm vznikají bubliny. Dochází k vysokému uvolňování tepelné energie, což způsobují nárazující částice. Dále se natavují ohraničující místa na elektrodách. Napětí mezi elektrodami se ustaluje na zápalné hodnotě výboje a proud dosahuje svojí maximální hodnoty.(1)



Obr. 2.10 Fáze č. 5. (1)



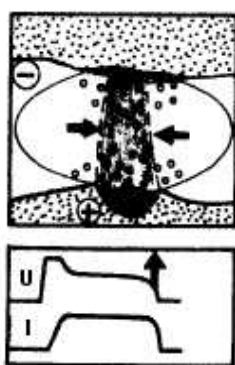
Obr. 2.11 Fáze č. 6. (1)

Fáze č. 6:

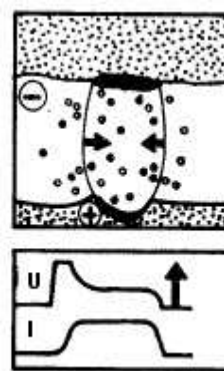
V této fázi se více rozpíná bublina. Intenzivněji se taví a vypařuje materiál.(1)

Fáze č. 7:

Za snížení dodávky tepla v mezielektrodové mezeře může přerušení energie a pokles proudu. Za začátkem imploze bubliny je pokles teploty. Síly v plazmatickém poli a pokles tlaků plynů způsobují rozrušení materiálu vytrháváním nataveného materiálu do mezielektrodového prostoru.(1)



Obr. 2.12 Fáze č. 7. (1)



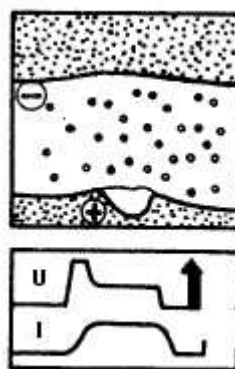
Obr. 2.13 Fáze č. 8. (1)

Fáze č. 8:

Výboj a bublina zaniká, pracovní proud i napětí v mezielektrodovém prostoru klesá na nulovou hodnotu. Dielektrikum ochlazuje vzniklé krátery a zabraňuje většímu tepelnému ovlivnění vrstvy. Vzniklé spaliny a mikročástice ve tvaru kuliček jsou volně rozptýlené po dielektrické kapalině.(1)

Fáze č. 9:

Tohle je stav před začátkem dalšího výboje. V dielektriku je rozpuštěno množství nečistot z procesu elektroeroze. Obsahuje také volné ionty, které tvoří základ nového výbojového kanálu.(1)



Obr. 2.14 Fáze č. 9. (1)

U elektroerozivního obrábění se snažíme dosáhnout opakovanými výboji na jedné elektrodě (obrobku), maximálního úběru materiálu. Pak na druhé elektrodě (nástroji) naopak co nejmenšího úběru materiálu, čím se snažíme eliminovat opotřebení nástroje a prodloužit jeho životnost.

Abychom toho mohli dosáhnout, musíme volit vhodné pracovní podmínky, které jsou především dány:

vhodným zapojením do elektrického obvodu (elektrické parametry jednotlivých výbojů a jejich četnost),

volbou správného parametru nástrojové elektrody vzhledem k obráběnému materiálu vhodným volením pracovního prostředí (dielektrika).(1)

2.6 Časový průběh výboje

Uvedený časový úsek výboje je obvykle dán řadou charakteristik. Časový průběh je zde popsán z nejčastěji používaného polovodičového generátoru i s vybranými fázemi výboje.

Pro dobu impulzu platí vztah:

$$t_i = t_d + t_e \quad (2.2)$$

t_i : doba impulzu. Časový úsek mezi zapojením a vypojením generátoru,

t_d : doba zpoždění výboje. Čas mezi okamžikem zapojení generátoru a průrazem dielektrika,

t_e : doba výboje. Časový úsek mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru,

t_o : doba pauzy. Časový úsek mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru,

T : doba periody. Časový úsek součtu doby impulzu a prodlevy určující frekvenci výbojů,

U_z : napětí naprázdno. Napětí při zapnutí generátoru.

I : pracovní proud výboje. Maximální vybíjecí proud protékající elektrodami v okamžiku výboje,

I_e : střední vybíjecí proud. Střední hodnota proudu mezi okamžikem zapálení výboje a vypnutí generátoru,

U_e : střední vybíjecí napětí. Střední hodnota napětí mezi okamžikem zapálení výboje a vypnutí generátoru,

U_k : napětí při zhasnutí výboje. Tato hodnota nepatří mezi volitelné veličiny a je závislá na ostatních pracovních podmínkách.(1)

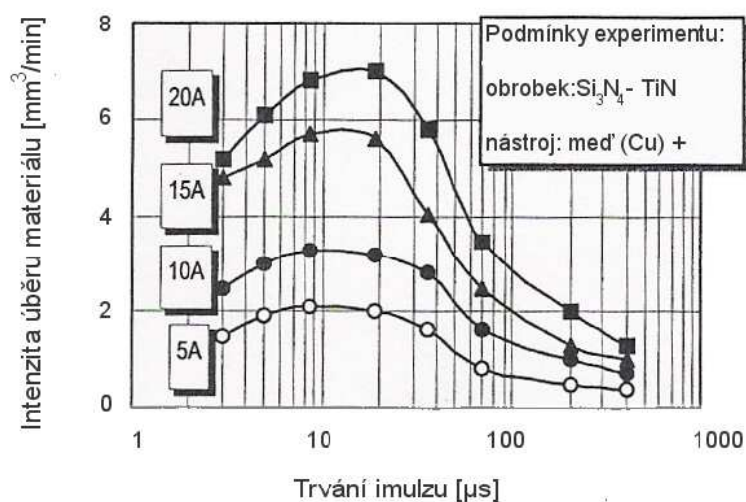
Vztah pro energii jednotlivých výbojů.(1)

$$W_i = \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (2.3)$$

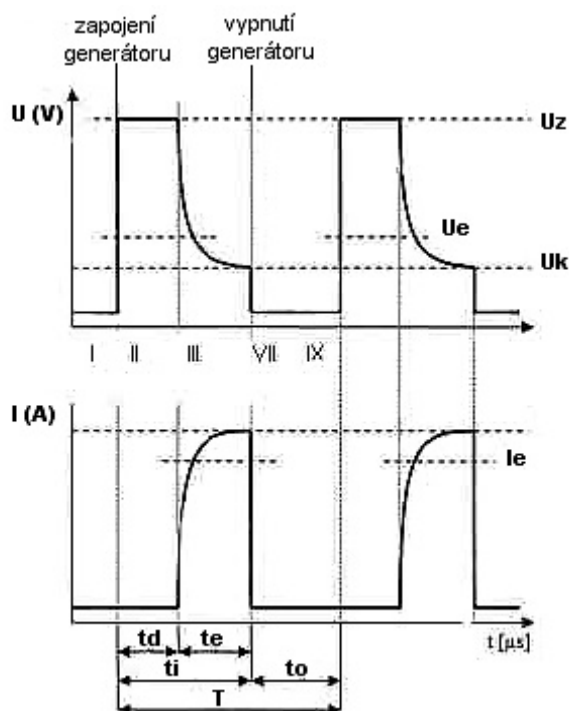
Vztah pro celkové množství odebraného materiálu za jednotku času.(1)

$$Q_v = K \cdot f \cdot \eta \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (2.4)$$

Na obrázku grafu je znázorněna závislost úběru materiálu na délce trvání impulzu t_i pro různé proudové velikosti.



Obr. 2.15 Závislost úběru materiálu na délce trvání impulzu pro různé proudové velikosti.(2)



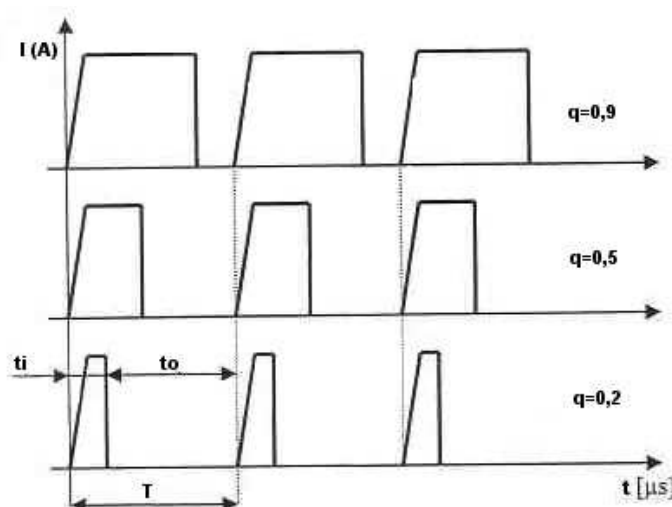
Obr. 2.16 Časový průběh výboje (1)

2.7 Využití výboje

Pro velký význam časového průběhu výboje na intenzitě úběru materiálu a kvalitě obráběné plochy je vhodné zavést veličinu „q“, pro kterou platí:

$$q = \frac{t_i}{T} = \frac{t_i}{t_i + t_o} \quad (2.5)$$

Na obrázku 2.17 je názorněji vidět pohled na časový průběh výboje. Veličina q umožňuje charakterizovat číselnou hodnotu výboje lépe, než jak jsou v praxi uváděny hodnoty parametrů (t_i , t_o , T) v mikrosekundách.(1)



Obr. 2.17 Časové využití periody výboje (1)

Podle časového průběhu dodávané energie do místa výboje, dělíme elektrické výboje:

- výboje s elektrickou jiskrou,
- výboje s nestacionárním krátkodobým elektrickým obloukem.(1)

Výboje s elektrickou jiskrou.

Tyto výboje jsou charakteristické krátkou dobou impulzu ($t_i = 10^{-4}$ až 10^{-6} s), vše při malých hodnotách časového využití periody výboje ($q = 0,03-0,2$) a většinou při značně vysokých frekvencích výbojů.(1)

Vyšší úbytek anody vůči katodě způsobuje převládající elektronová vodivost ve výbojovém kanálu. Uvolněné elektrony mají vyšší tepelný účinek dopadu elektronů na anodě. V prostoru dopadajících elektronů se nachází velmi vysoká hustota proudu, asi kolem 10^6 A.mm⁻². Při této hustotě proudu vznikají teploty ve výbojovém kanále kolem 10 000 °C a konce ntrace energie dosahuje hodnot 10^5 až 10^7 W.mm⁻².(1)

S ohledem na nižší energie jednotlivých výbojů jsou generované výboje používány v převážné míře pro obrábění s menšími úběry materiálu, jedná se tedy o dokončování.(1)

Výboje s nestacionárním krátkodobým elektrickým obloukem.

Tyto typy jsou charakterizovány delší dobou impulzu $t_i > 10^{-4}$ s, dále vyššími hodnotami časového využití periody výboje $q = 0,2$ až 1 a nakonec nižšími frekvencemi výbojů. Uvolněné částice z výbojového kanálu, kde převládá iontová vodivost, mají větší tepelný účinek při dopadu na katodu. To má vliv na úběr materiálu z této elektrody.(1)

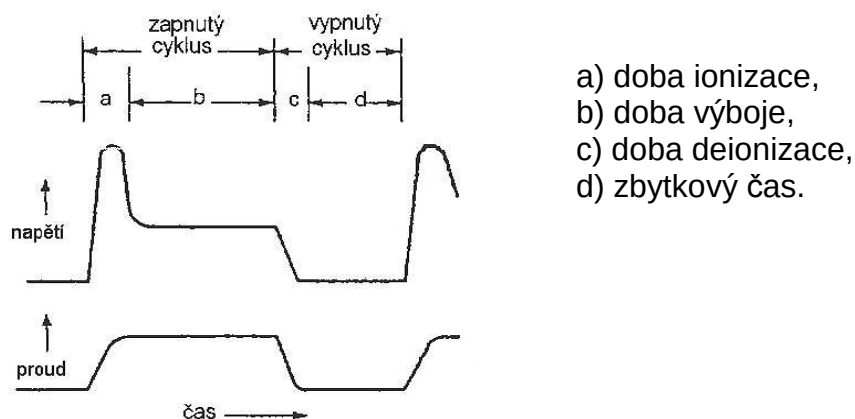
Proudová hustota ve výbojovém kanále se pohybuje kolem hodnot 100 až 1000 A.mm⁻², při teplotě 3300 až 3600 °C.

Faktory, které ovlivňují tvar vyhloubeného kráteru, mohou obecně vycházet z předpokladu pro daný elektroerozivní stroj. Jsou to vlivy závislé na jednotlivých výbojích a na době jejich trvání. Vliv trvání výboje ovlivňuje mimo jiné také drsnost obráběného povrchu a strukturní změny povrchu.(1)

V praxi se využívají programy, které obsahují přednastavené jednotlivé parametry, pro konkrétní operace. Programy jsou uloženy v řídicím systému jednotlivých strojů.

2.8 Charakter impulzů

Jedny z nejdůležitějších charakteristik procesu jsou parametry impulzů, ty také určují technologické ukazatele obrábění. Různé formy elektrických výbojů se využívají pro různé technologické aplikace. Jsou přivedené na nástrojovou elektrodu a obrobek ve formě impulzů o různé frekvenci.(1)

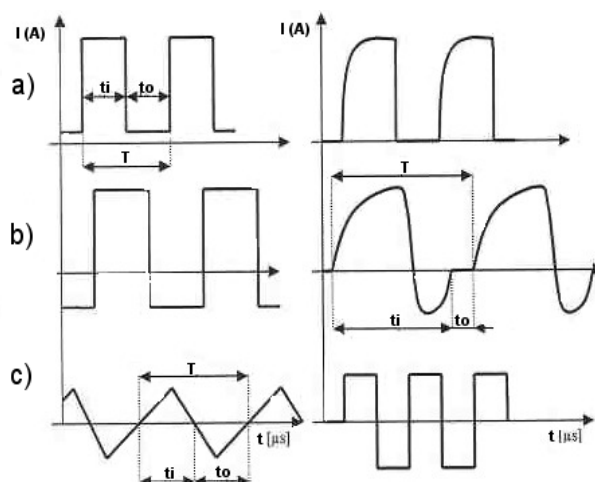


Obr. 2.18 Jednotlivého výboje (2)

Napětí, proud a jejich samotný tvar je charakteristický pro každý impulz.

Proudové impulzy dělíme dle tvaru takto:

- jednopólové impulzy (a),
- střídavé impulzy nesymetrické (b),
- dvoupólové impulzy symetrické (c).(1)



Obr. 2.19 Rozdělení impulzu dle tvaru (1)

2.9 Generátory - zdroje elektrické energie

Generátor je jednou z velice důležitých částí elektroerozivního stroje a díky němu se vyrábí jednotlivé elektrické impulzy. Jejich nejdůležitější charakteristiky tvoří technologické ukazatele obrábění. U jednotlivých technologických aplikací jako hrubování nebo obrábění na čisto nevyužívá jednotlivých forem a parametrů elektrických výbojů. Tvar, napětí a proud je charakteristika každého impulsu.

Vlastní zapojení a konstrukce generátoru se používají v několika modifikacích:

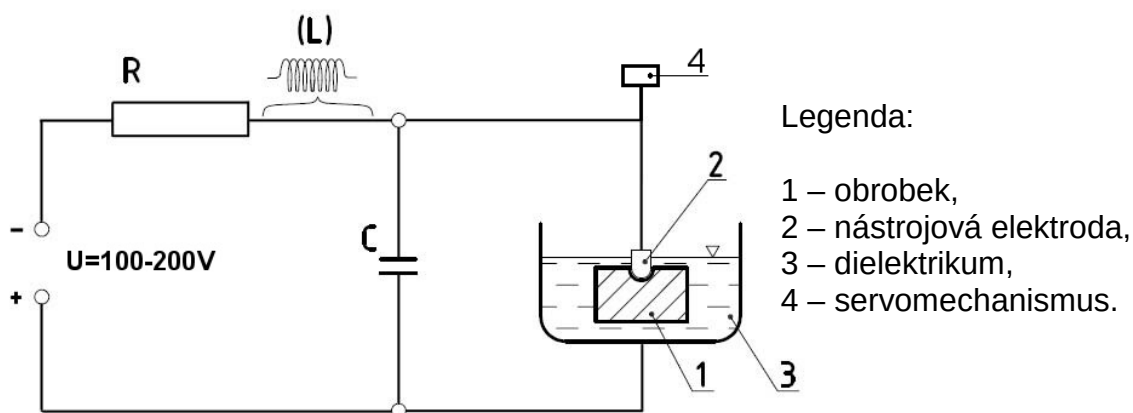
- závislé elektrojiskrové generátory,
- kolektorové závislé generátory,
- nezávislé tranzistorové širokorozsahové generátory.(1)

2.9.1 Závislé elektrojiskrové generátory

Jiným názvem se také nazývají relaxační generátory, patří k nejstarším a dosud používaným zdrojům impulzů. Vlastní princip generátoru spočívá v opakujícím se nabíjení a vybíjení kondenzátoru ze zdroje stejnosměrného napětí. Kondenzátor se vybije tehdy, pokud velikost napětí dosáhne průrazné hodnoty. Znečištění dielektrika a velikost mezelektrodové vzdálenosti ovlivňují velikost průrazného napětí. Frekvenci a energii výbojů můžeme změnit pomocí změny poměrů v jiskřišti. Z této závislosti na poměrech v jiskřišti se generátory jmenují závislé.

Zdroje produkují velmi krátké výboje o velikosti $t_f=10^{-4}$ až 10^{-7} s a převládá zde elektronová vodivost. U tohoto typu generátoru je vhodné zapojení obrobku do obvodu jako anoda a nástroje jako katodu. Toto zapojení se volí z důvodu menšího úbytku materiálu na nástroji.

Velikost pracovní mezery v jiskřišti se vyhodnocuje pomocí napěťových poměrů, které se jmenují servomechanismus. Hodnota nabíjecího proudu se mění se změnou odporu R , tím se současně nabíjí kondenzátor (frekvence).(9)



Obr. 2.20 Schéma elektrického obvodu s RC/RLC prvky (9)

Pokud se zapojí indukčnost (L) v nabíjecím obvodu (RLC) dle obrázku 2.20, dosáhne se ustálení nabíjecího proudu a tím zkrácení doby nabíjení. Tím

vzroste frekvence a výkon, úběrovost při obrábění oceli dosahuje hodnoty až $2000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.(9)

K oceňovaným výhodám patří nízká poruchovost, jednoduchá konstrukce, spolehlivost.

Za nevýhody se považuje objemový úbytek nástroje, který tvoří 30 % i více. Omezená možnost regulace tvaru a frekvence výbojů, nízká produktivita obrábění.

Zdokonalením těchto relaxačních generátorů probíhalo pomocí doplňkových zařízení k relaxačnímu obvodu, která snižují závislost na vybíjecí mezeře.(9)

2.9.2 Nezávislé (pulzní) generátory

Pomocí těchto nezávislých generátorů lze nastavovat pracovní podmínky eroze bez ohledů na poměry v pracovní mezeře. Byly vyvinuty za účelem zvýšení produktivity obrábění. Charakteristickým znakem je delší doba trvání impulzů, nižší pracovní napětí a v hodně případech opačná polarita výbojů (převaha iontové vodivosti – obrobek je připojen na katodu a nástroj je připojen na anodu).(9)

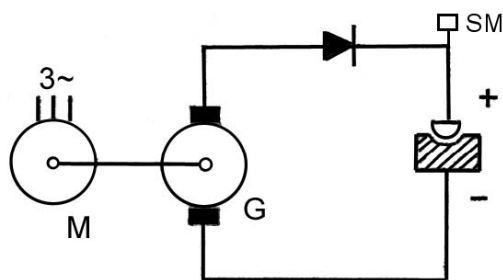
Existují dva typy nezávislých generátorů:

- rotační,
- polovodičové.

Rotační (mechanické, kolektorové generátory)

U tohoto zdroje vznikají impulzy roztáčením dynama pomocí asynchronního motoru o stále frekvenci (např. 400 Hz). Tyto zdroje dosahují značně vysokou úběrovost až $5 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Jako nevýhoda u těchto zdrojů se jeví vyšší hlučnost a dále regulace frekvence pulzů.(9)



Obr. 2.21 Schéma mechanického kolektorového generátoru (1)

Polovodičové (tranzistorové, nezávislé, širokorozsahové generátory)

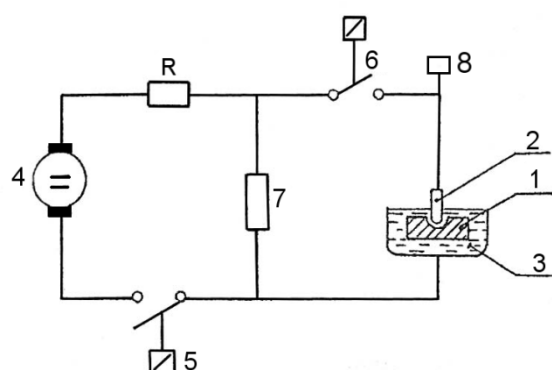
Tranzistorové generátory jsou považovány za generátory druhé generace a umožňují široké nastavení elektrických parametrů. Frekvence lze měnit v rozsahu od 0,5 – 50 Hz.

Tranzistor zapojený do série s jiskřištěm se sepne a na elektrodách se objeví napětí. Pokud je mezielektrodová vzdálenost odpovídající pro vlastní

průraz, protéká po dobu sepnutí tranzistoru obvodem pracovní proud. Pokud dojde k uzavření tranzistoru, dojde k přerušení výboje.

Multivibrátor generuje impulzy a zesiluje je v impulzním zesilovači, který budí výkonové spínací tranzistory. Pracovní proud je určován počtem navzájem paralelně zapojených tranzistorů. Pokud se vhodně zapojí elektrody na jednotlivé tranzistory, je možno obrábět i více elektrodami současně.

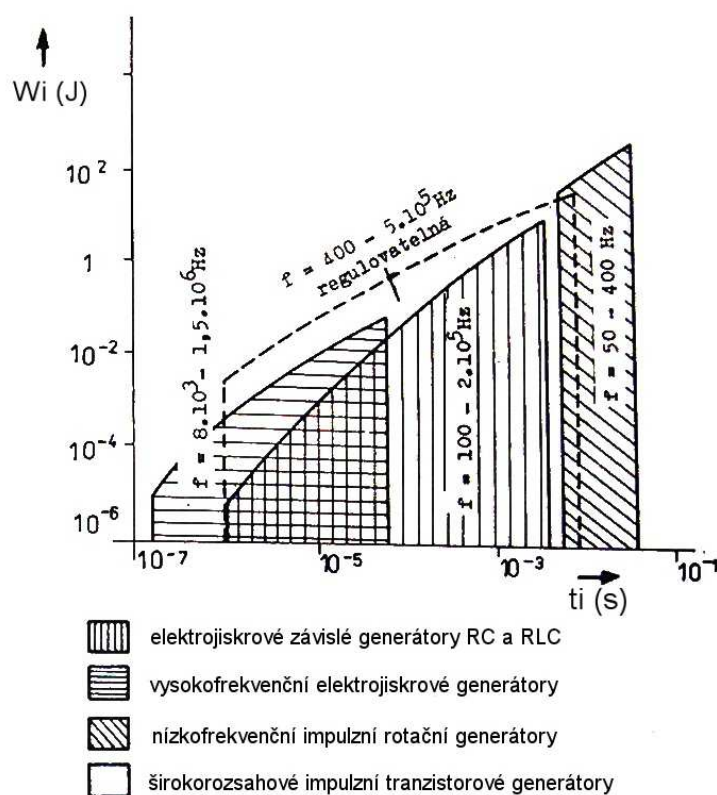
Polovodičové generátory se používají u moderních elektroerozivních obráběcích strojů a jsou řízeny také CNC řídicím systémem obráběcího stroje dle zadaných technologicko-pracovních parametrů.(9)



Legenda:

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

Obr. 2.22 Schéma polovodičového pulzního generátoru (9)



Obr. 2.23 Vzájemné porovnání parametrů výbojů zdrojů (1)

3 NÁSTROJOVÉ ELEKTRODY

Množství celkově odebraného materiálu, který vzniká při působení výboje, se rozloží na úbytek anody a katody. Při obrábění vzniká opotřebení nástroje, které vyvolává změnu jeho rozměru a tvaru. Cílem při volbě pracovních podmínek je zajistit minimální opotřebení nástroje (elektrody) při nesnížení produktivity a drsnosti obrobené plochy.(11)

3.1 Rozměry nástrojových elektrod

Rozměry nástrojové elektrody **D**, vůle mezi elektrodou a obrobkem **M** jsou určující faktory výsledné rozměrové přesnosti obrobené plochy. Vůle mezi elektrodou a obrobkem se skládá z pracovní mezery **GAP**, hodnoty **R_z** a přídávku **z**.(1)

Výpočet vůle **M**:(1)

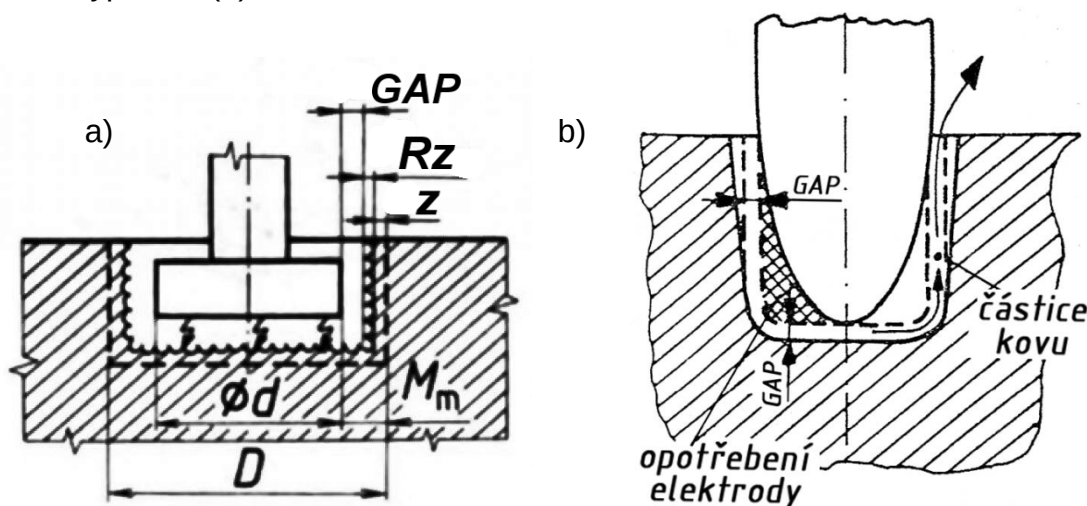
$$M = \text{GAP} + R_z + z \quad (3.1)$$

Výpočet rozměru hrubovací elektrody:(1)

$$d = D - 2 \cdot (\text{GAP} + R_z + z) = D - 2 \cdot M \quad (3.2)$$

Narušená vrstva **z** je také nahrnuta do hrubovacího přídávku. Generátor nastaví **z** normativů pracovní podmínky, které jsou přednastaveny od výrobce stroje. Uvolněné vodivé částice, které vznikají z opotřebování nástrojové elektrody, zapříčiňují vznik nežádoucích bočních výbojů.

Na obrázku 3.1b je vidět vznik nežádoucího kuželového otvoru vlivem bočních výbojů. Dá se tomu předejít správnou konstrukcí elektrody, nebo použitím výplachu.(1)

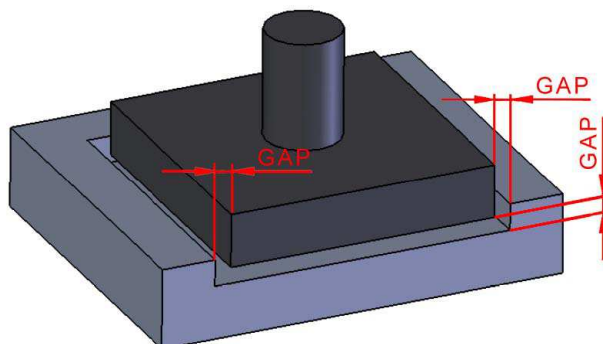


Obr 3.1 Parametry jiskrové mezery (1)

Výboje s nižší energií jednotlivých impulzů se volí při hloubení dokončovacími elektrodami a hodnota **R_z** bude zanedbatelná ve vztahu k hodnotě **GAP**. U dokončovacích elektrod je obrobená dutina větší pouze o hodnotu **GAP**. Boční **GAP** je přibližně 80 % čelního.

Výpočet rozměru dokončovací elektrody:(1)

$$d = D - 2 \cdot \text{GAP} \quad (3.3)$$

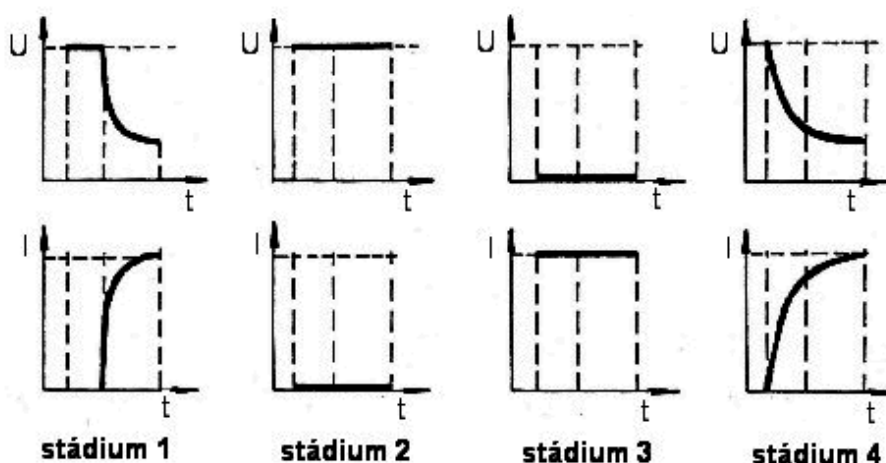


Obr. 3.2 Jiskrová mezera GAP (15)

3.2 Regulace přísuvu nástrojové elektrody

Mezi zásadní parametr elektroerozivního procesu patří velikost jiskrové mezery. Regulaci nástrojové elektrody a nastavení pracovní mezery GAP zajišťuje vlastní servomechanismus. Ten má za úkol nastavování optimální vzdálenosti mezi elektrodou a obrobkem, tím se zajistí plynulý erozivní úběr. Pokud je mezera příliš malá, dochází ke zkratům a světelným výbojům. Jeli naopak příliš velká, obvod se rozevívá a nedochází k výboji.(1)

Na Obr. 3.3 jsou znázorněny čtyři nejdůležitější stádia tvořící regulační strategie při elektroerozivním obrábění.



Obr. 3.3 Napěťové a proudové situace při elektroerozivním obrábění (1)

stádium 1 – pracovní optimální podmínky hloubení,

stádium 2 – chod naprázdno bez výboje v pracovní mezeře. Zapříčiňuje to velká pracovní mezera, nebo vysoký přivedený tlak dielektrika. Regulační elektronika detekuje nulovou hodnotu proudu v jiskřišti,

stádium 3 – vznik zkratu. Regulační elektronika detekuje pokles napětí na velmi nízkou hodnotu. Důvodem bývá přímý kontakt elektrod s obrobkem, vlivem špatného odvedení částic,

stádium 4 – vznik světelných výbojů. Protože je nulová hodnota zpoždění výboje t_d , regulační elektronika vyhodnotí vznik světelného výboje. Způsobuje to nedostatečná deionizace dielektrika, nebo přílišné znečištění, což vede k nárůstu drsnosti a opotřebení nástrojové elektrody. Znečištění dielektrika je zapříčiněno špatnou konstrukcí vyplachování pracovní mezery.(1)

Protože není posuv nástrojové elektrody konstantní, nemůže být i proces odebrání materiálu konstantní. Pokud by se jednalo o ideální stav, tak by se rychlost odebíraného materiálu musela rovnat úměrně rychlosti posuvu elektrody.

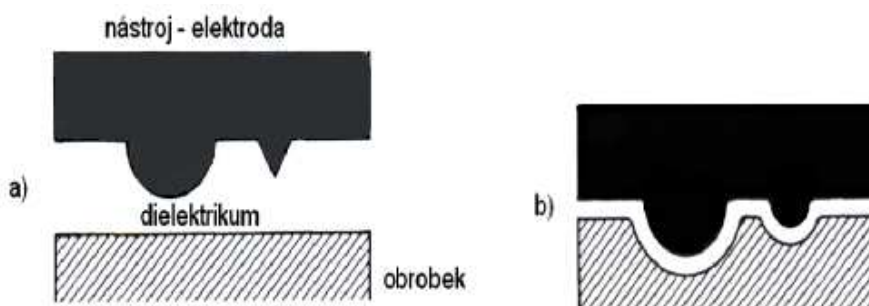
Může nastat situace, kdy řídicí systém může vyhodnotit příliš vysokou hodnotu napětí U . To znamená, že pracovní mezera mezi katodou a anodou je příliš velká a zrychlí posuv elektrody. V opačném případě při přílišné malé mezeře a nízké hodnotě napětí, operační systém stroje vyhodnotí situaci a zastaví přísuv elektrody do záběru. Pokud systém vyhodnotí, že se dosáhlo optimální velikosti mezery, začne posunovat elektrodu opět do záběru.(2)

3.3 Pohyb nástrojových elektrod při výrobě tvarových dutin

Možnost využívání CNC řídicích systémů u procesu elektroeroze vedlo k rozdělení nástrojové elektrody na větší počet elektrod jednoduššího tvaru. Na strojích s CNC řízením lze složitější tvary hloubit i jednoduchou elektrodou, jejíž pohyb je řízen příslušným operačním systémem po dráze.

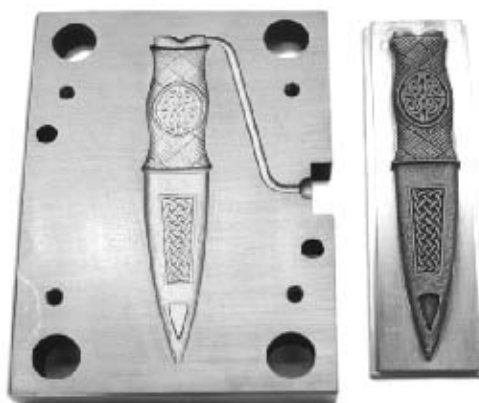
3.3.1 Vertikální pohyb v ose z

Nástrojovou elektrodou můžeme klasicky obrábět pomocí „přenášení“ tvaru vlastní elektrody, kde obrobená část působí jako negativ samotné elektrody. Při obrábění vykonává pohyb pouze svislá osa Z .(6)



Obr. 3.4 Nástrojové elektrody při hloubení (2)

- a) výchozí tvar nástroje bez opotřebení a výchozí tvar obrobku,
- b) konečný tvar nástrojové elektrody a obrobku po hloubení.

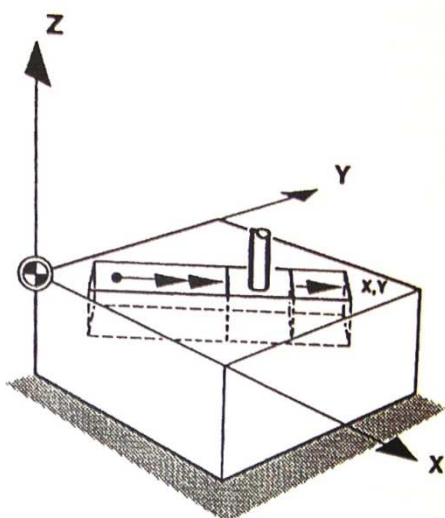


Obr. 3.5 Ukázka možnosti využití elektroeroze při hloubení (12)

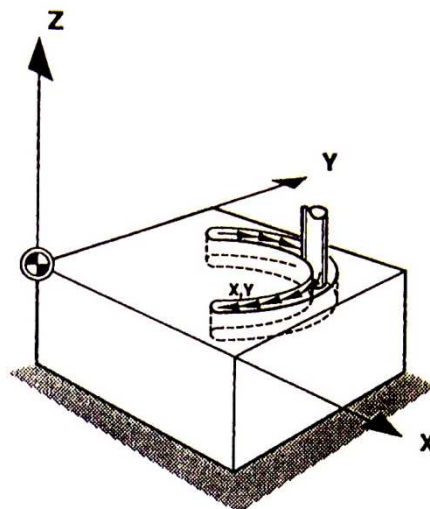
3.3.2 Lineární pohyb ve dvou osách

Nástrojová elektroda se pohybuje po přímce, která leží v hlavní rovině a která není rovnoběžná se souřadnicemi os. Řídicí systém pohybuje dvěma osami současně, takže se elektroda pohybuje po požadované přímce.

Tento pohyb ve dvou osách se nazývá lineární interpolace.(13)



Obr. 3.6 Lineární interpolace (13)



Obr. 3.7 Kruhová interpolace (13)

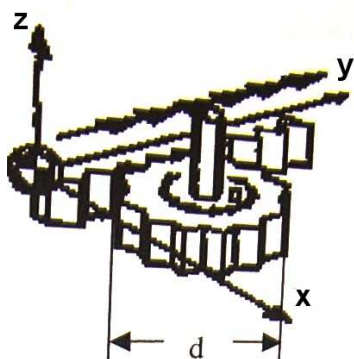
3.3.3 Kruhový pohyb ve dvou osách

Nástroj se pohybuje do cílového bodu po kruhové dráze, která leží v hlavní rovině. Řídicí systém pohybuje dvěma osami současně, takže elektroda se pohybuje přesně po požadované části kruhové dráhy.

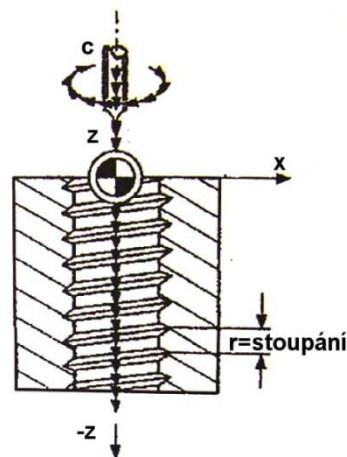
Tento pohyb ve dvou osách se nazývá kruhová interpolace.(13)

3.3.4 Pohyb ve dvou osách – odvalování

Tvar lze vytvořit odvalováním osy Z (C) podél přímky rovnoběžné s osou. Řídicí systém vede nástrojovou elektrodu v lineární ose X a Y, současně pak osu Z tak, že vznikne požadovaný tvar. Pro logistiku řízení se jedná o lineární interpolaci ve dvou osách.(13)



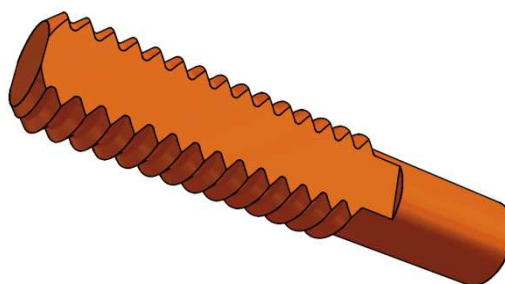
Obr. 3.8 Odvalovací způsob (13)



Obr. 3.9 Pohyb po šroubovici (13)

3.3.5 Pohyb ve dvou osách – ve šroubovici

Řídicí systém pohybuje osou C, což je nástrojová elektroda. Další, a to vertikální pohyb vykonává osa Z. Vedle programování spirály (šroubovice) pomocí zadání cílové pozice v osách Z a C, existuje další varianta zadání. Naprogramováním stoupání r v mm na otáčku a cílové pozice v Z. Z těchto údajů vypočítá řídicí systém potřebné natáčení nástrojové elektrody v ose C.(13)

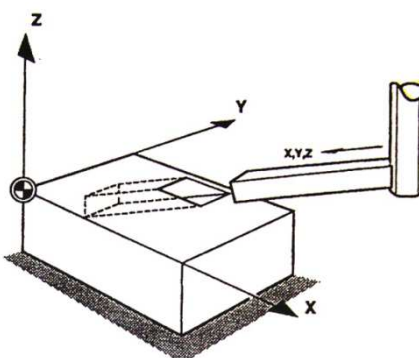


Obr. 3.10 Závitová elektroda (6)

Na závitové elektrodě se vyfrézují dvě rovnoběžné plošky, aby se usnadnilo vyplachování.(6)

3.3.6 Lineární pohyb ve třech osách

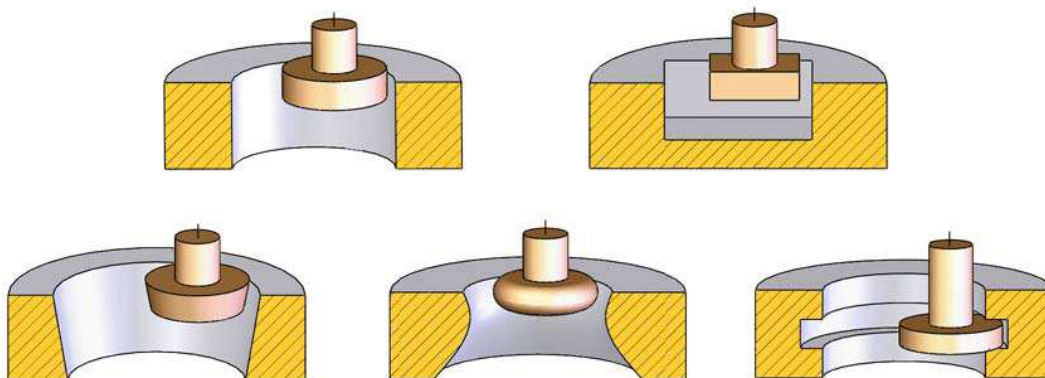
Nástroj se bude pohybovat do cílového bodu po přímce v prostoru. K tomu musí změnit svoji polohu všechny tři osy – X, Y a Z. Jedná se o interpolaci ve třech osách. Při samotných posuvech musí být vždy zapnuta funkce erodování (elektroeroze).(13)



Obr. 3. 11 Lineární interpolace ve třech osách (13)

3.3.7 Planetové cykly

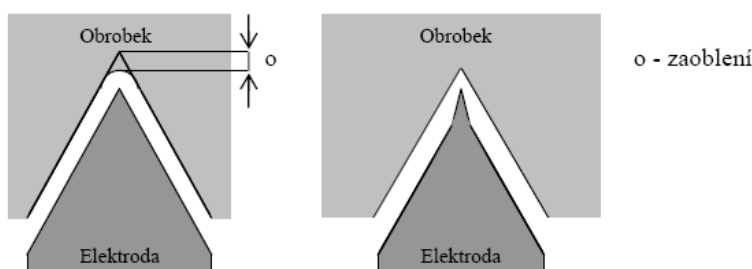
Elektrody se mohou také vychylovat pomocí vychylovače, které vychylují elektrody ve všech směrech. Pohyby elektrody jsou buď translační, nebo orbitální a umožňují vytvořit jednodušší tvary elektrod i složitější tvary. Vhodný pracovní režim může korigovat výchyly o velikosti 0 ± 2 mm ve všech směrech a jde tak snižovat spotřebu elektrody.(11)



Obr. 3.12 Příklady pohybů nástrojových elektrod (6)

Použitím vychylovačů elektrod lze vylepšit ekonomičnost pracovního procesu, protože se zkrátí strojní časy o 40 % až 60 % a u planetového pohybu elektrody se snižuje opotřebení elektrod.

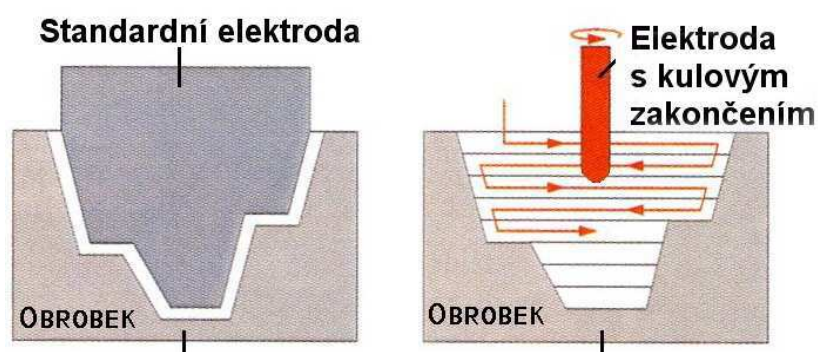
Pokud je prováděna výroba profilových otvorů s ostrými hranami, nezískáme požadovaný profil, aniž by se musela provést korekce tvaru nástrojové elektrody.(6)



Obr. 3.13 Schéma korekce tvaru nástrojové elektrody (1)

Na obrázku 3.13 je ukázáno, že při hloubení profilových otvorů s ostrými hranami není možno získat požadovaný profil. Proto je na nástrojových elektrodách provedena korekce tvaru. Zaoblení v rozích se rovná velikosti výchyly translace a šířky pracovní mezery.

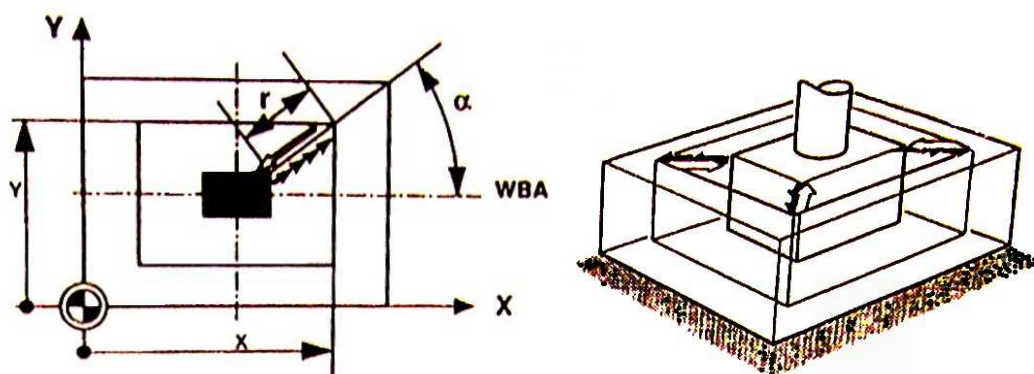
Na obrázku 3.14 je znázorněno zvětšení výchyly podle přepočtu a nastavením krokování elektrody do potřebného směru. Dokončování rohů je pak snadněji realizovatelné.(14)



Obr. 3.14 Schéma zjednodušení elektrody (14)

Jako další způsob zajišťování přesných rozměrů slouží rozšíření. Nástrojová elektroda se pohybuje více směrovým pohybem a dosahuje toho, že elektroda eroduje vždy pouze jednu plochu. Protější strana erodující elektrody se pravidelně oddaluje od stěny a dna dutiny. Postupně se vytváří širší mezera mezi elektrodou a obrobkem umožňuje se tak lepší a rychlejší jiskření výplachem.(4)

Nástrojová elektroda nejprve eroduje do naprogramované hloubky, rohový bod se zadává v polárních souřadnicích. Řídicí systém posune elektrodu úhlopříčně do rohu a po rozšíření ji rychloposuvem vrátí zpět do středu. Toto planetové erodování se musí programovat pro každý roh zvlášť. Před spuštěním musí být elektroda nastavena nad střed planetového pohybu. Pro každý cyklus musí být zvolena vhodná tvarová nástrojová elektroda.(13)



Obr. 3.15 Schémata rozjíždění v rozích (13)

3.4 Dosahovaná drsnost po erozivním obrábění

Během procesu obrábění vznikají odchylky od námi požadovaného geometrického tvaru o určitou velikost odchylky δ . Celková tvarová odchylka se vypočítá dle vztahu (1.8).(1)

$$\delta = \delta_{ST} + \delta_T + \delta_{NÁST} + \delta_{ER} \quad (3.4)$$

δ_{ST} – je to chyba obráběcího stroje způsobená deformacemi a nepřesnostmi pohybových mechanismů, popřípadě upínacího mechanismu nástrojových elektrod.(1)

δ_T – chyba, která vznikla oteplením během obrábění. Pro větší obrobky je nutné počítat s tepelnou dilatací rozměrů v případě, že stroj není vybaven tepelnou stabilizací. Dilataci ovlivňuje ohřev dielektrika i elektrody.(1)

δ_{NAST} – chyby ve výrobních nepřesnostech nástrojové elektrody. U frézovaných elektrod se musí počítat s $\delta_{NAST} = \pm 0,01$ mm. U broušení, nebo na elektroerozivních drátových strojích $\delta_{NAST} = \pm 0,002$ až $0,005$ mm.(1)

δ_{ER} – chyby dané vlastním elektroerozivním obráběním. Jdou kompenzovat tvarem nástrojové elektrody nebo vhodným způsobem obrábění. Chyby nepřesahují rámec hodnot v μm .(1)

Elektroerozivní obrábění vymezuje oblast použití díky vzniku povrchové struktury a dosažené drsnosti povrchu po obrobení. Ze vztahu 3.5 je vidět, že drsnost povrchu je úzce spjatá s energií jednotlivých pulzů.(1)

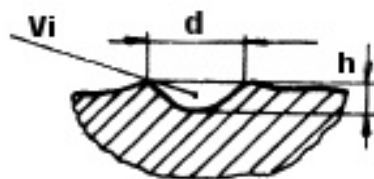
Pro největší výšku nerovnosti profilu platí vztah:(1)

$$R_z = K \cdot W_i^f \quad (3.5)$$

Obecně lze říct, že nejlepší kvalita povrchu je dosahována při nižších hodnotách proudu, krátkých impulzech a vysokých frekvencích pulzů. Kvalitní povrch je svázán se zvýšeným opotřebením nástrojové elektrody, rostoucí energií výbojů a stavem povrchové vrstvy.

Tab. 3.1 Dosahované přesnosti rozměrů při elektroerozivním obrábění (1)

způsob obrábění	dosažitelná přesnost (mm)	dosažitelná drsnost povrchu R_a (μm)
opracování na hrubo, impulzní zdroje, velická energie výboje (hloubení)	($\pm 0,02$) až ($\pm 0,5$)	$R_a > 6 \mu\text{m}$ $R_z \approx 25 \mu\text{m}$
normální opracování, impulzní zdroje	($\pm 0,01$) až ($\pm 0,02$)	$R_a > 2 - 6 \mu\text{m}$ $R_z \approx 8 - 25 \mu\text{m}$
jemné a velmi přesné obrábění, vysokofrekvenční zdroje, řezání drátkovou elektrodou	($\pm 0,005$) až ($\pm 0,01$)	$R_a > 0,8 - 2 \mu\text{m}$ $R_z < 6 \mu\text{m}$
elektroerozivní leštění (přesné řezání drátkovou metodou)	až $\pm 0,002$	$R_a = (0,1); 0,2 - 0,8 \mu\text{m}$ $R_z < 2,5 - 4 \mu\text{m}$



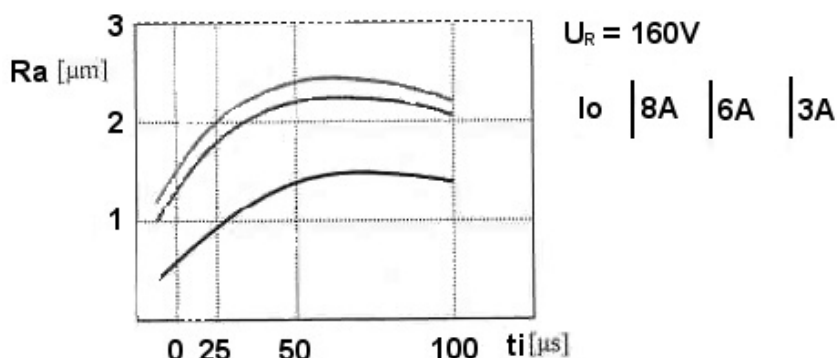
Obr. 3.16 Vzniklý kráter po EDM výboji (1,3)

Platí obecný předpoklad, že se zvyšující se vybíjecí energií roste spotřeba odebíraného materiálu. Tím vznikají větší krátery a erodovací proces je rychlejší. Zrychlující proces negativně snižuje přesnost a jakost povrchové plochy.

Tab. 3.2 Vliv teploty tavení na velikost kráteru (1)

materiál	$T_{TAV} (^{\circ}C)$	Φd (mm)	h (mm)	v_i (mm ³)
W	3527	0,8	0,09	0,021
Cr	1907	0,7	0,11	0,025
Ti	1668	1,0	0,16	0,047
Fe	1539	1,3	0,20	0,133
Co	1495	1,3	0,21	0,133
Ni	1455	1,5	0,22	0,199

Elektroerozivní stroj a jeho faktory mají silný vliv na vznikající tvar a vyhloubený kráter. Ovlivňující faktory ze strany stroje jsou doba trvání výboje a jeho vlastní energie. Drsnost povrchu v závislosti na trvání výboje je znázorněn na obr. 3.17.



Obr. 3.17 Vliv doby impulzu na drsnost (16)

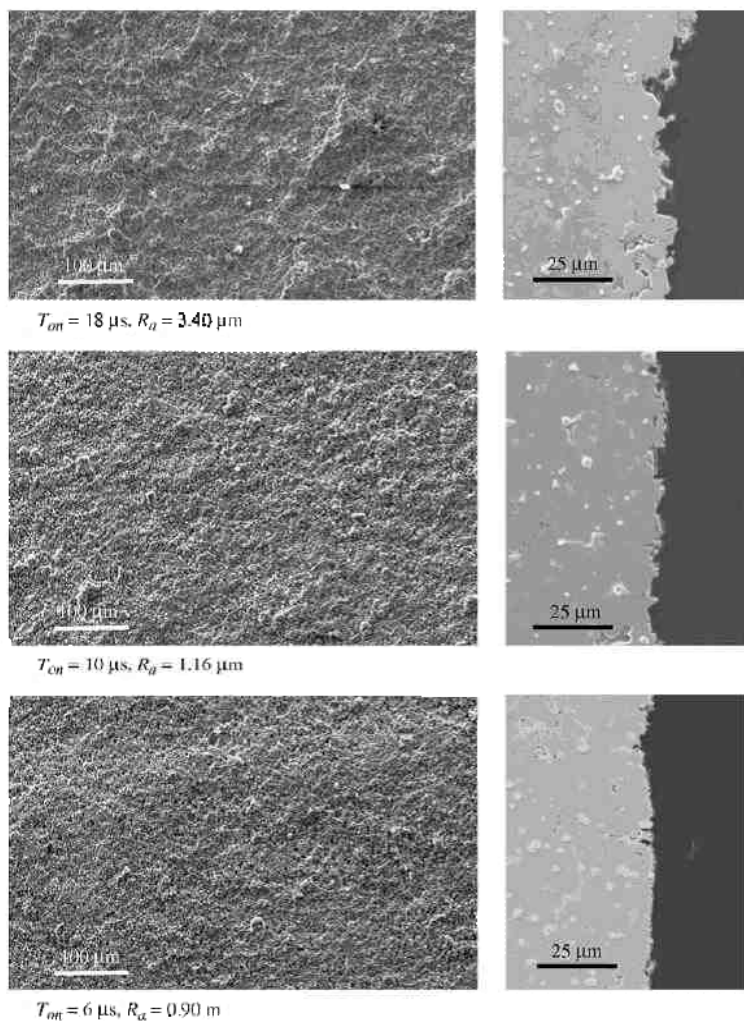
Vzniklý povrch po EDM technologii se značně liší od klasického povrchu po obrobení konvenčními technologiemi. Při použití konvenční technologie zůstávají na povrchu stopy po břitovém nástroji, naopak při použití EDM technologie zůstávají mikroskopické krátery vzniklé po výbojích.

Drsnost povrchu po elektroerozivním obrábění má vlastní stupnici kvality povrchu – VDI a neudává se dle střední aritmetické úchyly profilu R_a (μm) dle ČSN ISO 4287-1.(18)

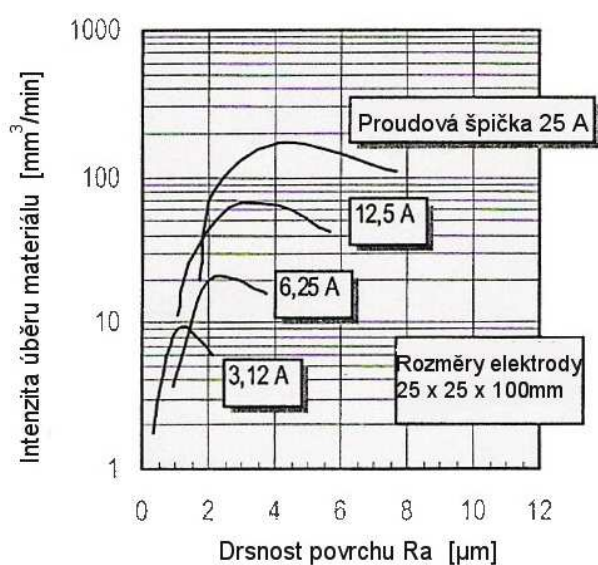
Tab. 3.3 Stupnice VDI – R_a

$R_a(\mu m)$	0,4	0,6	0,8	1,1	1,6	2,3	3,1	4,5	6,3	9,0	12,5	18
VDI (-)	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45

Na obrázku 3.18 je znázorněna povrchová struktura EDM procesu. Z fotodokumentace je zřejmá klesající závislost kvality a drsnosti povrchu s klesající dobou působení impulzu T_{on} .(17)



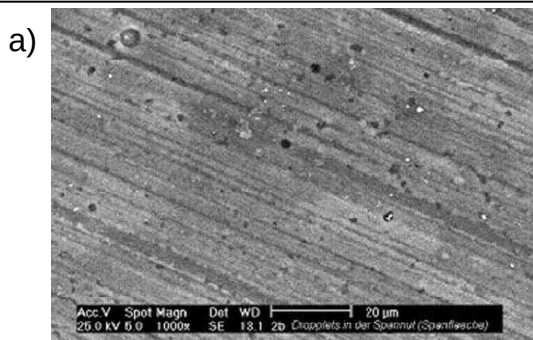
Obr. 3.18 Závislost drsnosti na době trvání výboje (17)



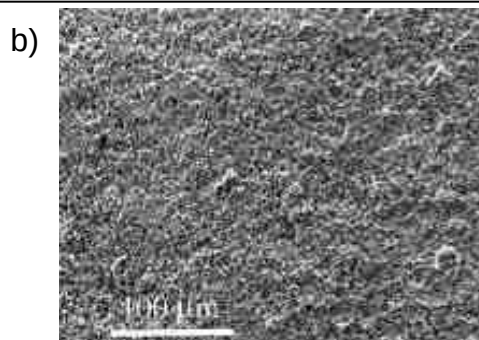
Obr. 3.21 Závislost drsnosti povrchu na velikosti proudové špičky a úběru materiálu (2)



Obr. 3.22 Destička povrchové jakosti pro vizuální porovnání od firmy Zimmer+Kreim (11)



Obr. 3.19 Frézovaný povrch (19)

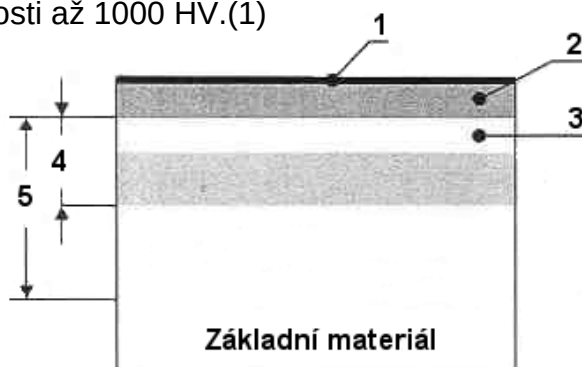


Obr. 3.20 Povrch po EDM (16)

3.4.1 Stav povrchové vrstvy

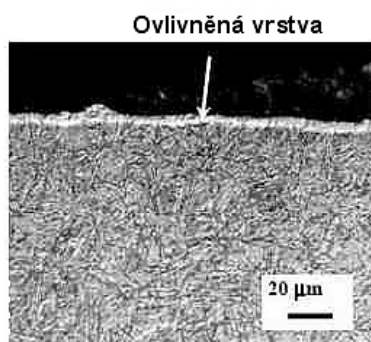
Stav povrchové vrstvy také výrazně ovlivňuje energie výboje. Její vlastní oteplení a vznik tlakových napětí během erodovacího procesu přispívá ke změnám jak na povrchu, tak i pod povrchem obrobenej plochy.

Při nesprávném nastavení stroje a zvolení nesprávného postupu při erodování může pod povrchem vzniknout tenká překalená vrstva (3) o tloušťce až 20 μm a tvrdosti až 1000 HV.(1)



Obr. 3.23 Změny povrchu po erodovacím procesu (1)

- 1- mikrovrstva nasycená částicemi dielektrika, chemická sloučenina vytvořená difuzí,
- 2 – vrstva obsahující materiál nástrojové elektrody (difuzí nástroje),
- 3 – bílá vrstva, která je silně nasycená uhlíkem. Znovu ztuhlá tavenina, má jemnou strukturu charakteru martenzitu, její tvrdost se pohybuje kolem 60 HRC a tloušťka od (0,04 do 0,2) mm,
- 4 – pásmo termického ovlivnění, strukturou se jedná o zakalený a popuštěný výchozí materiál,
- 5 – pásmo plastické deformace vyvolané tlakovými rázy impulzu.



Obr. 3.24 Vrstva ovlivněná po EDM hrubování (16)

3.5 Materiál nástrojových elektrod

Materiál nástrojové elektrody je ovlivňován parametry jako je například výsledná požadovaná jakost povrchu a efektivnost pracovního procesu. Dále je vhodné také volit nejvhodnější materiál nástrojové elektrody pro daný druh obrábění. Cílem je zvolit pracovní podmínky tak, aby byla co nejlepší pracovní produktivita a jakost obrobené plochy.

Nástrojová elektroda se navrhuje a konstruuje pro každou obráběnou součást samostatně. Náklady na zhotovení takové elektrody jsou až 50% z celkových výrobních nákladů. U současných moderních hloubících strojů dosahují náklady méně než 1 %. Existuje přímá úměra, že s rostoucí velikostí nástrojové elektrody roste i cena výrobních nákladů.

Materiál elektrody má mít vysokou elektrickou vodivost, dobrou obrobiteľnosť, vysoký bod tavení a dostatečnou pevnost, aby se při práci nedeformoval.(11)

Pro jednodušší volbu materiálu nástrojové elektrody byla zavedena poměrná veličina s názvem relativní objemové opotřebení ϑ .(1)

$$\vartheta = \frac{V_N}{V_O} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

Výpočet míry úběru na obrobku:(21)

$$V_O = \frac{\Delta m_O}{\rho_O \cdot t} \quad (3.7)$$

Výpočet míry opotřebení na nástrojové elektrodě:(21)

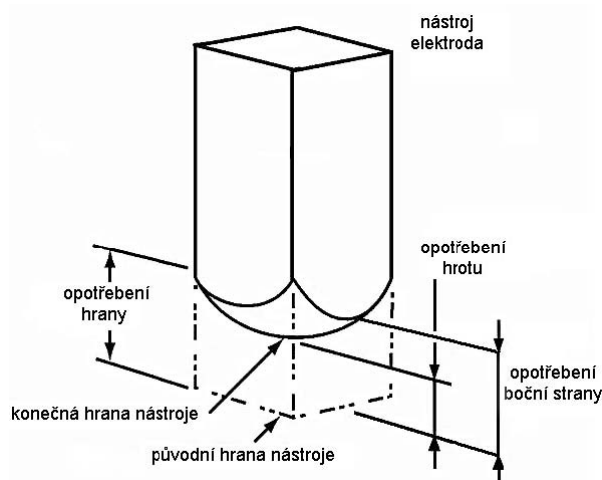
$$V_N = \frac{\Delta m_N}{\rho_N \cdot t} \quad (3.8)$$

Hodnoty objemového, relativního opotřebení elektrody je určeno:

- důsledkem velké hustoty elektronů dochází k oddělování iontů nebo celých částic kovů,
- důsledkem kolísání proudu a vlivem polarit výboje se narušuje povrch nástrojové elektrody,
- důsledkem termických vlivů, jako vysoká teplota výboje,
- důsledkem nárazů mechanických částíček, které se oddělily od povrchu obrobku,
- důsledkem nesprávného zvolení pracovních podmínek, jako špatné odplavování částíček materiálu dielektrikem,
- důsledkem vlastní nehomogenity materiálu nástrojové elektrody.(2)

Velikost opotřebení se pohybuje od desetin procenta až do desítek procent. Při hrubování ocelového obrobku měděnou elektrodou, se pohybuje $\zeta = 0,5 \% \div 3 \%$, při obrábění na čisto se pohybují hodnoty od 2 % do 10 %.(11)

Na obr. 3.25 jsou ukázány nejčastější oblasti opotřebení u nástrojové elektrody se čtvercovým průřezem.



Obr. 3.25 Charakteristické oblasti opotřebení nástrojové elektrody (2)

Obrobitelnost kovů při elektroerozivním obrábění není závislá na mechanických vlastnostech materiálu, ale záleží jen na fyzikálních vlastnostech. Čím má materiál vyšší bod tavení, tepelnou vodivost, Yongův modul pružnosti, Poissonovo číslo a čím nižší koeficient lineární tepelné vodivosti, tím je odolnost vůči opotřebení vyšší.(2)

Nelze obrábět materiál, který není elektricky vodivý, tudíž nemá schopnost vést elektrický proud. Díky této vlastnosti tedy lze opracovávat veškeré kovové materiály.

Z logického hlediska lze usuzovat, že nástrojové elektrody s vyšší teplotou tavení, budou mít nižší rychlost opotřebení elektrody. Zjistilo se, že rychlost opotřebení elektrody je nepřímo úměrná k bodu tání materiálu elektrody.

Jako nejrozšířenější materiály elektrod se používají:

- měď (pro střížné nástroje),
- slitina 50 – 80 % W, 20 – 50 % Cu, tzv. wolframová měď (formy na sklo),
- mosaz (pro střížné nástroje),
- Al slitiny (formy na gumu a sklo),
- ocel (střížná nástroje),
- wolfram (pouze pro oblast mikroděrování),
- grafit (pro zápustky). (11)

Tab. 3.3 Fyzikální vlastnosti vybraných materiálů pro nástrojové elektrody (2)

Materiál	Bod tavení [°C]	Bod varu [°C]	Tep. vodivost (Ag=100%)	El. vodivost (Ag=100%)	Pevnost [N.mm ⁻²]	Modul pružnosti [N.mm ⁻¹ x 10 ²]
Grafit	3527	4027	30,3	0,1	34	5,9
Měď	1084,62	2562	94,3	96,5	241	124
Wolfram	3422	5555	29,6	48,1	41,3	351
Železo	1539	2861	16,2	16,2	275	186

Tab. 3.4 Parametry materiálů používané při erodování (15)

materiál	Hustota [g·cm ⁻³]	Tvrdost [HV]	Tepel. vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Elektrický odpor [nΩ·m]	Tepl. tavení [°C]	Cena [Kč·dm ⁻³]
Grafit	1,6 ÷ 2,1	80 ÷ 150	55 ÷ 100	2·10 ³ ÷ 2·10 ⁴	3527	1000 ÷ 5000
Měď	8,96	370	386	16,8	1084,62	3000
Wolfram	19,25	3430	173	52,8	3422	

Pozn.: Rozmezí hodnot u grafitu je dáno různou pórovitostí a velikostí zrna.

Mosaz

Patří mezi velmi dobře obrobitelný materiál a vhodný pro elektrody. Jeho větší nevýhodou je, že má rychlejší opotřebení ve srovnání s měďenými, anebo grafitovými.

Mosazné nástrojové elektrody se používají pro hloubení úzkých otvorů při vrtání, kde opotřebení vlastní nástrojové elektrody nevyžaduje rozměrovou přesnost.(2)

Wolfram

Používají se na speciálních strojích s generátory pulzů o malé energii a krátké době trvání. Používá se pro obrábění slinutého karbidu a pro výrobu malých děr o velikosti menší jak 0,2 mm až do hloubky 100 mm.(2)

Grafit

Nástrojové elektrody vyrobené z grafitu patří mezi nejpoužívanější na trhu. Díky jeho snadnému opracování se dává přednost před mědí. Mají dobré charakteristiky opotřebení a jsou málo citlivé na teplotní výkyvy díky vysokému bodu tavení okolo 3000 °C. Často se používá pro opracování ocelí.

Opotřebení nástrojové elektrody se při hrubovacích pracích pohybuje kolem $\vartheta = 1 \%$ a při dokončovacích kolem $\vartheta = 5 \%$ až 10% .(4)

Grafit pro nástrojové elektrody se vyrábí v několika modifikacích. Z pravidla platí, že čím menší zrno grafitu, tím jemnější detaily je možné na elektrodě vyhotovit. Čím je naopak zrno větší a tvrdší, tím je jeho obrábění složitější a dochází ke snadnějšímu vylomení zrna.

Jediným oficiálním prodejcem POCO grafitových materiálů v České a Slovenské republice je firma TEDOK spol. s.r.o. Tato firma se zabývá speciálně výrobou EDM grafitových materiálů pro nástrojové elektrody. Má vlastní technologie a stroje pro výrobu a propagaci těchto elektrod, které přispívají k zlepšení účinnosti práce, produktivity a zvýšení zisku.

Nevýhodou u výroby grafitových elektrod je značná prašnost, proto je třeba, aby obráběcí stroje měly dobré odsávací systémy. Další nevýhodou jsou zplodiny při erodování, které zanáší a znečišťují zařízení. Pokud zůstane grafitová elektroda delší dobu v zápalu, hrozí její vypaření.(22)

Nástrojové elektrody se vyrábí na vlastních obráběcích centrech nebo na frézovacích centrech. Stroje musí mít vysokou mechanickou tuhost a stabilitu.

Tab. 3.5 Porovnání grafitu od firmy TEDOK (22)

EDM-AF5

Vysoká odolnost proti opotřebení. Díky velikosti částic menších než 0,001mm zaručuje vynikající pevnost a umožňuje dosáhnout jemný povrch.

Typické vlastnosti:

Velikost částic [μm]	< 1
Pevnost v ohybu [$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$]	1019
Pevnost v tlaku [$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$]	1554
Tvrdost [Shore]	83
Elektrický odpor [$\mu\Omega\cdot\text{m}$]	21,6

Použití:

- elektrody s jemnými detaily
- obtížně obrobitelné detaily
- jemné a křehké elektrody
- elektrody na závity
- jemné povrchové opracování

Tab. 3.6 Porovnání grafitu od firmy TEDOK (22)

EDM-4

Výborné parametry úběru kovu, opotřebení elektrody jakost povrchu. Snadno se obrábí na elektroerozivním drátovém řezacím stroji.

Typické vlastnosti:

Velikost částic [μm]	< 4
Pevnost v ohybu [$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$]	1230
Pevnost v tlaku [$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$]	1511
Tvrdost [Shore]	76
Elektrický odpor [$\mu\Omega\cdot\text{m}$]	12,7

Použití:

- elektrody s jemnými detaily a požadavky na mimořádně jemný povrch obrobku
- elektrody řezané drátem
- formy na vstřikování plastů

Tab. 3.7 Porovnání grafitu od firmy TEDOK (22)

EDM-200

Odolný proti opotřebení. Velmi dobře se frézuje. Uplatňuje se při obrábění složitých tvarů, např. sítí žeber.

Typické vlastnosti:

Velikost částic [μm]	< 10
Pevnost v ohybu [$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$]	569
Pevnost v tlaku [$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$]	984
Tvrdost [Shore]	68
Elektrický odpor [$\mu\Omega\cdot\text{m}$]	14,7

Použití:

- hrubovací a dokončovací elektrody
- sítě žeber, složitější tvary
- formy na plasty a lití kovů

Měď

Tento materiál má dobrou elektrickou vodivost a dobrou odolnost proti erozivnímu opotřebení. Materiál je dobře obrobitelný a má velký úběrový výkon při středním opotřebení nástrojové elektrody, což vede k jeho hospodárnému používání. Nástrojové elektrody z mědi byly používány mezi prvními, protože jsou schopny obrábět veškeré karbidy.

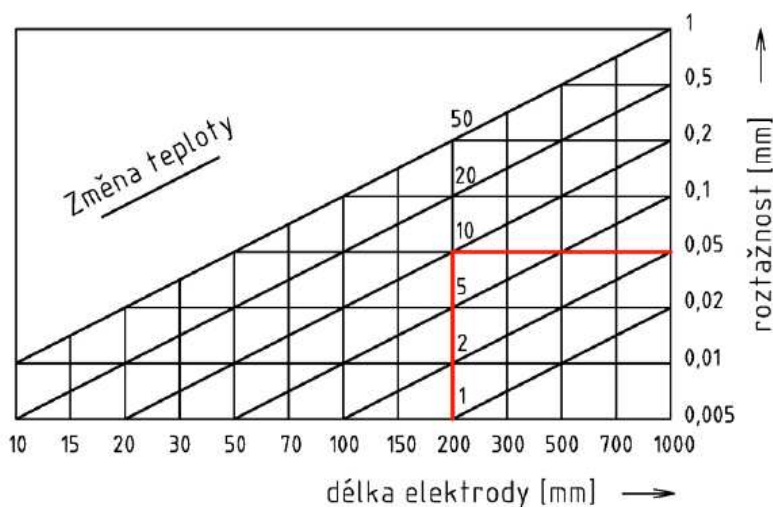
Používají se pro veškerou výrobu tvarových dutin z ocelí, nerezavějících ocelí, wolframových karbidů a pro dokončovací operace s R_a pod 0,5 μm . (2)

Příklad:

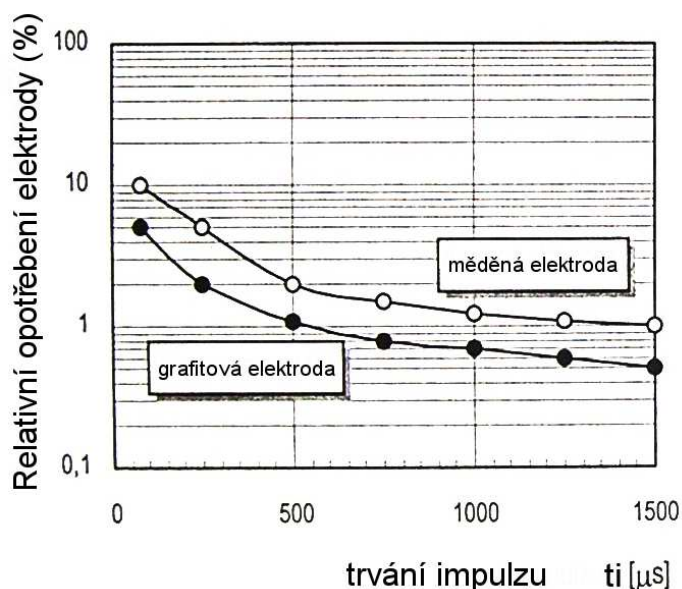
měděná elektroda
 délka elektrody: 200 mm
 změna teploty: 10°C



roztážnost: 0,05 mm



Obr. 3.26 Teplotní roztážnost mědi (2)



Obr. 3.27 Relativní úběr nástrojové elektrody (2)

Sloučeniny mědi s wolframem a stříbra s wolframem.

Tyto materiálové kompozice se používají pro speciální účely hloubení úzkých drážek a otvorů, pro jemné práce s obzvláště nepříjemnými podmínkami proudění dielektrické kapaliny. Jejich cena ve srovnání s měděnou elektrodou se pohybuje 18x až 100x vyšší.(2)

U těchto velmi nákladných elektrod se nejedná o pravé slitiny, podíl wolframu se pohybuje v rozmezí 50 % až 80 %. Tento vysoký podíl wolframu znamená 3krát až 5krát menší opotřebení elektrody oproti měděné elektrodě. Tyto slitiny nemohou být tvarovány po slinování pro svojí velkou křehkost. Používají se pro obrábění hlubokých drážek z ocelí, slinutých karbidů a karbidů wolframu.(4)

Nástrojová elektroda se vyrábí podle svojí tvarové složitosti některým z obvyklých způsobů jako přesné lití a lití pod tlakem. Jako dokončovací operace na požadovaný rozměr se volí soustružení, frézování, broušení.(2)

Tab. 3.8 Volba materiálu elektrody vzhledem na materiál obrobku (3)

Materiál elektrody	Materiál obrobku	Operace obrábění	Jakost opracované plochy	Poznámka
karbid wolframu	ocel	H	střední	malý úběr
		D	dobrá	
mosaz	ocel	H	dobrá	vhodné pro výrobu malých otvorů
		D	dobrá	
mosaz	titan	H	dobrá	přiměřený úběr
		D	dobrá	
měď	hliník	H	dobrá	malý úběr
		D	dobrá	
měď	litina	H	dobrá	přiměřený úběr
		D	dobrá	
měď	korozi vzdorná ocel	H	střední	stabilita oblouku u některých jakostí oceli nejistá
		D	střední	
měď	karbid wolframu	H	dobrá	přiměřený úběr
		D	dobrá	
měď-wolfram	ocel	H	dobrá	vhodné pro malé vysoce přesné lisovací nástroje
		D	dobrá	
slitina mědi	karbid wolframu	H	dobrá	vhodné pro výrobky z karbidu wolframu
		D	dobrá	
grafit	litina	H	dobrá	vyšší úběr při záporné polaritě, větší opotřebení el.
		D	dobrá	
grafit	měď	H	střední	malý úběr
		D	střední	
grafit	rychlořezná ocel	H	střední	střední úběr
		D	střední	
grafit	korozi vzdorná ocel	H	střední	dobrý úběr
		D	střední	
grafit	ocel	H	dobrá	dobrý úběr
		D	dobrá	
grafit	wolfram	H	střední	střední úběr
		D	střední	

Pozn.: H – hrubování, D – obrábění načisto

3.6 Výroba nástrojových elektrod a jejich použití

V řadě případů nelze vyrobit tvarovou dutinu na jednu nástrojovou elektrodu, proto se výroba skládá z jednotlivých částí s možností klasického třískového obrábění formy, nebo i předhrubování celého tvaru. Na výrobě nástrojové elektrody lze z velké části uplatnit klasické třískové obrábění u většiny případů. (1)

Základní metody výroby nástrojových elektrod:

- třískové obrábění,
- lisování,
- lití rozžhaveného kovu do formy elektrody,
- prášková metalurgie.

Kování a lisování nástrojových elektrod se používá pouze pro výrobu velkého množství dutin stejného druhu, nebo pro opravu těchto dutin. Lití nelze uplatnit pro členité tvary. (1)

Jako velmi výhodnou výrobou nástrojových elektrod se jeví stříkání roztaveného kovu. Vstřikovací způsoby výroby nástrojové elektrody jdou realizovat různými způsoby. Při možnosti reálné dutiny lze používat přímé vstřikování roztaveného materiálu do dutiny. Při vyhotovování dutiny se nejdříve musí zhotovit model, potom forma a do této opět vstříknout materiál pro vznik nástrojové elektrody. (1)

Další způsob výroby nástrojové elektrody je pomocí galvanoplastiky, která je vhodná pro přesné práce. Nejprve se zhotoví model ze dřeva nebo plastické hmoty, pomocí tohoto modelu se vytvoří sádrový odlitek, který se vysuší a na něj se nanese kovový povlak. Na tento povlak se při elektrolytickém procesu vyloučí vrstva kovu, která tvoří vlastní nástrojovou elektrodu.

Nevýhodou u tohoto procesu výroby je dlouhá doba vylučování kovu a nutnost zpevňování vzniklého modelu proti deformaci. (1)

U prostého kopírování nástrojové elektrody do dutiny formy při pohybu osy Z je nutné vyrobít elektrodu v odstupňujících rozměrech podle účelu použití (hrubování, dokončování).

U nástrojových elektrod vyrobených z mědi lze konečný tvar vyrobít odleptáním pomocí kyseliny dusičné.

Nekovové nástrojové elektrody z grafitu se vyrábí také pomocí třískového způsobu obrábění. Musí se však velmi pečlivě sledovat upnutí grafitu, protože je velice křehký. Vícerozměrné nástrojové elektrody z grafitu se vyrábí pomocí speciálního způsobu vybrušování tvaru, kde tvar formy je vybrušován excentrickým pohybem pomocí negativního brusného nástroje z umělé hmoty s brusivem v povrchové vrstvě. V současnosti se vyrábí elektrody pomocí vyřezávání na erozivních drátových pilách. (1)

Při srovnání měděné elektrody s grafitovou se jeví grafitová elektroda jako rychleji vyrobitelná, protože se používají při obrábění větší posuvy a řeznou rychlost. Grafitové elektrody jsou také vhodnější pro hrubování, úzká žebra a hluboké tvary.

Nástrojové elektrody je nutno vyrábět hospodárně a efektivně, protože jejich náklady tvoří až 60 % celkové ceny výrobku. Proto se vyrábí na přesných CNC strojích, kde je vhodné umístění na upínací plochu stroje. Tím se připraví dostatečné množství stejných upínání, jaké jsou ve vřetenu stroje. Polotovary nástrojových elektrod se připevní do držáků a upínají do tzv. „hnízd“. Osy hnízd jsou zapsány v programu a dány obsluhou do CNC frézky. Ta spolupracuje se zásobníkem nástrojů, kde jsou dány všechny potřebné nástroje ze slinutých karbidů, protože se pracuje při vysokých rychlostech.

Vyrobena nástrojová elektroda projde kontrolou na 3D souřadnicovém měřicím stroji, který vyhodnotí digitální model nástrojové elektrody vůči vyrobené elektrodě. (15)



Obr 3.28 3D měřicí stroj od firmy Wenzel (25)



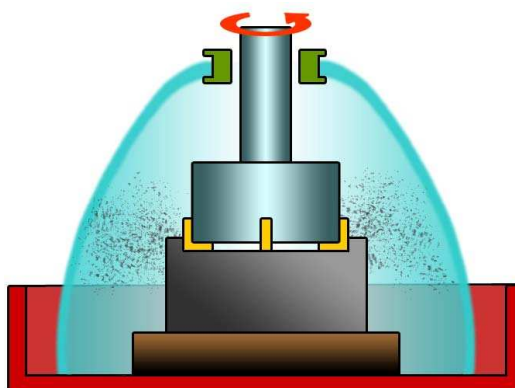
Obr. 3.29 Upínací paleta na frézce (15)

3.6.1 Výroba grafitových elektrod

Jedním z postupů jak vyrobit samotný grafit je tvářením na izostatických lisech. Tyto lisy umožňují vznik homogenních, izotropních grafitových těles ve velkých formátech. Výhoda takového výrobního postupu spočívá v tom, že se materiál může odebrat z jádra i z okrajových prostorů. Nejdůležitější volba je správná zrnitost a pórovitost. (24)

Výroba nástrojových elektrod zpravidla probíhá na konvenční CNC frézce, ale existují i speciální centra pro obrábění grafitu. Používají se řezné nástroje s dvou až čtyřbřitou stopkovou frézou opatřenou polykrystalickým diamantovým povlakem, nebo ze slinutého karbidu.

Při obrábění bez chlazení může nastat problém s odvodem prachových částic z místa řezu, které zhoršují jakost obrobení plochy. Na stroj se musí přidat odsávací zařízení nebo speciální zařízení pro frézování uvnitř vodního zvonu. Toto zařízení vytváří pomocí kruhové trysky vodní závěs kolem pracovní oblasti a díky své mobilitě ho pak lze zapojit k více druhům obráběcích strojů. Do pracovního prostoru je možno zasahovat a sběr odebraných grafitických nečistot probíhá v separátní jímací nádobě. (15,26,27)



Obr. 3.30 Obrábění grafitu pod vodním zvonem (15)

Nástrojové elektrody z grafitu je možno lepit, což je jejich velká výhoda. Například malé průměry grafitových elektrod se lepí účelně pomocí tzv. bleskových lepidel na bázi kyanoakrylátu, kde tenký film lepidla nevede k porušení toku elektrického proudu. Po slepení je nutné alespoň jednodenní vytvrzení.

Pro větší průměry elektrod se doporučuje používat dvoukontaktní pryskyřice, u kterých je možná delší doba použitelnosti v procesu obrábění než u kyanoakrylátových lepidel. Musí být dodrženy izolační účinky, a proto je třeba elektricky přemostit horizontálně probíhající spáru lepení jako třeba použitím montážních kolíků z grafitu. (28)

Vyšší rychlosti nástrojové elektrody při hloubení včetně rychlého přenosu dat na elektroerozivní stroj měl za následek zkrácení doby výroby elektrod. Je mnoho druhů fréz pro obrábění mědi, grafitu, hliníku, měkké a kalené oceli. Nástroje mají malé obvodové házení, které nepřesahuje 0,005 mm a jsou vhodné pro dokončovací obrábění s vysokou přesností a jakostí povrchu. Pro obrábění grafitu se používá převážně fréza s plným rádiusem, která je k dispozici s jemně odstupňovaným průměrem od 2 mm do 12 mm buď ve standardní délce, nebo v dlouhém provedení. (27)



Obr. 3.31 Frézy pro obrábění grafitu (27)

3.6.2 Porovnání řezných podmínek u obrábění mědi a grafitu

K porovnání řezných podmínek byly zvoleny monolitní stopkové frézy průměru 6 mm se dvěma zuby pro obrábění na čisto od německé firmy Karnash. První z fréz je pro obrábění mědi, hliníku, mosazi a umělé hmoty, druhá z uvedených je opatřená diamantovým povlakem a je určena pro obrábění grafitu. (23,29)



d_1 e8	d_2 h5	d_3	rp -0,007	l_1	l_2	l_3
6	6	5,9	0,3	75	6	30

Pozn.: Veškeré hodnoty jsou v milimetrech.

	n [min ⁻¹]	v_f [mm·min ⁻¹]	f_z [mm]	a_p [mm]
fréza na měď	7 000	1 800	0,130	0,400
fréza na grafit	30 000	4 200	0,010	1,200

Pozn.: Cena frézy na obrábění mědi činí 35 € a grafitu 78 €.

Obr. 3.32 Porovnávací parametry fréz od firmy Kamasch (23,29)

3.6.3 Vysokorychlostní obrábění

Vysokorychlostní obrábění (HSC) se uplatní v oblastech frézování dutin, výrobě zápusťek, forem pro odlévání i jejich lití, frézování grafitových a měděných elektrod atd.

Požadavky kladené na stroj:

- lehká konstrukce pohyblivých částí,
- vysoké otáčky vřetene,
- vysoké posuvové rychlosti - lineární pohony,
- vysoká geometrická přesnost,
- vysoká dynamická tuhost,
- minimální vůle a vibrace.

Požadavky kladené na nástroj:

- vysoká přesnost – obvodové házení,
- vysoká trvanlivost bříty,
- vysoká tuhost,
- vyváženost hmot – geometrie a tvar stopky,
- spolehlivé upnutí – hydraulické, tepelné.

Zavedením vysokorychlostního obrábění se nám sníží výrobní náklady a zvýší produktivita práce, a to u dokončovacích operací i při obrábění tvrdých ocelí. Mezi další výhody patří nízká teplota řezného nástroje a krátká doba nástroje v záběru, což vede k zvýšení životnosti obráběcího nástroje.

Mezi nevýhody vysokorychlostního obrábění patří vyšší potřeba kontroly stroje, nižší trvanlivost nástrojů a vyšší požadavky na optimalizaci řezného procesu.

Vzhledem k mělkým řezům při vysokorychlostním obrábění klesají radiální síly působící na nástroj a vřeteno se tím šetří. Obrábění se kombinuje s axiálním frézováním z důvodu malého zatěžování ložisek a možnosti používání delších nástrojů s nižším rizikem vibrací.

Produktivita dokončovacího obrábění je vysoká a lze dosáhnout velmi dobré jakosti obrobené plochy až $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ na stěnách silných 0,2 mm o výšce 20 mm. (30)

Mezi vřeteny lze volit s otáčkami do 10 000, 15 000 a 30 000 /min. Vřeteno s nejvyššími otáčkami je konstruováno s cílem zajistit maximální přesnost, vysokou teplotní stabilitu a dlouhodobou životnost.

Systém odsávání grafitu se skládá z výkonného odsávacího systému s filtrací, kde odsávaný prach je shromažďován ve sběrném zásobníku a přefiltrovaný vzduch odchází zpět do dílny. Současně je vyčištěný vzduch použit pro vytvoření přetlaku v oblasti kuličkových šroubů, lineárních valivých vedení a motorů vůči teleskopickému krytování tak, aby se účinně zamezilo průniku abrazivního grafitu vůči těmto komponentům. (31)

Ke zkrácení vedlejších obráběcích časů při frézování 3D tvarů opět přispívají zvýšené pracovní posuvy a rychloposuvy. Naopak ke zkrácení hlavních časů, které tvoří převážnou část celkového strojního času je určena řídicím systémem - High Speed Machining.

Tento řídicí systém zajišťuje trvalý výpočet souřadnic s předstihem až 80 programových vět. S pomocí pohybového algoritmu "zrychlení před interpolací" umožňuje využívat pracovní posuvy až do 21 m/min a to i při dráhových interpolacích tvarově velmi složitých tvarů bez rizika projetí tvarové kontury. Výsledkem je zkrácení cyklových časů při současném zvýšení tvarové přesnosti a kvality povrchu. (31)



Obr. 3.33 Vysokorychlostní vřeteno v řezném procesu (31)



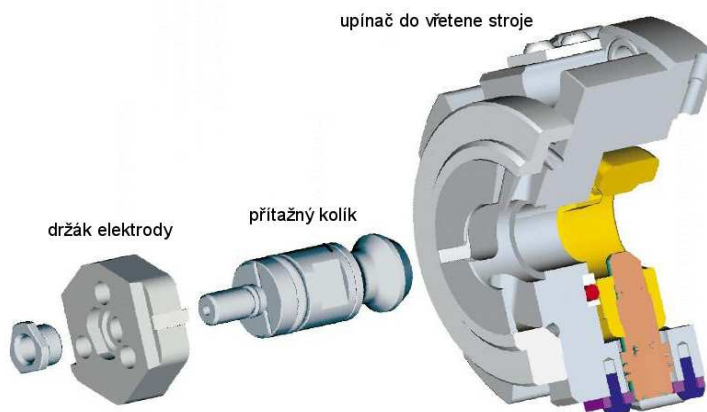
Obr. 3.34 Vertikální 5ti osé obráběcí centrum od firmy Haas Automation (31)

3.7 Upínání nástrojových elektrod

Každá firma má svůj vlastní způsob jak upevnit elektrodu do držáku a ten následně do stroje. Je mnoho způsobů technik upnutí a upínacích systémů. Nejvhodnější a nejekonomičtější jsou systémy, u kterých můžeme nástrojovou elektrodu z držáku vyjmout a opakovaně ji na držák vrátit za podmínky stejné polohy.

3.7.1 Upínací systémy 3R Macro Junior

Patří mezi méně nákladné držáky pro upínání malých elektrod. Je to systém zvyšující flexibilitu a ziskovost. Systém zvyšující konkurenceschopnost a zajišťující úspěch jeho uživatelů. Elektrodový držák je s přitažným kolíkem spojen za hrubý tvar elektrody a následuje obrobení na námi požadovaný tvar. Upínací síla je 5000 N a opakovatelná přesnost upnutí je 0,002 mm. (34)



Obr. 3.35 Upínací systém 3R Macro Junior (34)

3.7.2 Upínací systém 3R Macro

Principem systému je vyrobení přesných otvorů se závity o přesných souřadnicích v horní upínací ploše nástrojové elektrody. Nasunutím elektrody na rozpínací kolíky na držáku a přitáhnutím šroubem či šrouby se docílí možnost opakovatelného upnutí na stejné poloze. (32)



Obr. 3.36 Upínací systém 3R Macro (15)

3.7.3 Upínací systém 3R Micro

Tímto způsobem se upínají menší nástrojové elektrody. Nejdříve se musí zajistit přesně odlitý kovový díl, který je přilepen nebo připevněn šrouby na nástrojovou elektrodu. Přidělaný dílec také umožňuje opakovatelné upnutí do vřetene hloubicího stroje a většinou zůstává na elektrodě po celou její životnost. (32)

3.7.4 Upínací systém Hirschmann



Systém Hirschmann je univerzální upínač na elektrody pro použití na elektroerozivních hloubičkách, HSC frézách, soustruzích, vrtačkách, bruskách, měřicích strojích atd. Nejvhodnější využití je buď pro ruční výměnu nebo pro automatickou výměnu prostřednictvím výměníku nebo robotizovaného pracoviště. Upnutí jednotlivých držáků se strojem je pomocí kaleného středícího prizmatického upínače. Vystředění je automatické. Opakovatelná přesnost upnutí je 0,002 mm, měřeno 100 mm pod upínací plochou držáku. Při otáčení držáku elektrody v prizmatickém vedení o 4 x 90° se může osová poloha změnit max. o 0,004 mm. Musí se vzít v úvahu, že se chyby přesazení mohou sčítat při použití například kleštinového držáku. Zde se sčítá chyba držáku a kleštiny. (35)

Obr. 3.36 Upínací systém Hirschmann (37)

3.7.5 Upínací trny

Trny jsou zašroubovány přímo do těla nástrojové elektrody. Upínací trny umožňují automatickou výměnu elektrod a obrobků prostřednictvím univerzálních flexibilních robotů. Vidličky výměníku umožňují nasazení trnů i od jiných výrobců. Upínací trny lze též nasadit do „Pick – up“ výměníků a do lineárních a kotoučových výměníků. (34)



Obr. 3.38 Upínací trny (34)



Obr. 3.39 Kotoučový výměník (34)

3.7.6 Upínání Minifix

K přesnému upínání malých Cu-elektrod (do průměru 30 mm) a grafitových (do průměru 40 mm). Mohou se použít polotovary elektrod s vyfrézovaným středícím prismem a nebo polotovary elektrod s přišroubovanými cenově výhodnými paletkami. Středící prisma zajišťuje vysokou přesnost opakovatelného upnutí.

MINIFIX Cu-polotovary elektrod jsou dodávány s vyfrézovanou prizmou, které se při prvním upnutí do držáku vytvarují do potřebného tvaru. Vlastní tvar elektrody se frézuje ve frézovacím přípravku.

MINIFIXplus Cu-polotovary elektrod mají vyfrézované přidavné drážky pro nasazení do vidliček zásobníků elektrod (lineární nebo kotoučové zásobníky). Po montáži upínacího trnu lze automaticky upínat v držáku na elektroerozivní hloubičce. (34)



Obr. 3.40 Upínání Minifix (34)

3.8 Uložení nástrojových elektrod

Pokud není elektroerozivní hloubička vybavena výměníkem elektrod, dojde k výraznému zvýšení strojního času. To lze jednoduše provést vybavením stroje výměníkem elektrod se zásobníkem elektrod s nasazenými elektrodami do upínacích vidliček. Rozeznáváme výměníky kruhové (obr. 3.39) a lineární (obr. 3.42) s různým počtem vidliček od 8 ks po 30 ks. Potřebné parametry pro výměnu elektrody mohou být naprogramovány v CNC programu. Každá elektroda má svoje číslo, určuje tak místo ve výměníku a slouží též jako vyznání pro stroj, aby po ukončení procesu vyměnil elektrodu, která je uložena pod konkrétním číslem.

Jednotlivé vidlice mohou být zatíženy max. 20 kg a celkové zatížení talířového výměníku smí být max. 120 kg. (34)



Obr. 3.41 Regalové uložení (35)



Obr. 3.42 Lineární zásobník elektrod (34)

3.9 Dielektrikum

Dielektrikum pracovní kapalně prostředí, ve kterém probíhá celý elektroerozivní proces obrábění.

Plní nejrůznější funkce jako:

- izolace mezi nástrojovými elektrodami,
- odvádí teplo a zabraňuje tak tepelnému ovlivnění obráběného materiálu,
- ohraničuje výbojový kanál,
- odstraňuje vzniklé nečistoty z kráterů,
- zabraňuje usazování uhlíku na povrchu elektrod a tím vzniku zkratům. (1)

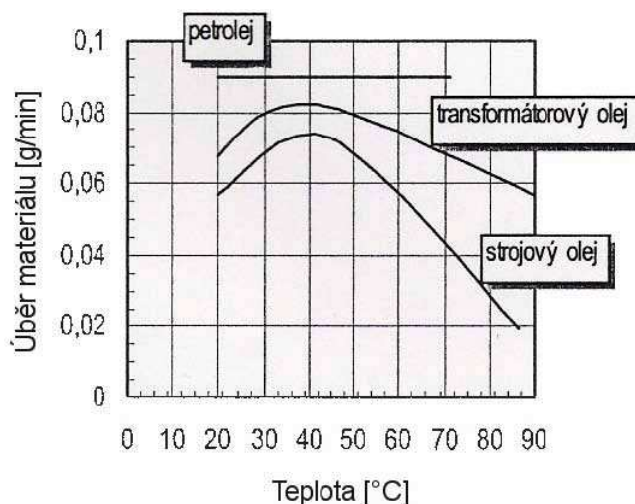
Používané dielektrikum:

- lehké strojní oleje,
- transformátorové oleje,
- petrolej,
- destilovaná voda,
- deionizovaná voda,
- speciální dielektrika dodávané výrobcí strojů. (1)

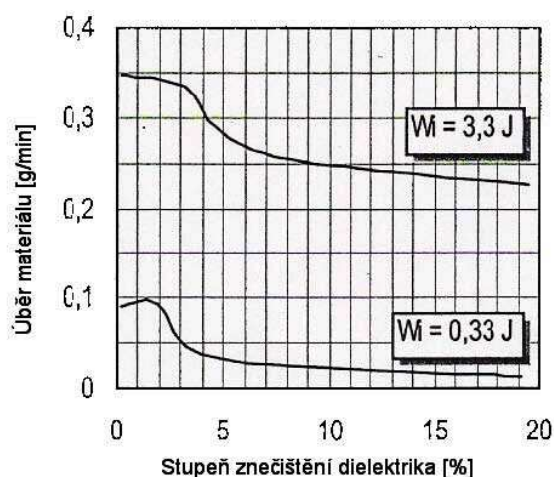
V posledních letech se hojně používá deionizovaná voda, pro svoji nízkou cenu, nízkou viskozitu a požární bezpečnost.

Hojně se též používá petrolej pro svoji dobrou kontrolu výboje. Nevýhodou je, že stroje musí splňovat bezpečnostní a požární pravidla, protože hrozí vzplanutí petroleje. (2)

Pro vlastní proces elektroeroze je důležité, aby přiváděné dielektrikum do pracovního prostoru bylo co nejčistší a v adekvátní teplotě 25 °C. Vliv čistoty a teploty dielektrika na úběru materiálu je ukázán na obrázku 3.35 a 3.36.



Obr. 3.43 Vliv teploty dielektrika na úběru materiálu (2)



Obr. 3.44 Vliv znečištění dielektrika na úběru při různé energii výboje (2)

Z obrázku 3.43 vyplývá, že při použití petroleje je úběr materiálu s rostoucí teplotou konstantní a u strojového nebo transformátorového oleje je s rostoucí teplotou značný pokles úběru materiálu. (2)

U obrázku 3.44 je ukázán vliv nečistoty dielektrika na pracovní proces. Je patrné, že do dvou procent znečištění se účinnost procesu moc neovlivňuje, avšak při překročení 4 % klesá účinnost procesu o 30 % - 40 %. (2)

Požadavky na dielektrickou kapalinu:

- musí mít nízkou viskozitu a dobrou smáčivost, aby byla rychle obnovována izolace po výboji,
- musí zabezpečovat potřebnou vzdálenost mezi elektrodami, aby přechod proudu mezi nimi vyústil do výboje,
- musí být chemicky neutrální, aby nevznikala koroze,
- musí mít dostatečnou teplotu hoření, aby nedocházelo ke vzplanutí,
- musí zabezpečovat chlazení elektrod a odebíraných částic obráběného materiálu,
- při práci s ní nesmí vznikat jedovaté výpary a nepříjemný zápach,
- nesmí podléhat chemickým změnám, musí být stálá, lehce vyrobitelná a levná,
- musí zabezpečovat spolehlivé odplavení erozivních zplodin ze zóny úběru obráběného materiálu. (1)

Srovnání s ohledem na použitelnost dielektrik:

Od nejvíce po nejméně používaného:

- deionizovaná voda,
- destilovaná voda,
- petrolej,
- lehké strojní oleje,
- transformátorové oleje. (11)

Srovnání s ohledem na cenu jednotlivých dielektrik:

Od nejlevnějších po nejdražší v rámci stovek Kč:

- deionizovaná voda,
- petrolej,
- strojní olej,
- transformátorový olej. (11)

Srovnání s ohledem na příkon obráběcího stroje:

Od největšího po nejmenší:

- elektrochemické obrábění,
- plazmové obrábění,
- obrábění elektronovým paprskem,
- vodní paprsek,
- obrábění laserem,
- elektroerozivní obrábění,
- obrábění ultrazvukem. (11)

3.9.1 Konstrukční řešení odvodu nečistot

Vnější vyplachování:

Tento způsob patří mezi nejvíce používané způsoby pro odvod dielektrika. Pro obrábění hlubších dutin je podporováno kombinováním s pererušovaným výplachem. (1)

Obr. 3.45 Vnější vyplachování (1) Obr. 3.46 Vnitřní tlakové vyplachování (1)

Vnitřní tlakové vyplachování:

V této konstrukci je dielektrikum přiváděno otvorem v nástroji přímo do pracovního prostoru. Tento způsob však zhoršuje tvarovou přesnost na bočních plochách, protože odplavované částice ovliví boční výboje. (1)

Vyplachování odsáváním:

Tohle řešení poskytuje velmi dobrou tvarovou přesnost. (1)

Obr. 3.47 Vyplachování odsáváním (1)

Pulzní vyplachování:

Tato konstrukce spoívá v oddalování elektrody a možnosti podpory rotací. Vyplachování je sdružené se zprůměrným pohybem elektrody. Pracovní proud se při odjídání vypíná, aby nedošlo k bočním výbojům, a opětovně se zapne při najetí elektrody do pracovní vzdálenosti. (1)



Obr. 3.48 Pulzní vyplachování (1)

Smíšené vyplachování

Konstrukce spočívá v kombinaci odsávacího a vyplachovacího způsobu odstraňování vzniklých nečistot. (1)

- 1 – nástrojová elektroda,
- 2 – pracovní vana,
- 3 – dielektrikum,
- 4 – obrobek,
- 5 – přívod dielektrika,
- 6 – odsávání dielektrika.

Obr. 3.49 Smíšené vyplachování (1)

3.9.2 Agregát dielektrika

- 1. zásobník deionizační pryskyřice,
- 2. vyplachování a chlazení,
- 3. filtry,
- 4. vyplachování v horní hlavě,
- 5. obrobek,
- 6. vyplachování v dolní hlavě,
- 7. filtrační a deionizační,
čerpadlo,
- 8. nádrž s dielektrikem,
- 9. kohout,
- 10. kohout výplachu horní
hlavy,
- 11. kohout výplachu dolní
hlavy.

Obr. 3.50 Schéma agregátu dielektrika (33)

Na obrázku 3.50 je ukázán oběh dielektrické kapaliny, který je důležitým článkem při erodovacím procesu. Kvalitní stav dielektrika je důležitý pro dodržení správné řezné rychlosti. Dielektrikum je kapalina se špatnou nebo skoro žádnou elektrickou vodivostí.

Kapalina má při procesu následující funkce:

- odplavování oderodovaných částic z místa eroze,
- deionizování jiskrové štěrby mezi elektrodou a obrobkem,
- chlazení místa řezu. (33)

Aby dielektrikum mohlo optimálně své výplachové úkony, musí být zbaveno zerodovaných částecek a chemicky degradovaných částecek dielektrika. Kromě toho musí být elektroerozivním procesem ohřáté dielektrikum opět ochlazováno na normální pracovní teplotu 20 až 25 °C. Příliš vysoká teplota dielektrika způsobuje mimo jiné nepřesnosti v procesu obrábění a vysoké ztráty vypařováním dielektrika. (13)

Filtrační zařízení se skládá z:

- čerpadla filtrace,
- zásobníku dielektrika,
- filtrační nádoby,
- potrubí a ventilů.

Dielektrikum je čerpadlem nasáváno ze zásobníku a potrubím dovedeno do místa erodování na obrobku, umístěného v pracovní vaně. Odtud přepadem do použitého dielektrika, přepad je nastaven nad výšku obrobku, aby proces probíhal pod pracovní kapalinou. Čerpadlo dále žene kapalinu přes systémy filtrů (obr. 3.51), které zbavují kapalinu od zerodovaných částic a dosahují filtračního stupně ve výši 1 μm . Přefiltrované dielektrikum protéká přes zásobník pryskyřice, která opět obnovuje pokleslé vlastnosti dielektrika. Celý proces se neustále opakuje. (13)



Obr. 3.51 Různé druhy filtračních jednotek (16)

Dielektrikum bývá dodáváno v sudech a musí být skladováno tak, aby se zamezilo vniknutí jiné kapaliny. Na sudech je také označený bod vzplanutí (106 °C), protože může dojít k náhlému vzniku požáru při nedostatečném chlazení dielektrické kapaliny. (13)

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Technicko-ekonomické zhodnocení je provedeno z hodnot při výrobě pětinasobné formy (obr. 4.1). Jako hloubicí stroj byl použit Exeron 313 a pro výrobu pěti dutin bylo třeba vyrobit 54 kusů měděných elektrod. Výroba jedné z měděných elektrod na frézce MCV 1000MA a drátové řezačce DWC 110 trvala cca 1 hod.

Pro vlastní hloubicí proces na stroji Exeron 313 byly zvoleny programy s danými parametry dle tabulky v příloze č. 4. Celkový strojní čas na výrobu dutin činil 206 hodin.

Teoreticky porovnejme hloubicí stroj Exeron EDM 313 se starším strojem Optimat 515 ve strojním parku firmy Brass s.r.o., při obrábění pětinasobné formy.

Hloubení měděnou elektrodou strojem Optimat 515.....3 hod 18 min(3,3 hod)
 Hloubení grafitovou elektrodou strojem Optimat 515.....2 hod 30 min(2,5 hod)
 Hloubení měděnou elektrodou strojem Exeron 313.....2 hod 45 min(2,75 hod)
 Hloubení měděnou elektrodou strojem Exeron 313.....2 hod 14 min(2,23 hod)

Čas hloubení pětinasobné formy strojem Exeron162 hodin
 Náklady na hodinu práce elektroerozivního hloubicího stroje N_{hs} je 600 Kč/h.

Úspora času hloubení měděnou elektrodou:

$$u_m = 100\% - \frac{2,75 \cdot 100}{3,3} = 16,6\% \quad (4.1)$$

Úspora času hloubení grafitovou elektrodou:

$$u_g = 100\% - \frac{2,14 \cdot 100}{2,5} = 14,4\% \quad (4.2)$$

Úspora času hloubení pětinasobné formy měděnou a grafitovou elektrodou:

$$\begin{array}{rcl} 162 \text{ hod} \dots 100\% & 162 \text{ hod} \dots 100\% & (4.3)(4.4) \\ \underline{X \text{ hod} \dots 16,6\%} & \underline{X \text{ hod} \dots 14,4\%} & \end{array}$$

$$\begin{aligned} x &= 162 \cdot \frac{16,6}{100} \\ t_{um} &= 26,892 \text{ hod} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= 162 \cdot \frac{14,4}{100} \\ t_{ug} &= 23,328 \text{ hod} \end{aligned}$$

Finanční úspora hloubení pětinasobné formy měděnou a grafitovou elektrodou:

$$F_{um} = t_{um} \cdot N_{hs} \quad (4.5)$$

$$F_{um} = 26,892 \cdot 600 = \mathbf{16135 \text{ Kč}}$$

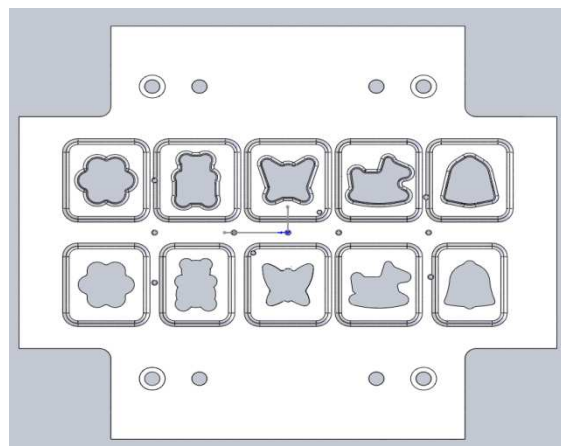
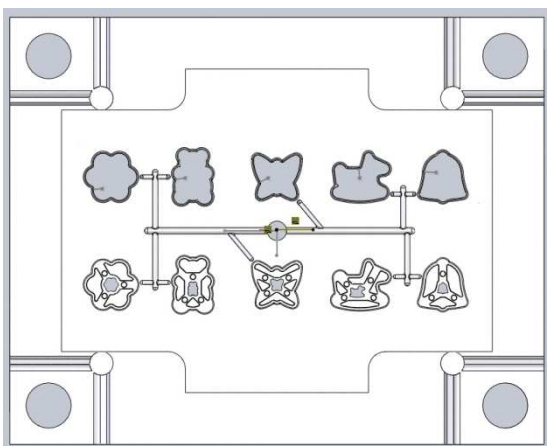
$$F_{ug} = t_{ug} \cdot N_{hs} \quad (4.6)$$

$$F_{ug} = 23,328 \cdot 600 = \mathbf{13997 \text{ Kč}}$$

Zde jsou porovnány celkové náklady na pětinasobnou formu, která byla vyrobena pomocí měděných elektrod na stroji Exeron EDM 313.

Z výpočtů je patrné, že firma Brass s.r.o. zvolila finančně i časově výhodnější výrobní postup. Vůči starší verzi hloubicího stroje - Optimat 515, po finanční stránce ušetřila 16 123 Kč.

Celkové náklady na výrobu pětinasobné tlakové formy z materiálu Hasco 1.2343 (dle ČSN 19 552) pro zákazníka činily kolem 390 700 Kč. Forma byla dále kalena na 48 ± 2 HRC. V celkové ceně byly zahrnuty i náklady na provozní činnost hloubicího stroje.



Obr. 4.1 Ukázka erodovaných částí formy

Provozní náročnost elektroerozivního hloubení:

Náhradní filtrační jednotka se mění zhruba po 10 000 hodinách v provozu a cena se pohybuje kolem 500 Kč/kus. Obsluha stroje kontroluje i tlak na manometru a při zjištění překročení určité hodnoty to znamená zvýšení neprůchodnosti filtračního zařízení a nutnost výměny.

U dielektrické kapaliny se doporučuje celková výměna jednou ročně, ale z praxe lze říct, že se používá průběžného dolévání do zásobníku. Cena se pohybuje v rámci 90 Kč/l.

ZÁVĚR

Elektroerozivního hloubení dutin se využívá hlavně u obrábění žáropevných, žáruvzdorných a vysokopevnostních materiálů, které se těžko opracovávají klasickými konvenčními metodami obrábění. Vlastnost obrábět jakékoli vodivé materiály s tvarovou složitostí výrobku je hledisko pro použitelnost metod EDM.

Sama budoucnost těchto metod se v dohledné době jeví jako velice příznivá. Sám pokrok ve vývoji elektroerozivního stroje v rámci deseti let nám ukazuje, že se dají výrobní náklady za podmínky využití nových materiálových, tak postupových poznatků snížit až o polovinu.

Vlastní výroba nástrojových elektrod pro proces EDM na tvarové dutiny spolu s delším výrobním časem, může vést k navýšení celkových nákladů EDM hloubení. Je však nutné vždy uvážit všechny aspekty a možnosti samotné firmy, pro zařazení EDM metody do pracovního postupu.

Lze však do jisté míry očekávat útlum použití EDM technologií na tvarové dílce pro formy, díky nastupujícímu trendu výroby HSC frézování. Díky této variantě je možné na trhu se shledat s mikronástroji pro frézování, které jsou schopné frézovat velice jemné detaily. V dutinách formy se ovšem nachází ostré hrany nebo tvary, které se budou hůře frézovat. I díky tomuto faktu bude elektroerozivní hloubení u mnoha firem nezastupitelnou částí při výrobě tvarových dutin, i když nemusí být jeho využívání tak časté, jako v minulosti.

Je možné očekávat směr trendu k větší bezobsažnosti a automatizaci celého procesu obrábění. Celková výroba by se mohla soustředit do výrobních buněk a do větších výrobních celků. Spolčování podobných výrobních operací a strojů jako jsou elektroerozivní stroje s HSC obráběcí centra půjdou paralelně spolu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*: Skripta FS ČVUT. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989.
2. MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie*. Košice: Edícia vedeckej a odborné literatúry, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
3. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění*. [online], kód článku: 070710. [cit. 2009-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni> >.
4. KOCMAN, K a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270s. ISBN 80-214-1996-2
5. OBER, E., JONES, F.D., HORTON, H.L., RAFFEL, H.H. *Machinery's hand-book*. 25th Edition. New York: Industrial Press Inc., 1996. 2547s. ISBN 0-8311-2595-0.
6. DESCOEUDRES, A. *Characterization of electrical discharge machining plasma*. [online], Lausanne: EPFL, 2006. [cit. 2009-04-24]. Dostupné z WWW: <http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2006/3542/EPFL_TH3542.pdf>.
7. BRANDA, M. *Elektroerozivní stroje*. [online], [cit. 2009-05-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-stroje>>.
8. MÁDL J. .et al *Technologie obrábění* Praha: ČVUT , 2000. ISBN: 80-01-01-091-6
9. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Tiskové středisko ZČU, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
10. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění*. [online], kód článku: 070710. [cit. 2009-03-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni> >.
11. KALENDA Jan, *Moderní metody elektroerozivního obrábění, navazující dokončovací metody*. Bakalářská práce v oboru „Strojírenská technologie - obrábění“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2008. 14 s.
12. FIŠER Michal, *Trendy vývoje nástrojů pro výrobu dutin forem*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie – obrábění“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2008. 23 s.
13. PENTA TRADING, spol. s r.o. *Návod k obsluze Exeron 313*. 78 s.
14. HUMÁR, ANTON. *Technologie I, Technologie obrábění – 3. část*. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní

program. [online] VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. Dostupné na Word Wide Web:
<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/zakl_met_obr/TI_TO-3.cast.pdf>

15. ČUMPL David, *Trendy vývoje elektroerozivních hloubících strojů*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie – obrábění“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2008. 23 s.
16. KUCHARÍK Milan, *Drátové elektroerozivní obrábění při výrobě přesných střížných nástrojů*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie – obrábění“. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2008. 26s.
17. SCOTT F. MILLER, CHEN-C. KAO, ALBERT J. SHIH, JUN QU. Investigation of wire electrical discharge machining of thin cross-sections and compliant mechanisms in *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45. [online], (2005). s. 1717–1725. [cit.2008-04-24]. Dostupné z WWW:
<http://wumrc.engin.umich.edu/~shihaj/papers/05_MTM_WEDM_thin_section.pdf>.
18. LEINVEBER, J., ŘASE, J., VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. Praha: Pedagogické nakladatelství. 1998. Druhé vydání. 911 s. ISBN 80-7183-123-9.
19. MRKVICA, I., MORAVEC, V. *Úpravy břitů a povrchů řezných nástrojů*. [online], kód článku: 070601. [cit. 2009-05-13]. Dostupné z WWW:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/upravy-britu-a-povrchu-reznychnastroju>>.
20. VELTEROP, L. *Influence of wire electrical discharge machining on the fatigue properties of high strength stainless steel*. [online], [cit. 2009-04-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.nlr.nl/id~2861/lang~en.pdf>>.
21. Příručka k zařízení AGIETRON Impact, Innovation, Exact. [CD-ROM], c2001, [citováno 15. března 2009].
22. TEDOK, spol. s r. o. *Tabulka správné volby grafitu*. [online]. [citováno 16. února 2008]. Dostupné z WWW:<<http://www.tedok.cz/tabulka-spravne-volby>>.
23. *Schnittdaten Fräsen 2007/2008*. Karnasch GmbH. 50 s.
24. *Professional Tools - price list 2007/2008*. Karnasch GmbH. 73 s.
25. BRT servis. [online]. [citováno 1. dubna 2009]. Dostupné z WWW: <<http://www.brtservis.cz/cs/wenzel.html>>.
26. JASPAR, Jiří. Speciality pro výrobu nástrojů a forem. *MM – průmyslové spektrum*, MM 2006/4. s. 105. ISSN 1212-2572.

27. JASPAR, Jiří. Nástroje pro obrábění grafitu. *MM – průmyslové spektrum*, MM 2006/10. s. 82. ISSN 1212-2572.
28. *Grafit EDM Ringsdorff*. Ringsdorff. 17 s.
29. PRŮŠA, Vojtěch. Nové kopírovací mikrofrézy. *MM – průmyslové spektrum*, MM 2007/4. s. 58. ISSN 1212-2572.
30. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. *Důležité aspekty vysokorychlostního obrábění*. [online], kód článku: 021284. [cit. 2009-04-02]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/dulezite-aspekty-vysokorychlostniho-obrabeni>>.
31. TEXIMP. [online]. [citováno 2. dubna 2009]. Dostupné z WWW: <<http://www.teximp.cz/article/8-haas-tam-kde-inovace-nekonci.html>>.
32. SYSTEM 3R. [online]. [citováno 11. února 2009]. Dostupné z WWW: <http://www.system3r.com>>.
33. FISHER, G. et al. *Příručka pro uživatele C. AGIE CHARMILLES GROUP*. 2000
34. SYSTEM 3R. [online]. [citováno 14. dubna 2009]. Dostupné z WWW: <http://www.system3r.cz/index_soubory/Page449.htm>.
35. PENTA. [online]. [citováno 14. dubna 2009]. Dostupné z WWW: <http://www.onlineservices.cz/penta/vyvoj_test/foto/clanky_produkty/prilohy/1203424498__217.pdf>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

B	[mm]	výška plošky
CNC	[-]	číslicově řízené stroje
DMR	[mm]	dolní mezní rozměr
EBM	[-]	obrábění paprskem laseru
EDM	[-]	elektroerozivní obrábění
ECM	[-]	elektrochemické obrábění
GAP	[mm]	pracovní mezera
HSP	[-]	vysokorychlostní obrábění
HMR	[mm]	horní mezní rozměr
I	[A]	proud
LBM	[-]	obrábění laserem
K	[$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$]	znečištění dielektrika
PBM		obrábění paprskem plazmy
Ra	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
R _m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
S	[mm]	šířka stopy
T	[s]	doba periody
T _{on}	[μs]	doba impulsu
USV	[-]	obrábění ultrazvukem
V _o	[mm^{-3}]	odebraný objem materiálu obrobku
V _i	[mm^{-3}]	objem kráteru
V _n	[mm^{-3}]	objemové opotřebení nástroje
W _i	[J]	energie výboje
X	[mm]	číselná hodnota rozměru
h	[mm]	hloubka kráteru
k	[-]	součinitel pro katodu a anodu
r	[-]	experimentálně zjištěný koeficient
l	[mm]	délka
t _d	[μs]	doba zpoždění výboje
t _e	[μs]	doba výboje
t _i	[μs]	doba impulsu
t _o	[μs]	doba prodlevy mezi impulsy
z	[mm]	tloušťka narušené vrstvy
α	[°]	úhel sklonu
Ø	[mm]	průměr
δ	[mm]	tvarová odchylka
Δm _N	[g]	měrná hmotnost nástroje
Δm _O	[g]	měrná hmotnost obrobku
ρ _N	[$\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$]	měrná hustota nástroje
ρ _O	[$\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}$]	měrná hustota obrobku
ϑ	[%]	relativní objemové opotřebení
δ _{ER}	[mm]	chyba elektroeroze
δ _{NAST}	[mm]	chyba rozměru nástroje
δ _{ST}	[mm]	chyba deformace a nepřesnosti stroje
δ _T	[mm]	teplotní chyba

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Drátová řezačka DWC 110
Příloha 2 Hloubicí stroj Exeron 313
Příloha 3 Hloubicí stroj Optimat 515
Příloha 4 Technologická tabulka pro stroj Exeron 313

Příloha 1



PŘÍLOHA 2



PŘÍLOHA 3



PŘÍLOHA 4

ET 1	Elektrolytická med'		Geometria - normálna	Čelná plocha elektr. elektr. $\leq 2000\text{mm}^2$
	Oceľ 1.2343		Priorita "nízke opotrebovanie"	výplach odskokom elektródy

Aktívna plocha [cm ²]	Podroster na stranu [μm]	Kód genratora	VDI č.	Ra [μm]	Rz [μm]	Pracovný prúd [A]	I	U	ton	toff	Úber materiálu [mm ³ / min]	S Vol %	Iskrová medzera [μm] na stranu		Tepelne ovplyvnená zóna [μm]	Poznámky:
													Čelo	Bok		
	10	3	18	0,8	3,2	0,5	3	3	15	10	0,07	7	10	10	17	
	20	4	21	1,1	4,4	0,8	4	3	18	10	0,16	6,3	20	15	20	
	30	5	22	1,3	5,2	1	5	3	25	10	0,2	6	25	20	20	
<0,1	40	6	24	1,6	6,4	2	6	3	30	10	0,4	3	35	30	25	

5	500	17	47	22	60	30	17	1	500	50	559	0,5	250	170	200
6	680	18	48	25	100	45	18	1	800	80	493	0,5	330	250	265
7	825	19	49	26	104	50	19	1	800	90	510	1	360	270	270
8	970	20	50	27	108	55	20	1	800	90	530	1	400	300	280
10	1150	21	51	28	112	60	21	1	800	90	550	1	450	350	310

exeron	Technologická tabuľka	XI.06	ET 2-1 (07.11.2006 B&R)
		e-mail:	awt@exeron.de