

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJIRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TRENDY POUŽITÍ ELEKTROEROZIVNÍCH TECHNOLOGIÍ

TREND OF EXERCISE ELECTRODISCHARGE MACHINING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN JAKEŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing.KAREL OSIČKA

BRNO 2008

List 2

licence

Zadání

ABSTRAKT

Práce popisuje základní princip a technologické možnosti elektroerozivního obrábění. Byly zhodnoceny možnosti jednotlivých výrobců EDM strojů a provedeno jejich porovnání. Dále bylo popsáno využití elektroerozivního obrábění v podniku Žďas a.s. Práce se také zabývá trendy vývoje elektroerozivní technologie.

Klíčová slova

Elektroerozivní obrábění, EDM, elektroerozivní drátové řezání, elektroerozivní hloubení, výrobci EDM strojů, trendy elektroerozivního obrábění, Žďas a.s.

ABSTRACT

In this work, description of a basic principle of electro discharge machining and its technological possibilities was made. Possibilities of individual EDM machine producers and their comparison were described. Furthermore, the use of electro discharge machining in Zdas a.s. was shown. Trends in a development of the electro discharge technology are included, too.

Keywords

Electro discharge machining, EDM, Wire EDM, Die Sinking EDM, producers EDM machines, trends in electrical discharge machining, Zdas a.s.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Jakeš, Jan. *Trendy použití elektroerozivních technologií.: Diplomová práce.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 53s., příloh 1. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Trendy použití elektroerozivních technologií vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....

Jan Jakeš

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Karlu Osičkovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
ÚVOD	9
1 STÁVAJÍCÍ ÚROVEŇ ELEKTROEROZIVNÍHO OBRÁBĚNÍ	10
1.1 Úvod do nekonvenčních metod obrábění	10
1.1.1 Hlavní rozdíly konvenčních a nekonvenčních technologií	10
1.1.2 Důvody zavádění nekonvenčních technologií a jejich druhy	10
1.2 Teorie elektroerozivního obrábění - EDM	11
1.2.1 Historie elektroeroze	11
1.2.2 Výhody a nevýhody elektroeroze	11
1.2.3 Principy elektroeroze	13
1.2.4 Množství odebraného materiálu a charakteristiky výboje	16
1.2.5 Dielektrikum a způsoby jeho použití	19
1.2.6 Nástrojové elektrody	21
1.2.7 Rozměry elektrod	23
1.2.8 Parametry obrobené plochy	24
1.3 Metody elektroeroze v praxi	27
1.3.1 EDM hloubení dutin a tvarových otvorů	27
Možnosti EDM hloubení	27
1.3.2 EDM drátové řezání	28
Možnosti EDM drátového řezání	29
1.3.3 EDM mikroděrování	29
1.3.4 Volitelné příslušenství EDM strojů	30
2 VYUŽITÍ ELEKTROEROZE V PODMÍNKÁCH FIRMY ŽĐAS a.s.	32
2.1 Představení Žďas a.s.	32
2.2 Elektroeroze v podmínkách Žďas a.s.	32
2.2.1 Historie EDM v podmínkách Žďas a.s.	32
2.2.2 EDM stroje	32
2.2.3 Obrobky	33
2.2.4 Používané dráty	35
2.2.5 Používané dielektrikum	36
2.2.6 Řídící program	36
3 POROVNÁNÍ VŮDČÍCH SVĚTOVÝCH VÝROBCŮ EDM STROJŮ	37
3.1 GF AgieCharmilles	37
3.2 Fanuc	39
3.3 Sodick	40
3.4 Shrnutí vůdčích výrobců EDM strojů	42
4 ÚROVEŇ OSTATNÍCH VÝROBCŮ EDM STROJŮ	44
4.1 ONA	44
4.2 Mitsubishi	45
4.3 Shrnutí ostatních výrobců EDM strojů	46
5 TRENDY VÝVOJE ELEKTROEROZIVNÍ TECHNOLOGIE	48
5.1 Trendy vývoje elektroeroze	48
5.2 Budoucnost EDM v podmínkách podniku Žďas a.s.	48
ZÁVĚR	50

Seznam použitých zdrojů	51
Seznam použitých zkratk a symbolů	53

ÚVOD

Ačkoliv je elektroerozivní obrábění v současné době podepsané pod velkou částí různých výrobků, je tato technologie veřejně poměrně málo známá. Řadíme ji do skupiny tzv. nekonvenčních metod, přestože je rozšířena prakticky v každém větším strojírenském podniku. Nejčastěji se využívá pro výrobu střížných a lisovacích nástrojů nebo vstřikovacích forem na plasty.

Podstata této metody spočívá v elektrickém výboji, který nastane při přiblížení nástroje (elektrody) k obrobku. Tento výboj způsobuje roztavení mikroskopických částic obrobku, tyto částice jsou poté dielektrikem vyplavovány z místa výboje a vznikají malé prohlubně jak na materiálu, tak na nástroji. Vhodnou volbou technologických podmínek se docílí maximálního úběru na obrobku oproti co nejmenšímu úběru na nástroji.

Nejčastěji používané metody elektroerozivního obrábění jsou elektroerozivní drátové řezání a elektroerozivní hloubení. Drátové řezání je dnes stěžejní způsob výroby střížníků. Elektroerozivní hloubení nachází uplatnění především při výrobě forem a zápustek.

Na trhu je celá řada výrobců EDM strojů a jejich příslušenství. Přední výrobce strojů pro EDM AgieCharmilles, Fanuc nebo Sodick doplňuje řada dalších jako Mitshubishi, Ona, Exeron, Chmer, Makino, CDM Rovella a další.

Cílem diplomové práce bylo zhodnotit úroveň a možnosti výrobců strojů pro elektroerozivní obrábění. Dále pak provést rozbor této technologie a její využití v podmínkách firmy Žďas a.s.

1 STÁVAJÍCÍ ÚROVEŇ ELEKTROEROZIVNÍHO OBRÁBĚNÍ

1.1 Úvod do nekonvenčních metod obrábění

1.1.1 Hlavní rozdíly konvenčních a nekonvenčních technologií

Elektroeroze se řadí mezi tzv. nekonvenční technologie. Tyto technologie nevyužívají na rozdíl od klasických pouze mechanickou energii, ale také elektrické, chemické a nebo tepelné fyzikální jevy. Obecně do této skupiny patří technologie, které byly vyvinuté v posledních šedesáti letech 20. století, a které využívají klasické formy energie novými způsoby nebo využívají energie, které nebyly předtím použity při obrábění. (1, 2)

Hlavní rozdíly klasického mechanického obrábění jako je soustružení, frézování, vrtání jsou popsány ve třech základních podmínkách. (2)

1. Materiál nástroje má být tvrdší než materiál obrobku.
2. Při obrábění musí být vynaloženo určité množství energie na porušení molekulární soudržnosti materiálu. Tato podmínka je problematická zejména při procesech, kde nelze působit na materiál velkou silou např. při vrtání malých otvorů.
3. Pro obrábění je třeba přeměnit jakýkoliv zdroj energie vyššího druhu na jednoduchou mechanickou energii, která se používá pro obrobení materiálu.

Odlišnost nekonvenčního obrábění: (2)

1. Při úběru materiálu nevzniká řezný odpor, řezná síla a obrobky se tedy nedeformují vlivem mechanického zatížení.
2. Nejsou zde důležité mechanické vlastnosti obráběného materiálu jako tvrdost, houževnatost a pevnost.
3. Částice materiálu se mikrorozměrově oddělují během jednoho cyklu (jeden impuls výboje) a oddělují se současně ve velkém počtu lokalit. Z místa úběru tedy odchází méně tepla do obrobku.

1.1.2 Důvody zavádění nekonvenčních technologií a jejich druhy

Při zavádění nových konstrukčních materiálů, které byly nutné pro výrobu např. letadel, kosmických raket nebo počítačů, nastaly problémy s jejich obráběním klasickými metodami. Tyto technologie byly tedy nejdříve využívány pro tyto speciální účely, později se rozšířily do různých odvětví strojírenského průmyslu. (1, 2)

Hlavní druhy nekonvenčních technologií: (2)

- obrábění laserem LBM
- ultrazvukové obrábění USM
- obrábění vodním paprskem WJM
- chemické obrábění CM
- elektrochemické obrábění ECM

- obrábění plazmou PAM
- obrábění paprskem elektronů EBM
- elektroerozivní obrábění EDM

1.2 Teorie elektroerozivního obrábění - EDM

1.2.1 Historie elektroeroze

Základ elektroeroze položil J. Priestley, který již v roce 1768 během studia chování plynů zaznamenal vznik malých kráterů na povrchu kovu při elektrickém výboji. Tento jev byl později označen jako elektroeroze. Nejvíce výzkumu elektroeroze bylo zaměřeno na oblast vývoje a konstrukce kontaktních spínacích zařízení, kde je považována za nežádoucí jev vyvolávající opotřebení. (1, 2)

V období od 1938 - 1944 probíhal manželi Lazarenkovými intenzivní výzkum elektrických výbojů, které by se daly použít při obrábění kovů. Tito výzkumníci sestavili hlavní zákonitosti elektroeroze. (1, 2)

Hlavní zákonitosti elektroeroze (1, 3)

- Všechny elektricky vodivé materiály podléhají elektrické erozi.
- Elektroeroze probíhá jak v plynném tak kapalném prostředí.
- Vhodnou volbou parametrů se dosahuje dvou druhů výbojů – stacionárního (oblouk) a nestacionárního (jiskra), který je vhodnější na rozrušování materiálu.

V širším průmyslu se elektroeroze objevila mezi lety 1950 - 1954, kdy započala výroba prvních EDM strojů. (2)

1.2.2 Výhody a nevýhody elektroeroze

Mezi největší výhody této metody patří : (1,2)

- a) Možnost obrábění problematických tvarů.
- b) Obrábění problematických materiálů.
- c) Vysoká přesnost a dosahovaná střední aritmetická úchylka povrchu R_a .
- d) Automatizace výroby.

a – Výroba nerotačních tvarů také usnadňuje obrábění např. tenkostěnných součástí, u kterých by řezná síla mohla způsobit deformaci stěny.

b – Pro obrábění metodou EDM nejsou důležité mechanické vlastnosti materiálu jako je houževnatost, tvrdost, pevnost atd. Je tedy vhodná pro kalené oceli, titan atd.

c – Při elektroerozivním obrábění se dosahuje přesnosti rozměru až 0,002 mm a aritmetické úchylky povrchu $R_a = 0,05 \mu\text{m}$.

d – Automatizace ve výrobě snižuje výrazně výrobní časy a náklady, proto jsou dnes elektroerozivní stroje vybaveny CNC, technologickými paletami a zásobníky nástrojů.

Nevýhody (1, 2)

- a) možnost obrábět pouze elektricky vodivé materiály
- b) energetická náročnost obrábění vzhledem k množství odebraného materiálu
- c) nízká produktivita
- d) cena elektroerozivních strojů
- e) nižší životnost nástrojů vyrobených EDM

a – Dle hlavních zákonů elektroeroze nelze uskutečnit úběr materiálu elektroerozí na elektricky nevodivém materiálu. Je tedy vyloučeno obrábění např. plastů.

b – Z tabulky 1.2 vyplývá, že měrná práce u EDM je až řádově vyšší oproti konvenčním metodám.

Tab. 1.2 Technologické parametry obrábění (5)

Způsob obrábění	Úběr materiálu ($\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Měrná práce ($\text{J} \cdot \text{mm}^3$)	Příkon stroje (kW)
Soustružení Frézování	Až 15000	1-10	5-50
Broušení	80-1500	5-200	5-150
EDM	5-120	100-1000	až 15

c – Porovnání úběrů dosahovaných EDM a klasickým třískovým obráběním je ukázáno v tabulce 1.2. Ovšem i přes nízkou hodnotu úběru je vhodným přístupem dosaženo u složitých tvarů značného ušetření pracnosti.

d – Od 1 000 000 Kč (např. taiwanský stroj Chmer) až po přibližně 8 000 000 Kč u nejmodernějších strojů renomovaných značek.

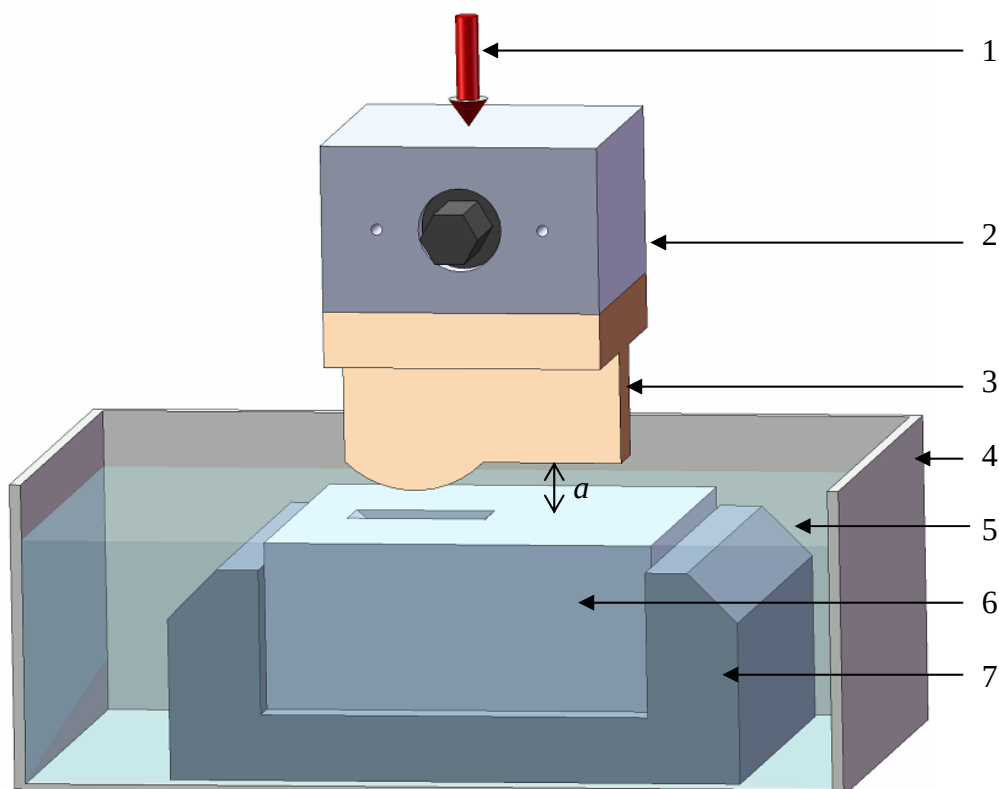
e – Podrobněji vysvětleno v kapitole 1.2.8 Parametry obrobené plochy.

Využití EDM v praxi: (2)

- v současné době přední metoda ve výrobě střižníků a střižnic
- pro zhotovování otvorů různých tvarů do kalených materiálů a slinutých karbidů
- na výrobu zápusťek a renovace poškozených zápusťek, kdy se poškozená zápusťka přehloubí stejnou elektrodou, kterou byla vyrobena
- na obrábění materiálů vysoké pevnosti
- pro výrobu lékařských přístrojů z jemné mechaniky
- vyjiskřování zalomených nástrojů bez poškození součásti

1.2.3 Principy elektroeroze

K úběru materiálu dochází elektricky pomocí rychle se opakujících periodických impulzů jiskrového výboje, které jsou staticky rozloženy po celé ploše nástroje. Obrábění probíhá pomocí dvou elektrod, jak je zřejmé z obrázku obr. 1.1 Zařízení pro EDM. Tyto elektrody jsou odděleny jiskrovou mezerou, jejíž velikost je 0,01 až 0,4 mm. Celý proces musí probíhat v dielektriku. Dielektrikum je kapalina s vysokým elektrickým odporem. (1, 2, 4)

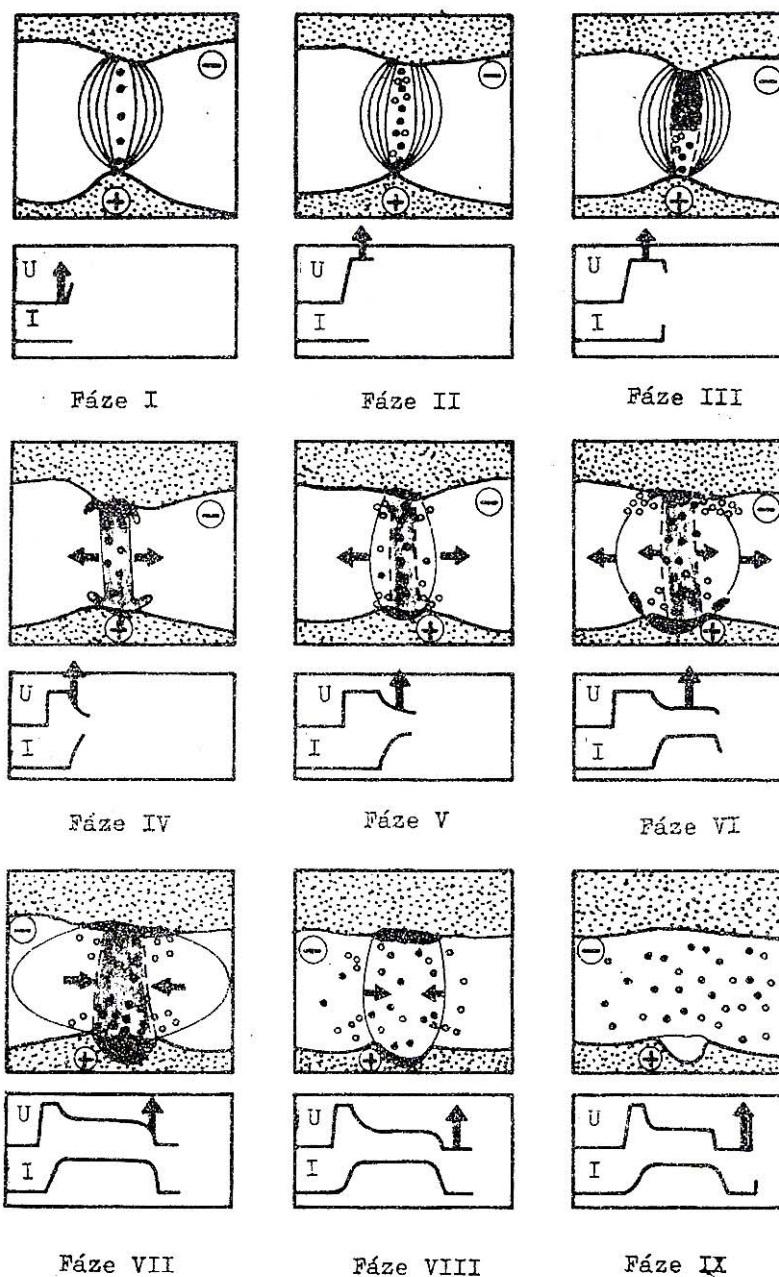


Obr. 1.1 Zařízení pro EDM hloubení

1 – směr posuvu nástrojové elektrody, 2 – upínací systém nástrojové elektrody, 3 – nástrojová elektroda, 4 – pracovní vana, 5 – dielektrikum, 6 – obrobek, 7 – upínací systém obrobku, a – pracovní mezera (GAP)

Ke vzniku výboje dochází po přivedení napětí na elektrody v místech nejsilnějšího elektrického napěťového pole. Kladné a záporné ionty se vlivem působení tohoto pole začínají pohybovat. Jejich pohyb se zrychluje a dosahuje vysokých rychlostí. Tímto se vytvoří ionizovaný vodivý kanál, který umožní protékání elektrického proudu mezi elektrodami a tedy vznik výboje, který způsobí další srážky částic. Plazmové pásmo, které zde vzniká, má vysokou teplotu (3000 až 12000°C) a způsobuje tavení a odpařování materiálu na obou elektrodách. (1, 4)

Jednotlivé fáze vzniku výboje jsou ukázány na obr. 1.2.



Obr. 1.2 Jednotlivé fáze výboje (1)

Fáze I – po přivedení napětí na elektrody se mezi nimi začne vytvářet elektrické napěťové pole. V místě nejmenší vzdálenosti elektrod se vytváří maximální gradient, do kterého se stahují elektricky vodivé částice.

Fáze II – napětí dosáhlo nejvyšší možné hodnoty. Jako základ slouží můstky, které vytvoří elektricky vodivé částice.

Fáze III – Ze záporně nabitých elektrod se vlivem působení elektrického pole začínají uvolňovat částice – elektrony. Ty se začínají srážet s neutrálně

nabitými částicemi, jejich tříštěním vznikají kladné a záporné ionty. Tento jev označujeme jako ionizace prostředí.

Fáze IV – Ionty obalí střed výbojového kanálu, jeho odpor klesá. Vytváří se vodivý kanál z plasmy. Narůstá proud a teplota na povrchu elektrod, naopak klesá napětí.

Fáze V – Dielektrikum se začíná odpařovat. Vzniká zde plynová bublina. Důsledkem narážení elektronů na anodu a kationtů na katodu se uvolní velké množství energie, které zvýší teplotu až na 10 000°C. Probíhá odpařování a tavení obou elektrod. Proud dosáhl maximální hodnoty a napětí se ustálilo na tzv. zápalné hodnotě výboje.

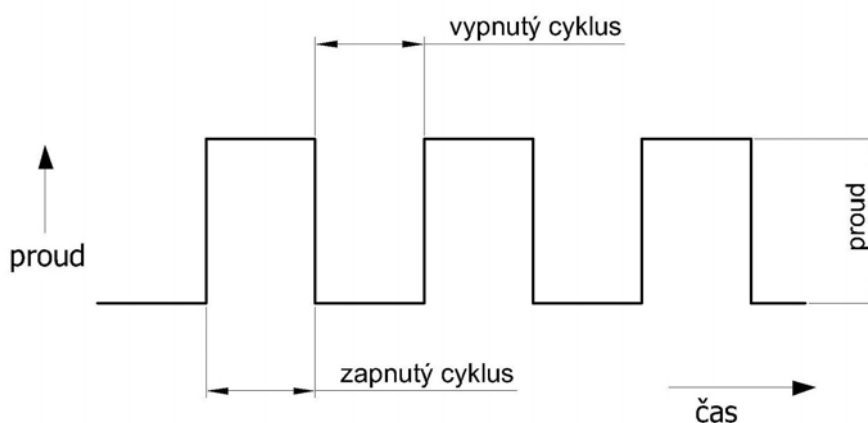
Fáze VI – Intenzivně expandují bubliny a také se taví a vypařuje materiál.

Fáze VII – Přerušením přívodu energie dojde ke snížení tepla. Plynová bublina začíná implozi. Dochází k rozrušování materiálu na povrchu obou elektrod. Vlivem působení sil elektrického pole a sníženým tlakem plynů je tavenina vytrhávána do prostoru, což způsobuje vznik kráterů.

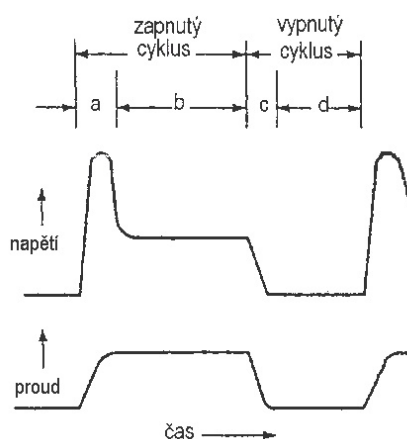
Fáze VIII – V mezelektrodové mezeře klesl proud a napětí na nulovou hodnotu, tím zaniká bublina i výboj. Dielektrikum se dostává do vzniklého kráteru, který ochlazuje. Odebraný materiál zůstane v dielektriku ve formě kuliček o objemu řádově $10^{-3} - 10^{-5} \text{ mm}^3$.

Fáze IX – Celý děj je možno opakovat. Jako základ pro nový výboj slouží zbývající volné ionty v dielektriku. (1)

Jednotlivé průběhy impulsů a jeho profil jsou ukázány na obr. 1.3 a obr. 1.4



Obr. 1.3 Průběh jednotlivých impulsů (2)

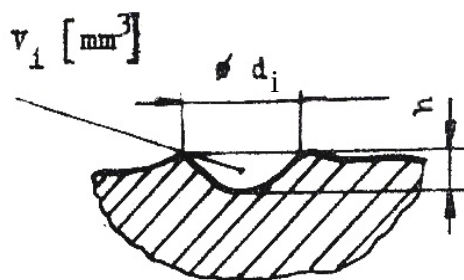


Obr. 1.4 Průběh jednotlivého výboje (2)

a) doba ionizace, b) doba výboje, c) doba deionizace, d) zbytkový čas

1.2.4 Množství odebraného materiálu a charakteristiky výboje

Na obr. 1.5 je ukázán zvětšený profil kráteru vzniklého při elektroerozi. Jeho rozměry ϕd_i a hloubka h jsou ovlivněny velikostí přivedené energie a délkou výboje. Tyto rozměry mají zásadní vliv na drsnost obrobené plochy, přesnost rozměrů, drsnost a účinnost celého procesu. (1)



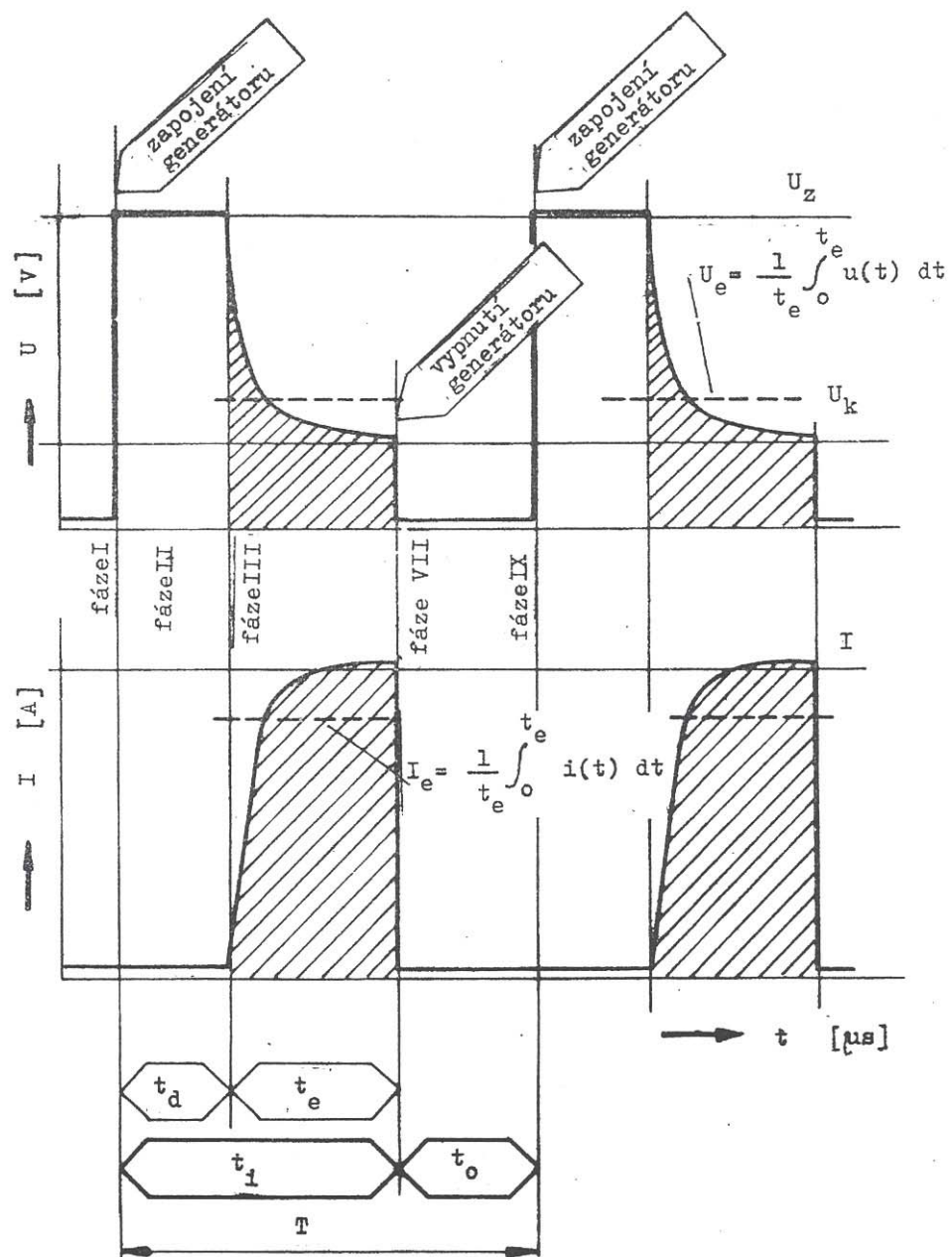
Obr. 1.5 Profil kráteru (1)

Množství odebraného materiálu (1)

$$V_i = K \cdot W_i \quad (1.1)$$

Množství odebraného materiálu je dáno vzorcem 1.1, kde W_i je energie výboje a K součinitel úměrnosti pro katodu a anodu.

Ke zjištění energie výboje je nutno znát časový průběh výboje, který je znázorněn na obr. 1.7. Jednotlivé fáze, které jsou detailně popsány v kapitole 1.2.3, se shodují s fázemi z obr. 1.3. (1)



Obr. 1.6 Časový průběh výboje (1)

Základní charakteristiky určující výboj jsou vyobrazeny na obr. 1.6 : (1)

t_i – doba impulsu: Časový úsek mezi zapojením a vypojením generátoru.

t_d – doba zpoždění výboje: Zpoždění mezi okamžikem zapojení generátoru a průrazem dielektrika.

t_o – doba pauzy: Pauza mezi vypojením a novým zapojením generátoru pro nový pulz.

t_e – doba výboje: Skutečná činná časová hodnota doby výboje.

T – doba periody: Časový úsek určený dobou impulzu a pauzou. Tato hodnota ukazuje frekvenci výbojů.

U_z – napětí naprázdno: Napětí při zapnutí generátoru.

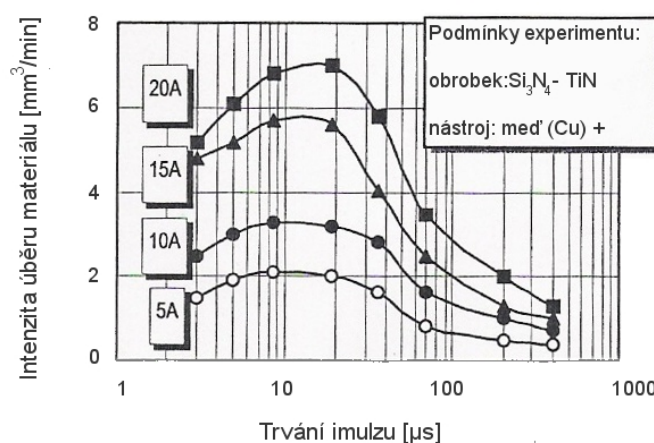
I – pracovní proud výboje: Maximální proud protékající mezi elektrodami při výboji.

I_e – střední vybíjejecí proud: Střední hodnota proudu mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru.

U_e – střední vybíjejecí napětí: Střední hodnota napětí mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru.

U_K – napětí při zhasnutí výboje : Toto napětí nemůžeme navolit. Je ovlivněno pracovními podmínkami jako např. dielektrikem a druhem obráběného materiálu.

Závislosti úběru materiálu na délce trvání impulzu t_i pro různé proudové špičky je ukázána na grafu 1.7.



Obr. 1.7 Závislosti úběru materiálu na délce trvání impulzu pro různé proudové špičky (2)

Energii jednotlivého výboje určíme ze vzorce 1.2

Energie výboje (1)

$$W_i = \int_0^T U_{(t)} \cdot I_{(t)} dt \quad (1.2)$$

1.2.5 Dielektrikum a způsoby jeho použití

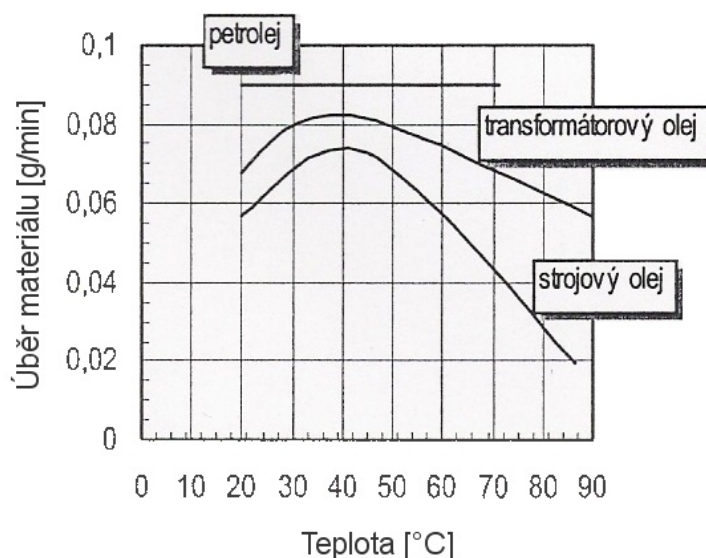
Pracovní prostředí a jeho stav má důležitý vliv na celý elektroerozivní proces. Zajišťuje izolaci mezi elektrodami, odvádí teplo a zabraňuje tepelnému ovlivnění obráběného materiálu, ohraničuje výbojový kanál, odstraňuje odebrané částice z kráterů a zabraňuje vylučování uhlíku na povrchu elektrod, a tím zabraňuje zkratům. (1, 2)

Na dielektrikum jsou tedy kladeny vysoké požadavky : (6)

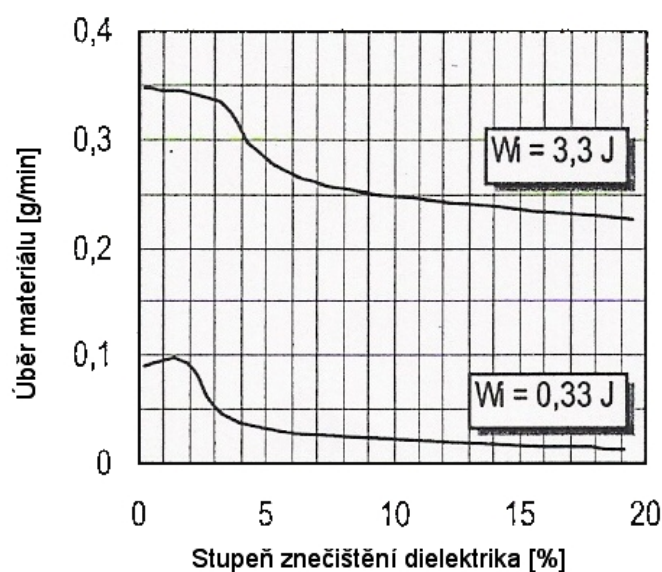
- malá viskozita a dobrá smáčivost, aby docházelo k rychlé izolaci po výboji
- chemická neutralita z důvodů zamezení koroze
- dostatečná teplota vzplanutí jako ochrana před vznícením
- požadovaná chemická stálost, snadná výroba a nízká cena
- hygienická a ekologická nezávadnost

Jako dielektrická kapalina se používají lehké strojní oleje, transformátorové oleje, petrolej a dielektrika na bázích vody. V poslední době se často používá deionizovaná destilovaná voda, která je vhodná zejména kvůli nízké ceně, nízké viskozitě a požární bezpečnosti. Nejčastěji je používán petrolej, především pro dobrou kontrolu výboje. (1, 2)

Pro bezproblémový a kvalitní proces elektroeroze je důležité, aby dielektrikum bylo do pracovního prostoru přiváděno v co největší čistotě a teplotě. Vliv teploty dielektrika a jeho čistoty na úběr materiálu je ukázán na obr. 1.8 a obr. 1.9. Z obr. 1.8 je jasně patrné, že při použití petroleje je úběr materiálu s rostoucí teplotou konstantní. U strojového a transformátorového oleje je s rostoucí teplotou značný pokles úběru materiálu. (2)



Obr. 1.8 Vliv teploty dielektrika na úběr materiálu (2)



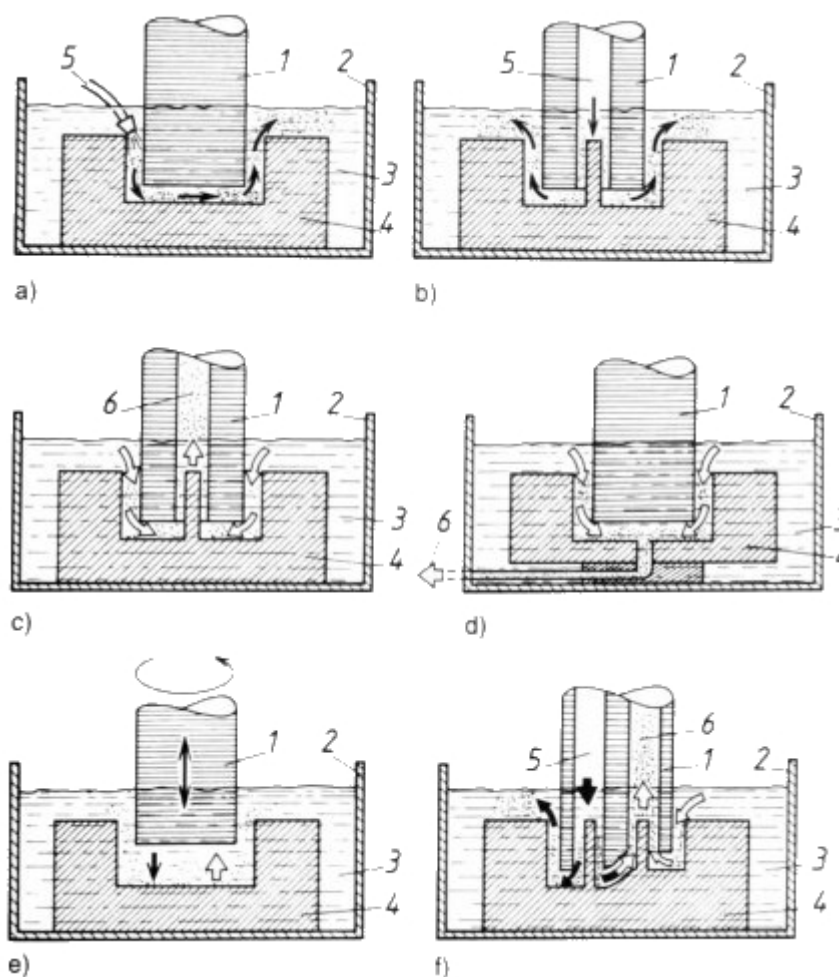
Obr. 1.9 Vliv znečištění dielektrika na úběr materiálu při různých W_i (2)

Na obr. 1.9 je zaznamenán vliv znečištění dielektrika na úběr materiálu při různých W_i . Při znečištění do 2 % se účinnost procesu výrazně nemění, ale již při znečištění kolem 4 % klesá účinnost o (30 až 40) %. (2)

Pro filtraci dielektrika se používají filtry různých konstrukčních provedení jako například průtočné papírové filtry, usazovací filtry nebo odstředivé filtrační zařízení. (1)

Zejména při hloubení hlubokých a tvarově složitých obrobků je důležité neustálé vyplachování vyhloubené části obrobku. Různé způsoby vyplachování jsou zobrazeny na obr. 1.10, jednotlivé způsoby jsou popsány níže.

- a) *vnější* – Nejčastěji se používá pro vyplachování hlubokých děr, je vhodná kombinace s pulzním vyplachováním
- b) *vnitřní tlakové* – Dielektrikum je přiváděno do pracovního prostoru otvorem v nástroji. Nevýhodou je zhoršení tvarové přesnosti bočních ploch, protože odváděné částice způsobují boční výboje.
- c, d) *odsávání* – Dielektrikum je odsáváno dutinou v nástroji nebo obrobku. Tento způsob se vyznačuje dobrou tvarovou přesností.
- e) *pulzní* – Vyplachování je spojeno s přerušením obrábění na dobu 0,15 s až 10 s a zároveň oddálením elektrody od obrobku na vzdálenost do 10 mm. Tímto postupem se dosáhne dokonalého vypláchnutí vzniklé mezery. Vhodné zejména pro tenké elektrody, hluboké dutiny a obrábění načisto.
- f) *kombinované* – Kombinace odsávání a vnitřního tlakového odsávání. Vhodné zejména pro tvarově složité dutiny. (1, 3)



Obr. 1.10 Přívody dielektrika mezi obrobek a nástroj (3)
 1 - nástrojová elektroda, 2- pracovní vana, 3 - dielektrikum, 4 – obrobek, 5 - přívod dielektrika, 6 - odsávání dielektrika

1.2.6 Nástrojové elektrody

Při elektroerozivním obrábění se celkový úbytek materiálu rozdělí mezi nástroj a obrobek. Vhodnou volbou pracovních parametrů se snažíme zajistit minimální úběr na nástroji oproti maximálnímu úběru obrobku. Na tento jev má vliv především volba materiálu nástroje vzhledem k obráběnému materiálu, velikost pracovního proudu, doba trvání impulzu a polarita zdroje. (1)

Fyzikální vlastnosti materiálu, které výrazně ovlivňují jev elektroeroze, jsou elektrická vodivost, tepelná vodivost a teplota tavení. Čím má materiál vyšší bod tavení, teplotní vodivost, Youngův modul pružnosti a nižší koeficient lineární teplotní roztažnosti, tím je jeho odolnost vůči elektroerozi větší. Vliv teploty tavení je zřejmý z tab. 1.2, kdy při stejných podmínkách výboje bylo dosaženo různých rozměrů kráterů a tedy i objemů V_i (viz obr. 1.6). (1, 2)

Tab. 1.2 Vliv teploty tavení na velikost kráteru (1)

Materiál	T_{TAV} [°K]	ϕd_i [mm]	h [mm]	V_i [mm ³]
W	3650	0,8	0,09	0,021
Cr	2176	0,7	0,11	0,025
Ti	1938	1,0	0,16	0,047
Fe	1812	1,3	0,20	0,133
Co	1786	1,3	0,21	0,133
Ni	1728	1,5	0,22	0,199

Nejpoužívanější materiály spolu se stručnou charakteristikou pro EDM elektrody jsou ukázány v tabulce 1.3.

Tab. 1.3 Materiály elektrod (2, 6)

Materiál	charakteristika
grafit	nejrozšířenější materiál, vysoká teplota tavení (3000°C), snadná obrobitelnost, znečišťuje stroj, vhodný na opracování ocelí
mosaz	poměrně levný, snadno obrobitelný, velké opotřebení materiálu
měď-wolfram stříbro-wolfram	drahý materiál, používá se pro úzké hluboké drážky a jemné operace s nepříznivými podmínkami při vyplachování dielektrikem, vyrábí se slinováním bez dalších dílčích úprav kvůli vysoké křehkosti
wolfram	pro výrobu malých děr (do 0,2 mm)
měď	odolný materiál vůči elektroerozi, vhodný zejména pro obrábění karbidů a dokončovací operace s R_a pod 0,5 μ m

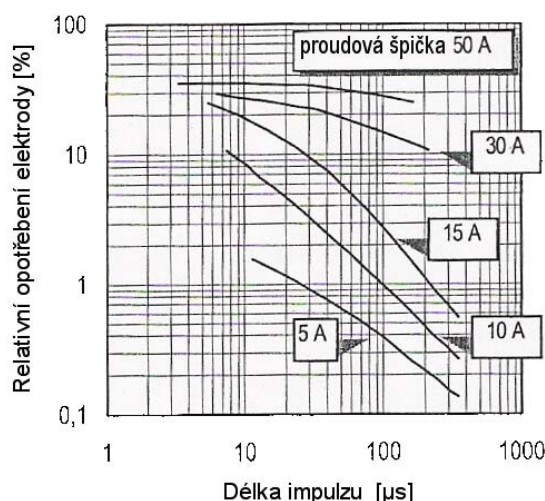
Opotřebení elektrody je jedním z hlavních problémů elektroeroze. Cena elektrody může tvořit až 50% celkových nákladů. Pro snazší porovnávání opotřebení byl zavedený pojem tzv. relativní opotřebení nástrojové elektrody viz. vzorec 1.4, kde V_E je úbytek objemu elektrody a V_m je úbytek objemu obráběného materiálu. (1, 2)

Relativní opotřebení nástrojové elektrody (1)

$$mV = \frac{V_E}{V_m} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

V začátcích EDM strojů dosahovalo opotřebení nástrojové elektrody hodnot 40–60 % z celkového objemu. Dnes se v určitých případech dosahuje hodnot menších než 1 %. Běžně se opotřebení pohybuje do 10 %. Například při obrubování oceli elektrodou z Cu činí opotřebení $mV = 0,5\text{--}3\%$, ale při dokončování je $mV = 2\text{--}10\%$. (1,2)

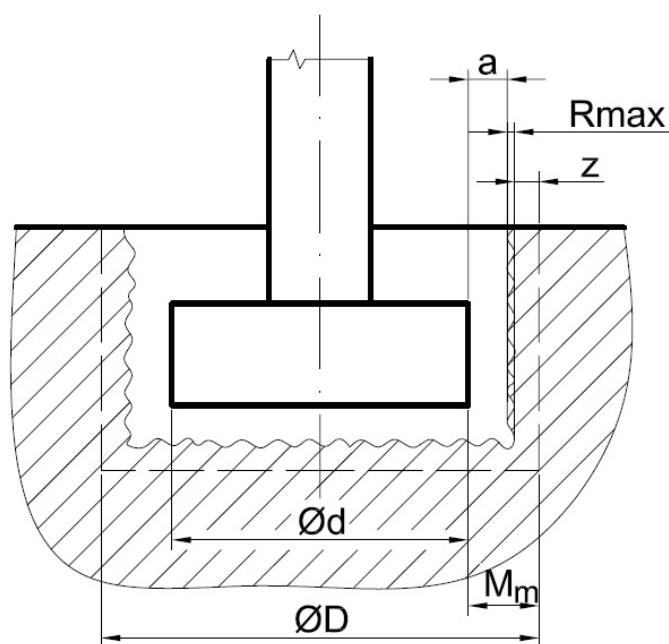
Relativní opotřebení v závislosti na velikosti proudové špičky a délky impulsu je znázorněno na obr. 1.11. Z grafu je patrná závislost, čím vyšší je délka impulsu, tím nižší je opotřebení elektrody.



Obr. 1.11 Závislost časové délky impulsu a velikosti proudové špičky na relativním opotřebení nástroje (2)

1.2.7 Rozměry elektrod

Rozměr elektrody (obr. 1.12) je dle vzorce 1.5 určen D – požadovaným průměrem dutiny, a (neboli **GAP**) nutnou pracovní mezerou, maximální drsností obrobené plochy R_{max} a tloušťkou narušeného povrchu z . M_m je tedy celkový rozměr, o který musí být nástrojová elektroda menší oproti požadovanému $\varnothing D$. (1, 3)



Obr. 1.12 Rozměry hrubovací elektrody (4)

Rozměr hrubovací elektrody (1)

$$d = D - 2 \cdot (a + R_{\max} + z) = D - 2M \quad (1.4)$$

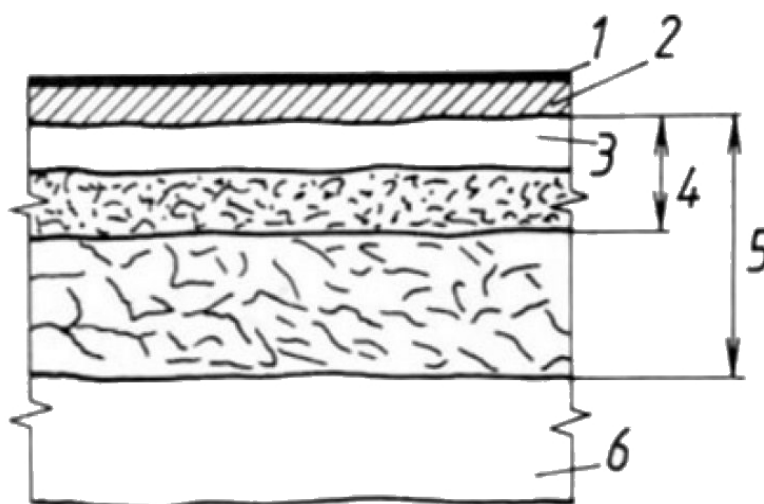
Naproti tomu při určování rozměru dokončovací elektrody již nebereme v potaz z a $R_{\max}$, protože dokončovací operace pracují s výboji o nižší energii impulzů a hodnota $R_{\max}$ bude tedy zanedbatelná oproti **GAP**, jak je vidět na vzorci 1.5 (1)

Rozměr dokončovací elektrody (1)

$$d = D - 2 \cdot a \quad (1.5)$$

1.2.8 Parametry obrobené plochy

Kvalita obrobené plochy je ovlivněna lokálním vlivem vysokých teplot, které způsobují metalurgické změny v povrchu obrobku, jako trhliny na hranicích zrn, štěpení a vznik tzv. bílé vrstvy. Následné ochlazení způsobuje vznik zbytkových napětí.(2)



Obr. 1.13 Změny povrchu při elektroerozi (3)

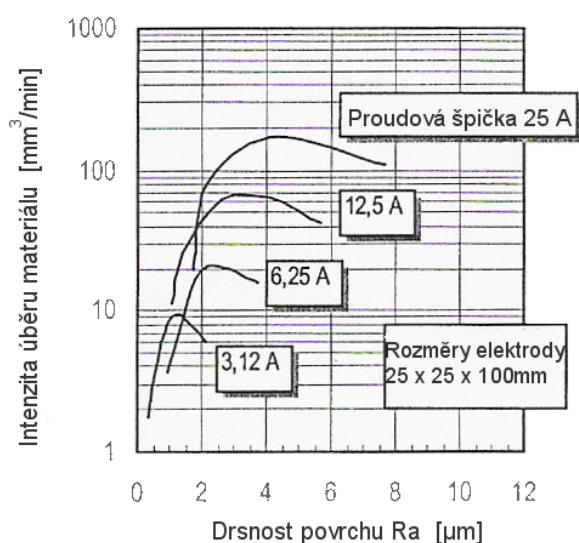
Struktura povrchu s různými vrstvami vytvořenými procesem EDM (1, 3)

- 1- mikrovrstva nasycená difuzí částic dielektrika
- 2- vrstva obsahující materiál nástrojové elektrody
- 3- tzv. bílá vrstva, silně nauhličená, znovu ztuhlá tavenina
- 4- pásmo tepelného ovlivnění (zakalený a popuštěný základní materiál)
- 5- pásmo plastické deformace vyvolané rázy impulzů
- 6- základní materiál obrobku

Povrchy vytvořené elektrojiskrovým obráběním jsou tedy charakteristické tahovým zbytkovým napětím. Tahová napětí snižují mez únavy a usnadňují rozrušování povrchu při vzájemné interakci dvou povrchů. Proto je vhodné po EDM použít k odstranění ovlivněné vrstvy klasické mechanické obrobení povrchu. (2)

Dosahovaná drsnost

Drsnost povrchu má úzkou souvislost s intenzitou úběru materiálu, s druhem a znečištěním dielektrika, způsobem opracování, s parametry elektrického výboje. Čím menší je energie jednotlivých výbojů a tedy velikost vzniklých kráterů, tím lepší je drsnost povrchu. Závislost drsnosti povrchu R_a na velikosti proudové špičky a úběru materiálu je vidět na obr. 1.14. (1, 2)



Obr. 1.14 Závislost drsnosti povrchu R_a na velikosti proudové špičky a úběru materiálu (2)

Rozměry obrobené plochy

Při elektrorozivním obrábění je odchylka rozměru a tvaru oproti požadovaným rozměrům dána vzorcem 1.5 (1)

Odchylka rozměru a tvaru (1)

$$\delta = \delta_{ST} + \delta_T + \delta_{NAST} + \delta_{ER} \quad (1.6)$$

δ_{ST} Chyba způsobená deformacemi a nepřesnostmi mechanismů obráběcího stroje. Tato chyba není výrazná, protože se u EDM jedná o bezsilové obrábění je δ_{ST} přibližně 0,003 mm.

δ_T Odchylka vzniklá oteplením elektrod během obrábění. Nutno uvažovat především u rozměrnějších elektrod v případě, že stroj nemá tepelnou stabilizaci.

δ_{NAST} Chyba vzniklá při výrobě elektrody. Pro broušené nebo elektroerozí obráběné elektrody se uvažuje $\delta_{NAST} = \pm 0,002 \div 0,005$ mm, pro elektrody frézované $\delta_{NAST} = \pm 0,02$ mm.

δ_{ER} Chyba vzniklá podstatou elektroeroze, lze ji kompenzovat vhodným tvarem nástroje nebo vhodnou volbou způsobu obrábění. Tato chyba nepřesahuje řádově hodnoty μm .

1.3 Metody elektroeroze v praxi

Nejčastěji využívané metody elektroeroze v průmyslu jsou:

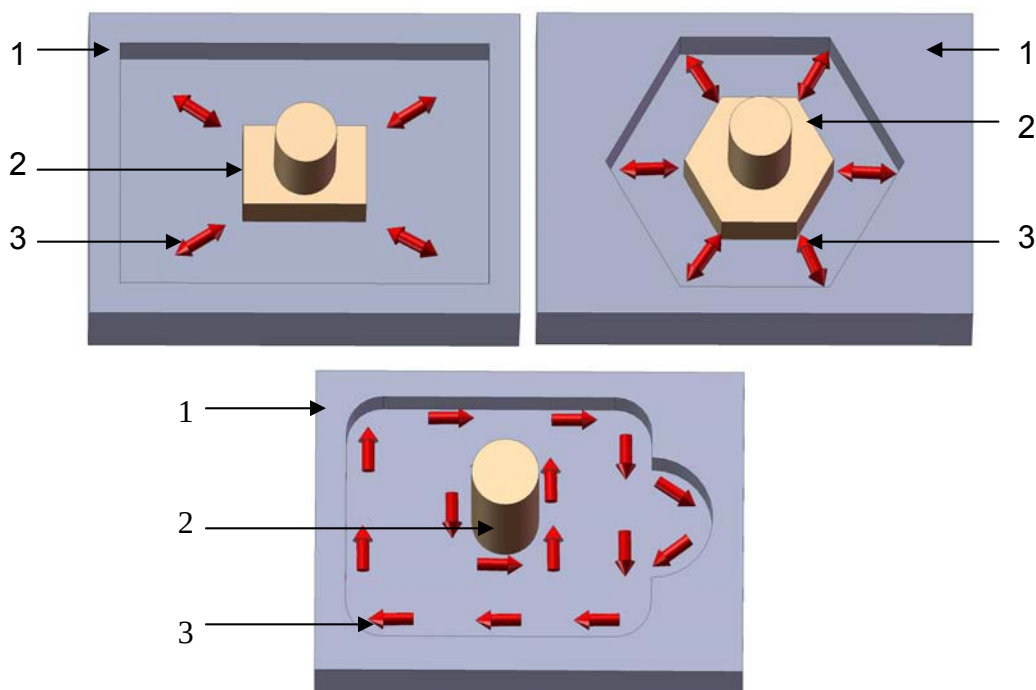
- Elektroerozivní hloubení dutin a otvorů
- Elektroerozivní drátové řezání
- Elektroerozivní mikroděrování

1.3.1 EDM hloubení dutin a tvarových otvorů

Tato metoda se uplatňuje zejména pro výrobu vnitřních tvarově složitých dutin a otvorů, při výrobě forem pro lití, střížných a lisovacích nástrojů, tvářecích zápusťek atd. Nástrojová elektroda se zde automaticky posouvá směrem k obrobku, přičemž vlivem působení výbojů je do obrobku kopírován její tvar. U moderních strojů vybavených CNC řídicím systémem se všechny funkce jako řízení směrů a pohybů, poloha pracovního stolu, parametry generátoru, funkce týkající se dielektrika, kontrola pracovní mezery GAP, kontrola procesu elektroeroze atd. řídí kompletně tímto systémem.

Možnosti EDM hloubení

Složité tvary lze zhotovit i jednoduchou elektrodou pomocí tzv. vychylovače elektrod, který zároveň snižuje spotřebu elektrod, protože se úbytek elektrody může korigovat vychýlením elektrody. Zároveň se dosahuje kvalitnějšího vyplachování a tedy i lepší kvality povrchu. Ukázka použití různých tvarů a pohybů elektrod je znázorněna na obr. 1.15. (1)



Obr. 1.15 Výroba dutin pomocí různých tvarů a pohybů nástrojové elektrody
1 – obrobek, 2 – elektroda, 3 - pohyb elektrody

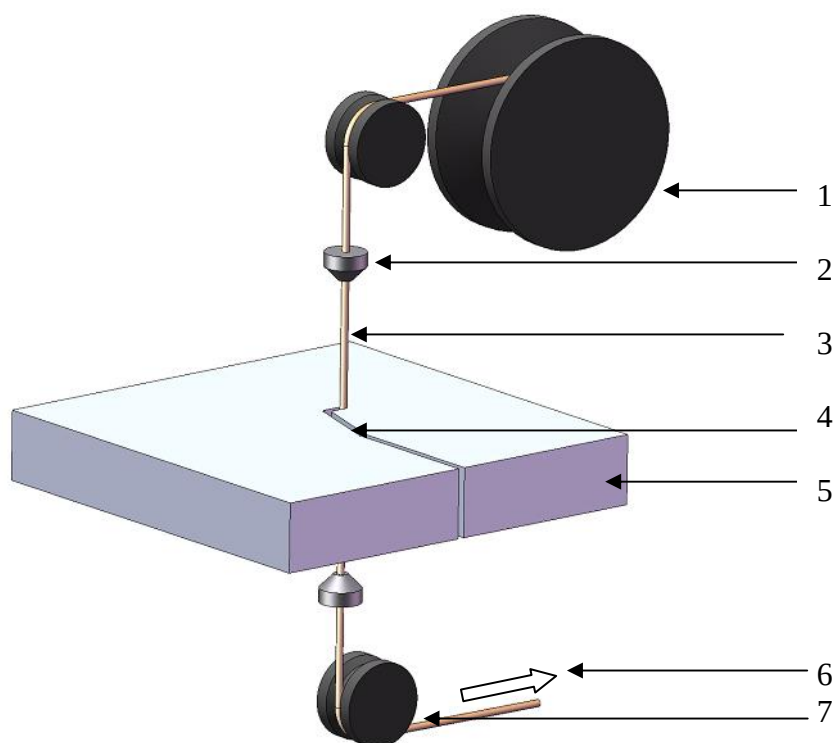
1.3.2 EDM drátové řezání

Tato metoda, která se využívá zejména při výrobě střížných a lisovacích nástrojů, se vyznačuje zejména minimální tloušťkou řezu. Princip metody je vidět na obr. 1.16. Jako elektroda slouží tenký drát 0,03 mm – 0,36 mm, nejčastěji z mědi nebo mosazi. Na jemné řezy se využívá drát z wolframu nebo molybdenu. V poslední době se používají i povlakované dráty, kde je ocelové nebo měděné jádro, a povlak tvoří např. grafit, zinek a v případě ocelového jádra měď. Jádro umožňuje práci vysokými řeznými rychlostmi a silnější napnutí drátu. Naproti tomu povlak zajišťuje stabilní výboj a kvalitu obrobené plochy. (1, 2, 6)

Požadavky na drátovou elektrodu jsou především: (1)

- vysoká elektrická vodivost, protože malým průřezem se přivádí elektrická energie
- přesné tolerance kruhovitosti a průměru, na kterých závisí přesnost řezu
- mechanická pevnost a odolnost proti přetržení (kvalita řezu závisí i na napnutí drátu)

Důležité je neustálé proudění dielektrika do oblasti řezu, kvůli dostatečnému chlazení obráběcí soustavy a vyplavování elektroerozivních splodin z místa řezu. Nedostatečné proudění se projeví přetrhnutím drátu.



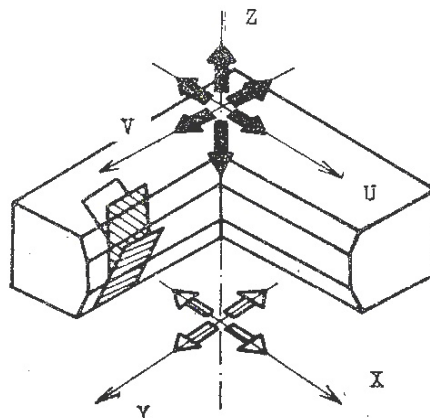
Obr. 1.16 Princip EDM drátového řezání

1 - cívka s drátem, 2 - vedení drátu, 3 – drát, 4 - mezera vzniklá obráběním, 5 – obrobek, 6 - směr pohybu drátu, 7 - napínací kladky

Možnosti EDM drátového řezání

Přesnost obrábění EDM drátovým řezáním se může pohybovat až kolem $3\text{ }\mu\text{m}$. Pro tyto hodnoty je ovšem nutná teplotní stabilizace stroje do $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na některých strojích lze, při použití hrubovacího řezu několika dokončovacích řezů, docílit drsnosti povrchu až $R_a=0,05\text{ }\mu\text{m}$. Pomocí moderních řídicích systémů s až šesti osami, viz obr 1.17, je možné vytvořit i složité tvary. XY je rovina spodního vedení drátové elektrody a UV rovina horního vedení drátové elektrody. Nastavení v ose Z se provádí za klidu stroje podle tloušťky obráběného materiálu. (1)

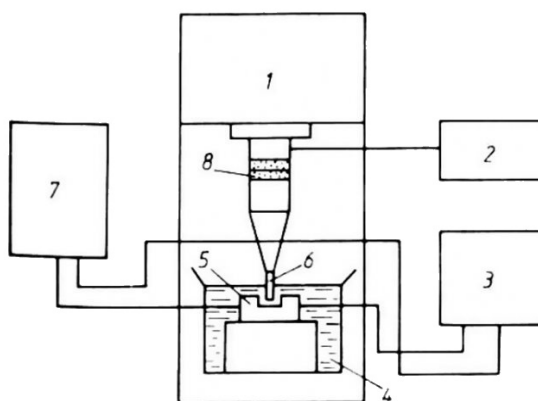
Velikost úhlu nastavení elektrody bývá $0^{\circ} - 45^{\circ}$. S takto konstruovaným strojem je umožněno řezání kónických a úkosových tvarů.



Obr. 1.17 Schéma 5 - ti osého systému s příkladem obrobku (1)

1.3.3 EDM mikroděrování

Tato metoda má své největší uplatnění např. v jemné mechanice při výrobě malých otvorů od průměru $0,02\text{ mm}$ zpravidla do rozměru 3 mm a hloubky až 100 mm . Na větší průměry se již využívají klasické hloubicí stroje. Nástrojové elektrody jsou většinou z wolframového drátu. Nástrojová elektroda koná kmitavý pohyb, aby bylo zajištěno dobré vyplachování. (3)



Obr. 1.18 Schéma stroje pro výrobu mikrootvorů elektroerozivní technologií (3)

- 1 – elektroerozivní stroj, 2 – ultrazvukový generátor, 3 – řídicí systém stroje,
4 – dielektrikum, 5 – obrobek, 6 – nástrojová elektroda, 7 – generátor pulzů,
8 – převodník elektrických kmitů na mechanické

1.3.4 Volitelné příslušenství EDM strojů

Jednotlivé stroje lze vybavit různými technologiemi či přídatnými zařízeními, které usnadňují jejich používání.

Přídavné stříhací zařízení - Stříhá drát přibližně na libovolně dlouhé kusy, což značně minimalizuje velikost odpadu z použitého drátu.

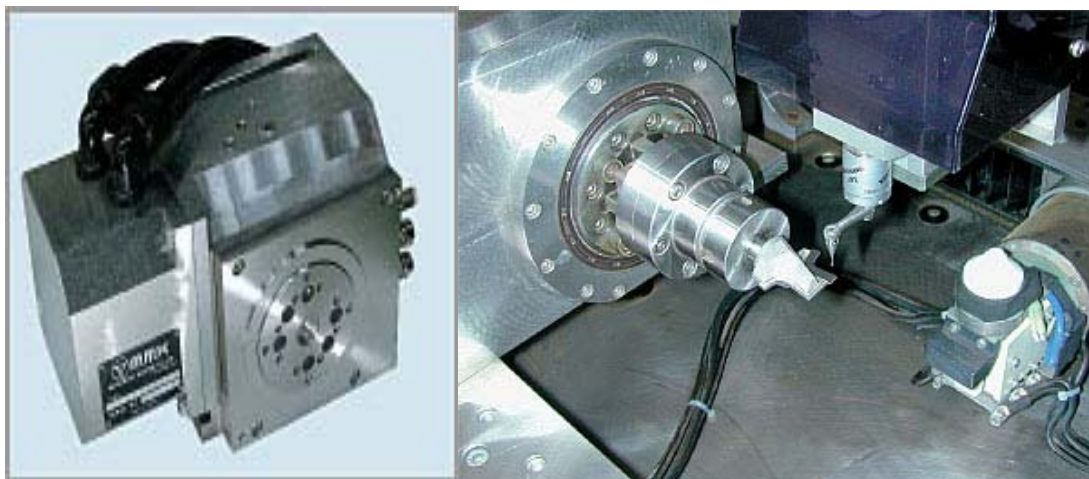
Dotyková sonda - Umožňuje bezproblémové odměřování a kontrolu obrobku.

Přídavná otočná osa - Umísťuje se na pracovní stůl, jak je ukázáno v obr. 1.18, kde je použita u EDM řezání na stroji FANUC současně s použitím bezdotykové sondy. S jejím použitím se dají vyrábět i tvarově složité obrobky bez nutnosti je vícekrát upínat.

Zařízení pro větší cívky - zvláštní odvíjecí zařízení až na 30 kg cívky drátu, což umožňuje delší bezobslužný provoz.

Signální světlo - Upozorňuje vzdálenou obsluhu na jakýkoliv problém nebo dokončení obrábění.

Přístroj pro měření napnutí drátu - Umožňuje snadnou a rychlou kontrolu napnutí drátu.



Obr. 1.19 Přídavná rotační osa (8)

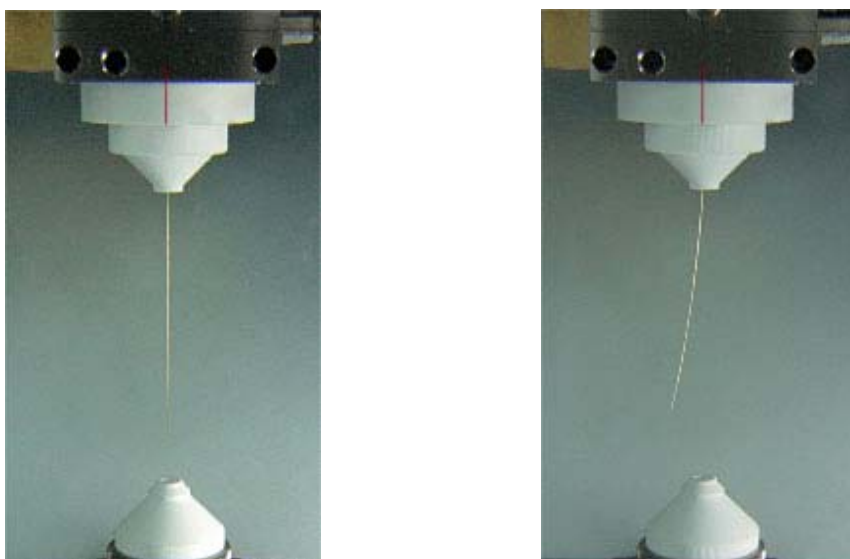
Technologie EDM strojů

AI- řízení

Inteligentní pulzní řízení řezného procesu vypočítá ze všech výbojů počet efektivních výbojů, které skutečně obrábí. Podle nich potom koriguje rychlost obrábění. Například při změně průřezu obrobku je posunová rychlost korigována a nedochází tak k problémům s koncentrací výbojů. (7)

Automatický návlek drátu

Pro snazší automatizaci jsou drátové řezací stroje vybaveny automatickým navlékáním drátu. Stroj automaticky hledá startovací otvor. Pokud zde nemůže drát navléknout, hledá v odpadové části obrobku jinou možnost zavedení drátu, a poté se nejkratší možnou cestou vrací do původního startovacího bodu. V některých případech je návlek drátu např. stroje Fanuc, Agie atd. spojený s žíháním drátu. Žíhání drát vyrovná a utvoří na jeho konci špičku, která usnadní návlek do vodítka. Ukázka žíhaného a nežíhaného drátu je na obr. 1.19. (7,8)



Obr. 1.20 Žíhaný a nežíhaný drát (7)

Teplotní stabilizace

Při obrábění je nutné zamezit vlivu teplotní dilatace, která nepříznivě ovlivňuje přesnost obrábění. Proto jsou stroje vybaveny teplotními čidly, která hlídají teplotu dielektrika i rámu stroje. (8)

Řezání dvěma průměry drátu

Toto technické provedení spočívá v použití dvou různých průměrů drátu na jednom stroji bez nutnosti pracovních výměn cívek. Na jednom stroji jsou umístěny dvě cívky. Na jedné je silnější hrubovací drát, na druhé slabší dokončovací drát. Hrubovací drát zajistí vyšší rychlost a tenký dokončovací drát umožňuje např. minimální velikost rohových rádiusů. Toto řešení zároveň zvyšuje produktivitu. (8)

2 VYUŽITÍ ELEKTROEROZE V PODMÍNKÁCH FIRMY ŽĎAS a.s.

2.1 Představení Žďas a.s.

Společnost Žďas a.s. se již od roku 1951 zaměřuje především na metalurgii a těžké strojírenství. Vyrábí se zde celá řada strojů jako dělicí linky, rovnačky plechů, hydraulické kovací lisy, stroje na zpracování kovového odpadu atd. Z produkce metalurgie se jedná především o odlitky, volně kované výkovky, ingoty a slévárenské modely.

Jako vedlejší výrobní program se zde vyrábí celá řada nástrojů pro přední evropské výrobce automobilového průmyslu. Hala nástrojárny je vybavena jak klasickými konvenčními stroji, tak moderními EDM stroji.

V divizi nástrojárny byla, z důvodu spolupráce s automobilovým průmyslem, společností Žďas a.s. zakázána veškerá fotodokumentace.

Historie:

- 1951 Odlitím tradičního zvonu byl zahájen provoz v největším podniku Českomoravské vrchoviny, dnešním Žďas a.s.
- 1956 Dokončen vývoj a zahájena výroba mechanických lisů vlastní konstrukce.
- 1992 Privatizace podniku a vznik akciové společnosti Žďas a.s.
- 2002 Do Žďas a.s. vstupuje majoritní vlastník, slovenská firma Železiarne Podbrezová a.s. (9)

2.2 Elektroeroze v podmínkách Žďas a.s.

2.2.1 Historie EDM v podmínkách Žďas a.s.

Historie EDM technologie ve Žďas a.s.:

- 1985 Zavedení elektroerozivní technologie pořízením EDM drátového řezacího stroje *Makino EC 7050*.
- 1995 Pořízení EDM drátový řezací stroj *Hitachi 6Q/AWP*.
- 1999 Pořízení EDM hloubicího stroje *Roboform 50*.
- 2006 EDM stroj *Makino* nahrazen strojem *Fanuc α-1ic*.

2.2.2 EDM stroje

V současné době je elektroeroze v podniku Žďas a.s. zastoupena dvěma EDM drátovými řezacími stroji *Hitachi 6Q/AWP* a *Fanuc α-1ic*. A dále jedním hloubicím strojem Agie *Roboform 50*. Tyto stroje jsou umístěny v místnosti

na hale nástrojárny společně s několika konvenčními stroji. EDM hloubení je v současnosti ovšem provozováno již pouze výjimečně, a proto je v dalších kapitolách věnována pozornost především EDM drátovému řezání.

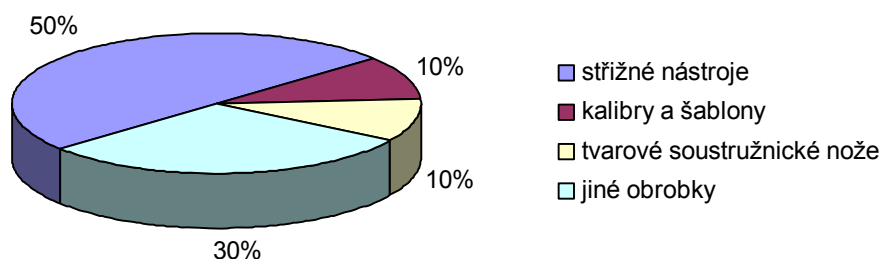
Provoz na EDM drátových řezacích strojích zajišťuje vždy jeden pracovník, který obsluhuje oba dva stroje. V třísměnném provozu se střídají tři vyškolení pracovníci. EDM hloubicí stroj je v případě potřeby obsluhován pracovníkem horizontální frézky.

Tab. 2.1 Parametry EDM strojů

Technická data	Fanuc α -1ic	Hitachi 6Q/AWP
Pojezdy os X/Y [mm]	520x370	1000x600
Pojezdy U/V-os [mm]	± 60	± 48
Pojezd Z-osy [mm]	310	550
Max. úhel řezu [°]	30	20
Max. velikost obrobku [mm]	820 x 730 x 300	1450 x 750 x 500
Max. řezná plocha [mm]	550x370	1000 x 600
Max. hmotnost obrobku [kg]	1000	1000
Průměry řezacího drátu [mm]	0,1-0,3	0,1-0,3
Objem nádrže [l]	910	využívá pouze výplach
Rozměry stroje včetně příslušenství (stroj, vana na odpadový drát, filtrační zařízení, zařízení pro úpravu vody)	3500 x 2700 x 2350	3100 x 3500 x 3000

2.2.3 Obrobky

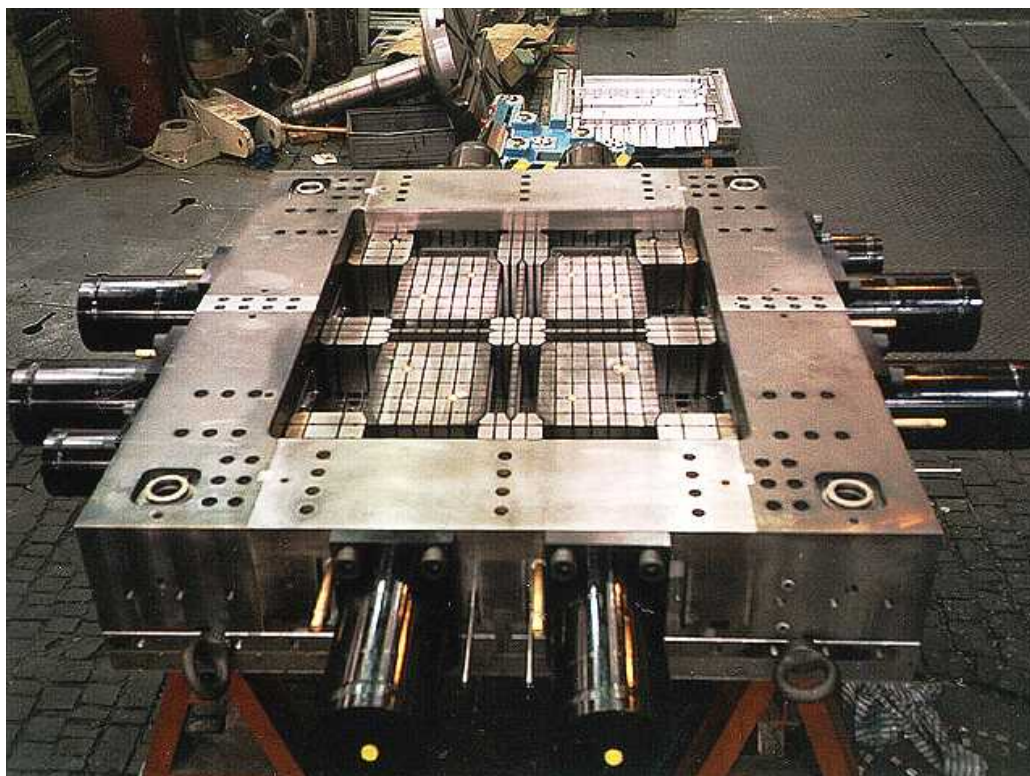
Spektrum výrobků, které se ve firmě Žďas a.s. vyrábí pomocí technologie elektroeroze, je velice široké. Jedná se zde o kusovou výrobu, kde se výjimečně vyskytuje několik stejných obrobků. Přibližné rozdělení obrobků za rok 2007 je ukázáno na grafu 2.1. Na počet výrobků mají střižníky malé procentuální zastoupení z celkového počtu výrobků, ale v celkovém čase provozu zabírají velký podíl. Tento jev je způsoben složitostí těchto nástrojů, které se skládají z několika různých součástí. Výroba jednoho nástroje potom může trvat až 1,5 měsíce provozu obou drátových řezacích strojů.



Obr. 2.1 Přibližné rozdělení obrobků dle času výroby

U EDM drátového řezání, které Žďas a.s. nabízí i jako kooperaci pro jiné firmy, se projevuje výhoda možnosti řezání rozměrných obrobků na stroji *Hitachi 6Q/AWP*. Na území ČR se vyskytují pouze dva tyto stroje, které patří mezi největší stroje v České republice pro EDM drátové řezání jak z hlediska velikosti obrobku, tak výšky řezu.

Na obr. 2.2 je ukázka lisovacího nástroje na umělohmotné palety vyrobeného pro zahraniční firmu. Základní rám nástroje byl frézován, drážky vyrobeny na EDM stroji *Hitachi 6Q/AWP*



Obr. 2.2 Lisovací nástroj (10)

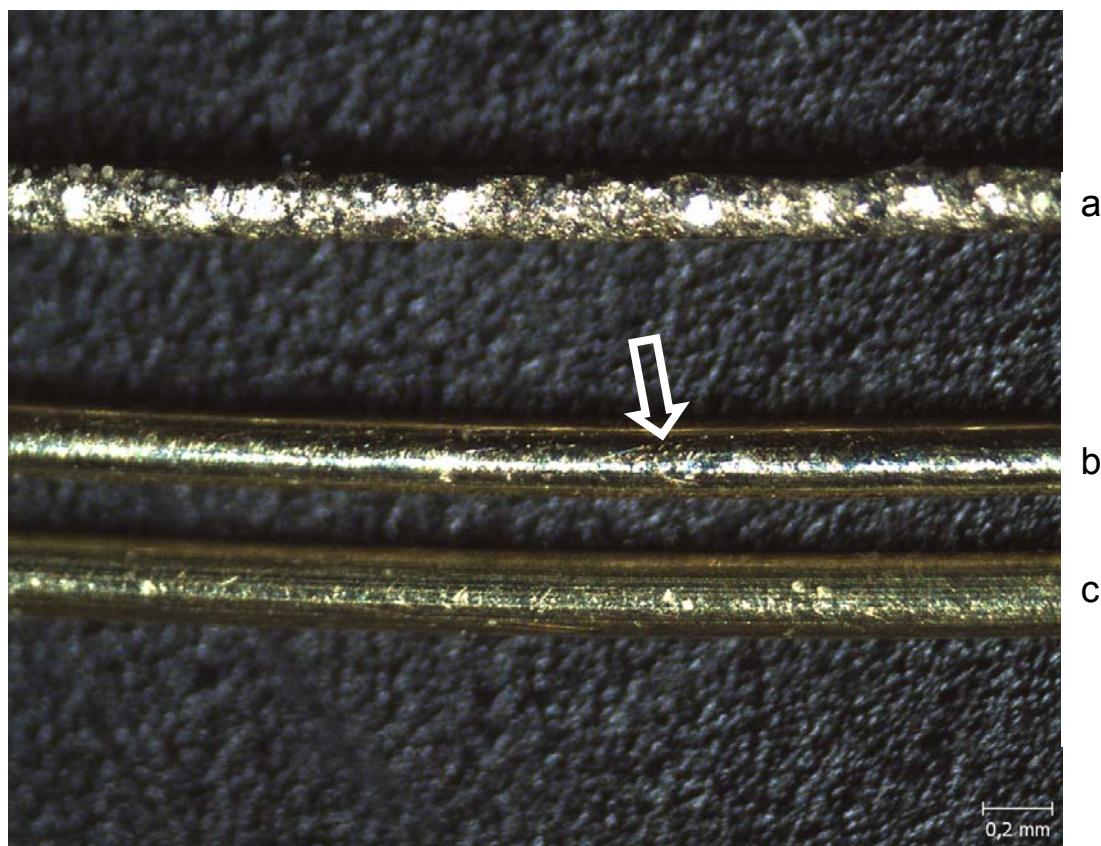
2.2.4 Používané dráty

Používají se pouze dva druhy drátu dodávané firmou PENTA TRADING s.r.o. Jedná se o mosazné dráty *PENTA CUT* a *SCUMED* průměru 0,25 mm.

PENTA CUT – Tento drát s pevností v tahu 1000 N/mm^2 je využíván na klasické řezy.

SCUMED – Drát s pevností v tahu $500\text{-}560 \text{ N/mm}^2$ se používá pouze na úhlové řezy, kde úhel řezání přesahuje 10° .

Dráty jsou navinuty v případě stroje Hitachi 6Q/AWP na 15 kg cívkách a u stroje *Fanuc α-1ic* na cívce o váze 7kg.



Obr. 2.3 Ukázka opotřebení drátu

a – hrubovací drát, b – dokončovací drát, c – nepoužitý drát

Snímky opotřebení drátu byly zhotovené 4,5 násobným zvětšením pomocí stereolupy OLYMPUS SZ61. Na hrubovacím drátku je poškození vlivem elektroerozivního obrábění viditelné pouhým okem. U dokončovacího drátku není opotřebení tak markantní (pouze malá místní poškození viz šipka) a vlivem elektroerozivního obrábění stopy po tažení, které jsou na novém nepoužitém drátu viditelné.

2.2.5 Používané dielektrikum

Jako dielektrikum pro EDM drátové řezání slouží destilovaná voda, pro EDM hloubení petrolej. Voda se upravuje pomocí deionizační pryskyřice s přídavkem aktivního uhlí viz. obr. 2.4. Pro filtraci se využívají tři papírové filtry speciálně určené pro daný stroj. Výměna filtrů je nutná přibližně po měsíci provozu. Pokud dojde k nedostatečné kvalitě filtrace, stroj na nutnou výměnu automaticky upozorní.

2.2.6 Řídící program

Program VISI-CAM WIRE je určen speciálně pro řízení drátové elektroeroze. Je plně kompatibilní s např. s programem AutoCad, což napomáhá k usnadnění zadávání parametrů obrobku do drátového stroje. Obráběný tvar lze definovat buď pomocí jednoho profilu a úhlu, prostorové přímkové plochy, nebo dvou profilů v různých výškách.

3 POROVNÁNÍ VŮDČÍCH SVĚTOVÝCH VÝROBCŮ EDM STROJŮ

Výrobci EDM strojů byli zvoleni dle:

GF AgieCharmilles: přední výrobce v Evropě, nejpoužívanější hloubicí stroje v České republice.

Fanuc: Jedny z nejpoužívanějších drátových řezacích strojů v České republice.

Sodick: Přední výrobce na Japonském trhu.

ONA: EDM stroje zajímavé především svojí velikostí.

Mitshubishi: Celosvětově velice využívané stroje. Velké zastoupení především v USA.

3.1 GF AgieCharmilles

Tato švýcarská firma je jedním z největších výrobců EDM strojů na světě. V současné době má přes 3000 zaměstnanců a více než 50 poboček po celém světě včetně České republiky. Jako první v roce 1976 použila vychylovače elektrod. Také jako první uvedla technologii elektroerozivního drátového řezání. (11)

Historie: (11)

1886 Založení firmy Charmilles.

1954 Představení prvního EDM hloubicího stroje.

1969 První stroj na drátové elektroerozivní řezání s NC řízení.

1983 Spojení společnosti se společností Georg Fischer.

1996 Spojení s firmou Agie, vznik obchodní značky Agie Charmilles Group.

1999 Firma uvádí na trh novou značku Actspark.

2000 Získání společnosti Mikron, specialisty na vysokorychlostní obrábění.

2001 Spojení se společností Systém 3R, vedoucím dodavatelem upínacích přípravků pro EDM

2007 Zavedení obchodní značky GF AgieCharmilles.

Současná nabídka:

Firma GF AgieCharmilles má nejrozsáhlejší sortiment strojů pro EDM ze všech výrobců. Je zde vidět úzká specifikace jednotlivých druhů strojů. Dnes nabízí 17 druhů hloubicích strojů, 21 drátových řezacích strojů a jeden stroj na elektroerozivní mikroděrování. (12, 13, 14)

Stroje AGIE rozdělila do skupin podle využití: (12, 13, 14)

- | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| • EDM mikroděrování | 1 stroj |
| • mikroobrábění | 2 hloubicí a 3 drátové stroje |
| • vysokorychlostní obrábění | 6 hloubicích a 7 drátových strojů |
| • stroje pro obecné podmínky | 4 hloubicí a 4 drátové stroje |
| • jednodušší levnější stroje | 4 hloubicí a 1 drátový stroj |
| • stroje pro nejvyšší přesnosti | 7 drátových strojů |

Tab. 3.1 Vybrané stroje AgieCharmilles pro EDM drátové řezání (12-16)

Model stroje	AC Vertex F	AC Challenge V2	AC Classic V3	AC Progress V4
Pojezdy os X/Y [mm]	220 x 160	350 x 250	500 x 350	800 x 550
Pojezdy U/V-os [mm]	40 x 40	70 x 70	70 x 70	800 x 550
Pojezd Z-osy [mm]	100	256	426	525
Max. úhel řezu	±3° / 80 mm	± 30° / 100 mm	± 30° / 100	± 30° / 510
Max. velikost obrobku [mm]	300 x 200 x 80	750 x 550 x 250	1050 x 650 x 420	1300 x 1000 x 510
Max. hmotnost obrobku [kg]	35	200 / 450*	400/800*	3000
Max. rychlost obrábění [mm ² /min]	110 <i>pro drát 0,2 mm</i>	300 <i>pro drát 0,33 mm</i>	300 <i>pro drát 0,33 mm</i>	500 <i>pro drát 0,33 mm</i>
Průměry řezacího drátu [mm]	0,02 – 0,2	0,15 – 0,33	0,15 – 0,33	0,15 – 0,33
Dosažitelná drsnost Ra [μm]	0,05	0,1	0,2	0,2
Objem nádrže [l]	420	700	1000	1600
Rozměry stroje [mm]	1400 x 1900 x 1970	2215 x 2215 x 2220	1940 x 2300 x 2600	2900 x 3050 x 2850
Váha stroje [kg]	2700	3600	3460	6000

* ponořeno v dielektriku/ výplach

Tab. 3.2 Vybrané stroje AgieCharmilles pro EDM hloubení (17)

Model stroje	FO 350 MicroTEC	AT HyperSpark 2 HS	FO 35P	AT Spirit 4
Pojezdy os X/Y [mm]	350 x 250	350 x 250	350 x 250	700x500
Pojezd Z-osy [mm]	300	350	300	400
Velikost stolu [mm]	500 x 400	600 x 450	500 x 400	870 x 550
Rozměry pracovní vany [mm]	800 x 550 x 370	860 x 620 x 360	800 x 550 x 370	1100 x 750 x 370
Max. hmotnost elektrody [kg]	50	100	50	113
Max. rozměr obrobku [mm]	780 x 530 x 300	650 x 580 x 250	780 x 530 x 300	1100x750x 370
Max. hmotnost obrobku [kg]	500	400	500	2000
Dosažitelná drsnost Ra [μm]	0,1	0,1	0,1	0,2
Objem nádrže [l]	410	415	450	840
Rozměry stroje [mm]	1900 x 1690 x 2550	2689 x 1855 x 2593	1900 x 1690 x 2400	3000 x 3000 x 2865
Váha stroje [kg]	2600	3200	2800	4000

Tab. 3.3 Stroj AgieCharmilles pro EDM mikroděrování (18)

Model stroje	DRILL 11
Pojezdy os X/Y [mm]	300 x 200
Pojezd Z-osy [mm]	300
Velikost stolu [mm]	400 x 300
Průměr elektrody [mm]	0,3 – 3
Max. hmotnost obrobku [kg]	300
Objem nádrže [l]	20
Rozměry stroje [mm]	1340 x 900 x 1940
Váha stroje [kg]	1200

3.2 Fanuc

Přední japonská společnost v oboru EDM drátového řezání. Od svého založení výraznou mírou pomáhá k rozvoji automatizace a robotizace. Stroje pro EDM představují poměrně malou část celkové produkce. Zaměstnává téměř 5000 zaměstnanců. (19)

V České republice společnost Fanuc zastupuje firma *Penta Trading, spol. s r.o.*

Historie: (19)

1956 Založení firmy Fanuc.

1975 První stroj na drátové elektroerozivní drátové řezání.

2004 Založení FANUC Robotics Czech s.r.o.

Současná nabídka:

Fanuc nabízí pouze drátové řezací stroje ve čtyřech variantách. Na svých strojích u série Dp aplikují lineární motory a to na osách X, Y, U, V. (7)



Obr. 3.3 Stroj Fanuc 1iD (7)

Tab. 3.4 Stroje Fanuc (7)

Model stroje	0iD	0iDp	1iD	1iDp
Pojezdy os X/Y [mm]	370 x 270	370 x 270	600 x 400	600 x 400
Pojezdy U/V-os [mm]	± 60	± 60	± 100	± 100
Pojezd Z-osy [mm]	255	255	310 410 *	310 410 *
Max. úhel řezu	±30° / 80 mm ±45° / 40 mm	±30° / 80 mm ±45° / 40 mm	±30° / 80 mm ±45° / 40 mm	±30° / 80 mm ±45° / 40 mm
Max. velikost obrobku [mm]	700 x 600 x 250	700 x 600 x 250	1050 x 820 x 300 (400)*	1050 x 820 x 300 (400)*
Max. hmotnost obrobku[kg]				
- s koaxiálním výplachem	500	500	1000	1000
- pod hladinou	400	400	800	800
Průměry řezacího drátu [mm]	0,10 - 0,30	0,10 - 0,30 0,05 - 0,30	0,10 - 0,30	0,10 - 0,30
Dosažitelná drsnost Ra [μm]	až 0,1			
Rychlost řezu s drátem 0,3mm	330 mm ² /min			
Hmotnost stroje [kg]	1800	2500	3000	3500
Objem nádrže [l]	390	390	530 (910)*	530 (910)*
Cena stroje [EUR]	143 000	181 000	159 000	192 000

* možnost volby větší výšky řezu

3.3 Sodick

Tato japonská firma mající přes 3200 zaměstnanců vyrábí především stroje pro EDM. Její tři výrobní závody v Japonsku, Číně a Thajsku doplňuje dalších 33 poboček po celém světě. Autoři využívají u EDM obráběcích strojů lineárních motorů. (20)

Historie: (20)

1976 Založení firmy a výroba prvního hloubicího stroje.

1981 Započata výroba strojů na drátové řezání.

1998 První světové použití lineárního motoru u obráběcího stroje.

2006 První hybridní stroj využívající vodní paprsek a elektroerozi.

Současná nabídka:

Všechny stroje Sodick, kromě EDM mikroděrovacích strojů, jsou vybavené lineárními motory. Patří mezi špičku v kategorii EDM strojů. Pro odměřování používají skleněná pravítka, která umožňují odečítat polohu jednotlivých os. Skleněné stupnice jsou přesnější než odečítání v krokových servomotorech. U Sodicku je jejich použití nutností díky využívání lineárních

motorů, které nemají žádné mechanické vnitřní části. Skleněná pravítka jsou ovšem velmi náchylná na čistotu prostředí. (21)

V České republice společnost Fanuc zastupuje firma *Zenit, spol. s r.o.*
Současná nabídka: (22, 24, 26)

Sodick nabízí 3 stroje pro EDM mikroděrování, 9 drátových řezacích strojů, 8 hloubicích strojů a jeden hybridní stroj kombinující elektroerozi a vodní paprsek - obr. 3.3.

Tab. 3.5 Vybrané stroje Sodick pro EDM drátové řezání (22, 23)

Model stroje	AP200L*	AQ327L Premium	AQ537L Premium	AQ750L
Pojezdy os X/Y [mm]	250x150	370x270	570x370	750x500
Pojezdy U/V-os [mm]	35x35	120x120	120x120	770 x 520
Pojezd Z-osy [mm]	120	250	350	400
Max. úhel řezu	±7°/100 mm	±25°/100 mm	±25°/100 mm	±30°/150 mm
Max. velikost obrobku [mm]	300 x 270 x 100	570 x 420 x 240**	770 x 520 x 340**	1050 x 750 x 500
Max. hmotnost obrobku [kg]	50	500**	1000**	3000
Průměry řezacího drátu [mm]	0,05 – 0,2	0,15 – 0,3 (0,1 – 0,3)***	0,15 – 0,33 (0,1 – 0,33)***	0,15 – 0,3mm
Dosažitelná drsnost Ra [μm]	až 0,04	až 0,1	až 0,1	až 0,25
Objem nádrže [l]	420	600	800	870
Rozměry stroje [mm]	1915 x 2305 x 2065	2125 x 2200 x 2210	2450 x 2570 x 2390	2050 x 2650 x 2295
Váha stroje [kg]	2900	3400	4500	6000

* model pro olejové dielektrikum

**model pro řezání s proudem dielektrika

***možnost volby průměru drátu

Tab. 3.6 Vybrané stroje Sodick pro EDM hloubení (24, 25)

Model stroje	AD3L	AQ35L	AQ55L	AQ75L
Pojezdy os X/Y [mm]	300 x 250	350 x 250	550 x 450	700 x 500
Pojezd Z-osy [mm]	250	250	350	350
Velikost stolu [mm]	600 x 400	600 x 400	750 x 550	900 x 750
Rozměry pracovní vany [mm]	925 x 555 x 300	750 x 550 x 320	950 x 725 x 410	1100 x 950 x 500
Max. hmotnost elektrody [kg]	50	50	50	100
Max. hmotnost obrobku [kg]	550	550	1000	2000
Objem nádrže [l]	400	330	575	755
Rozměry stroje [mm]	1870 x 1955 x 2315	1535 x 2210 x 2395	1735 x 2570 x 2720	2270 x 3000 x 2900
Váha stroje [kg]	3200	4050	6000	11000

Tab. 3.7 Stroje Sodick pro EDM mikroděrování (26, 27)

Model stroje	K1C	K3HN	K1BL
Pojezdy os X/Y [mm]	200 x 300	300 x 400	120 x 150
Pojezd Z-osy [mm]	300	300	300
Velikost stolu [mm]	250 x 350	400 x 450	200 x 250
Průměr elektrody [mm]	0,25 – 3,0	0,25 – 3,0	0,08 – 0,25
Max. hmotnost obrobku [kg]	100	200	50
Objem nádrže [l]	400	330	575
Rozměry stroje [mm]	810 x 870 x 2005	1425 x 1120 x 2080	1600 x 1530 x 2305
Váha stroje [kg]	550	850	990



Obr. 3.3 Stroj Sodick AQ 537 L (22)

3.4 Shrnutí vůdčích výrobců EDM strojů

Agie nabízí široké spektrum EDM strojů. Její výrobní sortiment je nejrozsáhlejší ze všech výrobců. Zajímavou částí její výroby je stroj pojmenovaný Vertex, který má revoluční systém obrábění dvěma průměry drátu. Agie také využívá povlakovaného drátu, který má výrazné výhody. Umožňuje díky tvrdému jádru rychlejší řezy, větší napětí drátu (menší soudkovitost řezu) a díky různým povlakům i lepší povrchy a nebo lepší obrobiteľnosť málo vodivých materiálů. Nevýhoda tohoto drátu je v ceně a nepoužitelnosti na všech strojích.

Stroje Sodick nabízí stroje vysoké kvality. Sodick na svých strojích ve velké míře využívá lineární motory. Do budoucna je zajímavé použití stroje Hybrid Wire, který značně ulehčuje pracnost výroby spojením výhod vodního paprsku a EDM obrábění. Přesnost obrábění je zde ovšem snížena technologickými možnostmi vodního paprsku, které nedosahují kvalit elektroerozivní technologie.

I přes poměrně úzkou nabídku strojů jsou EDM drátové řezací stroje Fanuc velice rozšířené. Jedná se o universální stroje podobného typu, které se od sebe odlišují hlavně parametry obrobku a použitím lineárních motorů u série Dp. V určitých případech může být velkou výhodou při výběru stroje možnost řezat pod úhlem až 45°, což ostatní firmy nenabízejí. Z referencí z praxe jsou stroje Fanuc velice dobře mechanicky i technologicky provedené, málo poruchové a nenáročné na údržbu.

V České republice mají všechny tři firmy obchodní zastoupení a tedy i servisní podporu.

4 ÚROVEŇ OSTATNÍCH VÝROBCŮ EDM STROJŮ

4.1 ONA

Tato španělská firma vyrábí pouze zařízení zaměřené na EDM.

Historie: (29)

1952 Založení společnosti ve španělském městě Durango.

1977 Výroba prvního stroje na EDM drátové řezání.

1999 Výroba světově největšího EDM drátového řezacího stroje *ARION K 1000*

Současná nabídka:

ONA nabízí 8 hloubicích strojů a 10 drátových řezacích strojů. (30)

Tab. 4.1 Vybrané stroje Ona pro EDM drátové řezání (30)

Model stroje	AF 25	AE 300	AX 6	AX 10
Pojezdy os X/Y [mm]	400x300	400x300	800x600	1500x1000
Pojezdy U/V-os [mm]	120 x 120	80x80	500x500	500x500
Pojezd Z-osy [mm]	250	250	500	600
Max. úhel řezu	±30°/87 mm	±30°/50mm ±8,5°/250 mm	±30°/400 mm ±25°/500 mm	±30°/400 mm ±25°/600 mm
Max. velikost obrobku [mm]	700 x 650 x 250	800 x 700 x 250	1300 x 1040 x 500	1950 x 1600 x 600
Max. hmotnost obrobku [kg]	700	1000	5000	10000
Průměry řezacího drátu [mm]	0,10 – 0,33	0,1 – 0,3	0,2 – 0,36	0,2 – 0,36
Objem nádrže [l]	700	740	1610	3500
Plocha pro stroj [mm]	2320 x 2550 x 2230	3490 x 2650 x 2250	3625 x 3345 x 2920	5490 x 4660 x 3100
Váha stroje [kg]	3000	3000	7500	20000

Stroje ONA série AX mohou dosahovat rychlosti řezu až 500 mm²/min s průměrem drátu 0,36mm.



Obr. 4.1 EDM drátový stroj ARION K 1000 a AX 10 (29, 30)

Tab. 4.2 Vybrané stroje ONA pro EDM hloubení (30)

Model stroje	DB300	NX4	NX7	NX10
Pojezdy os X/Y [mm]	400x300	600x400	1500x750	3000x1500
Pojezd Z-osy [mm]	300	400	650	1000
Velikost stolu [mm]	650x400	800x600	1700x1000	3200x1600
Rozměry pracovní vany [mm]	1000x630x350	1200x800x450	2300x1300x700	4000x2000x1000
Max. hmotnost elektrody [kg]	100	200	400	200
Max. hmotnost obrobku [kg]	750	1500	10000	15000
Objem nádrže [l]	625	1260	3400	17500
Plocha pro stroj [mm]	2990 x 1800 x 2498	2575 x 2480 x 2710	3860 x 4525 x 3380	6220 x 5960 x 4320
Váha stroje [kg]	2400	4900	9000	23000

4.2 Mitsubishi

Celosvětová společnost Mitsubishi zaměstnává v 80 zemích světa přibližně 54000 zaměstnanců. Její výrobní program expanduje do různých odvětví jako např. automobilový, chemický, textilní nebo potravinářský průmysl. Výroba strojů pro EDM představuje pouze malou část celkové produkce. (31)

Historie: (31)

1870 Yataro Iwasaki založil v Japonsku společnost Mitsubishi.

1978 Vyroben první EDM drátový řezací stroj.

1983 Byl vyvinut první EDM hloubicí stroj.

Současná nabídka:

Mitsubishi nabízí 10 hloubicích strojů a 11 drátových řezacích strojů a dva stroje na elektroerozivní mikroděrování. (32, 33)



Obr. 4.2 EDM hloubicí stroj Mitsubishi Gantry 2000 (32)

Tab. 4.3 Vybrané stroje Mitsubishi pro EDM drátové řezání (32)

Model stroje	MD+PRO II	FA-10S ADVANCE	FA-20PS ADVANCE	FA 50V
Pojezdy os X/Y [mm]	320 x 250	350 x 250	500 x 350	1300 x 1000
Pojezdy U/V-os [mm]	32 x 32	32x32	75 x 75	75 x 75
Pojezd Z-osy [mm]	220	220	300	400
Max. úhel řezu	±15°/100 mm	±15°/100 mm	±15°/265 mm	±15°/265 mm
Velikost stolu [mm]	540 x 430	590 x 510	780 x 630	1650 x 1380
Max. velikost obrobku [mm]	700 x 550 x 215	800 x 600 x 215	1050 x 800 x 295	2000 x 1600 x 400
Max. hmotnost obrobku [kg]	500	500	1500	4000
Průměry řezacího drátu [mm]	0,1 – 0,3	0,1 – 0,3	0,05– 0,3	0,2 – 0,36
Objem nádrže [l]	350	440	740	3200
Rozměry stroje [mm]	1975 x 1667 x 2037	1975 x 1667 x 2030	2580 x 2770 x 2150	5375 x 5045 x 2823
Váha stroje [kg]	2313	2580	4135	10240

Tab. 4.4 Vybrané stroje Mitsubishi pro EDM hloubení (33)

Model stroje	EA 8	Gantry 500	EA28V	Gantry 2000
Pojezdy os X/Y [mm]	300 x 250	525 x 400	650 x 450	1550 x 2750
Pojezd Z-osy [mm]	250	450	350	1000
Velikost stolu [mm]	500 x 350	730 x 630	850 x 600	1870 x 3080
Rozměry pracovní vany [mm]	770 x 500 x 250	750 x 650 x 420	1100 x 810 x 450	2020 x 3220 x 1350
Max. hmotnost elektrody [kg]	25	100	200	1500
Max. rozměry obrobku [mm]	740 x 470 x 150	750 x 650 x 400	1050 x 760 x 350	2020 x 3220 x 1250
Max. hmotnost obrobku [kg]	550	1000	2000	30000
Objem nádrže [l]	196	400	590	13000
Rozměry stroje [mm]	1625 x 1717 x 2000	2050 x 2250 x 2653	2195 x 2512 x 2615	3450 x 6800 x 5250
Váha stroje [kg]	2000	4600	5400	42000

4.3 Shrnutí ostatních výrobců EDM strojů

Firma ONA je zaměřená na výrobu EDM strojů pro velké obrobky. Její stroj AX 10 (obr. 4.1) je v současnosti vůbec největší drátový řezací stroj na trhu s možností řezu až 600 mm a váhou obrobku až 10000 kg. Nabízí také dostatečně velké úhly řezu i pro silné řezy. Nevýhodou může být nutnost práce se silnějšími dráty. Rovněž hloubicí stroj NX 10 je konstruován

pro obrobky s vahou až 15000 kg a tomto směru se řadí mezi největší hloubicí stroje na trhu.

EDM stroje Mitshubishi jsou rozšířeny převážně v USA. V České republice mají jen velmi malé zastoupení. Model Gantry 2000 je vůbec největší hloubicím strojem a maximální možnou hmotností obrobku až 30 000 kg značně převyšuje konkurenci.

Mezi další výrobce EDM strojů, kterým se nelze v rozsahu této práce věnovat, patří italská CDM Rovella, německá firma Exeron, taiwanský Chmer, japonské Makino, americká OPS INGERSOLL a další.

V České republice je jediný výrobce EDM strojů a to *Penta Trading, spol. s r.o.*, která má v nabídce sedm elektroerozivních hloubicích strojů. (7)

5 TRENDY VÝVOJE ELEKTROEROZIVNÍ TECHNOLOGIE

5.1 Trendy vývoje elektroeroze

Budoucnost rozvoje nejen EDM obráběcích strojů je ve schopnosti využití lineárních motorů. Tyto motory mají řadu výhod oproti např. kuličkovému šroubu. Nevyžadují tak častou údržbu, umožňují vyšší rychlost a zrychlení, mají téměř nulové opotřebení a dosahují vyšších přesností. (21)

U druhů strojů je pravděpodobné, že se budou specializovat jednotlivé typy, jak je patrné ze strategie firmy AGIE. Zvýší se sice náklady z důvodů nutnosti pořízení více strojů, ovšem produktivita a přesnost obrábění se zlepší.

V konstrukci základů strojů se budou častěji využívat materiály jako polymerbeton, které zaručují vyšší dynamickou a statickou stabilitu. U kritických částí strojů přesnost výroby zlepší použití keramiky, která má pro použití u EDM strojů řadu nesporných výhod. Její nižší koeficient teplotní roztažnosti zajišťuje přesnější proces obrábění. Je lehčí a tvrdší než klasické korozivzdorné oceli, ovšem nepodléhá korozi ani stárnutí.

Velké možnosti vývoje jsou v nasazování drátů o stále menším průměru. Standardní drát 0,25 mm používaný v současné době je stále častěji nahrazován slabšími průměry. Tento postup umožňují lepší generátory a elektronika, která zajišťuje citlivou regulaci výbojů. Nedochází potom ke zkratům a nechtěnému přerušování drátu. Využití těchto drátů má nesporné výhody například ve snížené spotřebě filtrů (méně vyplavovaného materiálu), nebo menší spotřebě materiálu elektrody.

Hloubicí stroje budou mít problém uhájit svoji pozici oproti frézování. Při frézování je výroba produktivnější a např. v režimu HSC umožňuje obrábět i kalené materiály. Nicméně ostrý roh frézou nelze vytvořit, proto budou mít pořád svoje místo na trhu. U hloubicích strojů se ukazuje, jak důležité je mít stroj zvládnutý nejen mechanicky, ale také technologicky. Technologie hloubení a s ní spojené rozměry elektrod jsou velice důležité.

5.2 Budoucnost EDM v podmínkách podniku Žďas a.s.

Elektroeroze ve firmě Žďas a.s. se ubírá směrem EDM drátového řezání. EDM hloubení je na ústupu. Zatímco před pěti lety byl provoz dvousměnný, v současné době stroj není vytížen ani jednu celou směnu. Výroba se přesunuje na klasické CNC stroje jako např. frézky v režimu HSM.

Stroje *Fanuc α-1ic* a *Hitachi 6Q/AWP*, které jsou zde v provozu, jsou technologickým zpracováním velice rozdílné. *Hitachi 6Q/AWP* využívá pouze výplach proudem dielektrika, což je problematické např. z hlediska častějšího nechtěného přerušování drátu. Má ovšem levnější provoz než stroje se zaplavováním celé pracovní vany. Také zde není ztrátový čas, při kterém se čeká na napuštění pracovní vany. Stroj *Hitachi 6Q/AWP* ale vyžaduje, kvůli starší technologii navlékání drátu, při přerušování drátu zásah obsluhy.

Navlečení drátu zde trvá přibližně 30 s. Naopak *Fanuc α -1ic* je již vybaven plně automatickým návlekem drátu. Stroj si při náhlém přerušení drátu najde vhodný bod pro návlek drátu a provede automatické navlečení drátu, které trvá asi 12 s.

Běžné požadavky obrobků nepřesahují rozměrovou přesnost $\pm 0,005$ mm a aritmetickou úchylku povrchu $R_a=0,6\mu\text{m}$. Tyto požadavky stroje *Fanuc α -1ic* a *Hitachi 6Q/AWP* splňují. Žďas a.s. nabízí i kooperaci elektroeroze pro jiné firmy, protože dva stroje by nebyly v třísměnném provozu pouze pro účely samotného podniku plně vytíženy. Firma Žďas a.s. je tedy v oblasti elektroerozivního obrábění plně soběstačná jak z hlediska produktivity tak přesnosti obrábění. Při použití tří řezů (1 x hrubovací řez a 2 x dokončovací) se dosahuje přesnosti $\pm 0,005$ mm. Pokud je požadována přesnost 0,05 mm a aritmetická úchylka povrchu není lepší než $R_a = 1,2 \mu\text{m}$ postačuje jeden řez. Toto řešení výrazně zvyšuje produktivitu.

Budoucnost elektroeroze se tedy zaměřuje směrem k EDM drátovému řezání. Stroj *Hitachi 6Q/AWP* je sice v provozu již od roku 1995, ale je stále spolehlivý a kromě běžných nutných kontrol nevyžaduje nutnost oprav. Stroj *Fanuc α -1ic* patří mezi moderní špičkové stroje s nejmodernějšími technologiemi. Není tedy nutné pořízení nových strojů. Současný strojní park plně vyhovuje požadavkům na přesnost a produktivitu obrábění.

ZÁVĚR

Ačkoliv je v podniku Žďas a.s. elektroeroze zastoupena jak drátovými řezacími stroji, tak hloubicím strojem, její využití se zaměřuje především směrem drátového řezání.

Používané drátové řezací stroje jsou svojí konstrukcí značně odlišné. *Hitachi 6Q/AWP* využívá pouze výplach proudem dielektrika, což je problematické např. z hlediska častějšího nechtěného přerušování drátu. Má ovšem levnější provoz než stroje se zaplavováním celé pracovní vany. Stroj *Hitachi* ale vyžaduje, kvůli starší technologii navlékání drátu, při přerušení drátu zásah obsluhy. Velkou výhodou tohoto stroje je možná velikost výšky řezu až 500 mm. Této možnosti často využívají jiné podniky v rámci kooperace. *Fanuc α -1ic* je nový stroj vybavený řadou moderních technologií. Tyto stroje se vzájemně doplňují a tvoří celek, který plně dostačuje požadavkům nástrojárny ve společnosti Žďas a.s.

Výrobci EDM strojů nabízí vesměs velice podobné stroje. Parametry strojů jako dosahovaná drsnost nebo přesnost se výrazně neliší. Nejrozšířenější nabídku strojů nabízí *AgieCharmilles*, která je na trhu EDM nejdéle. Především v EDM hloubení má v České republice majoritní podíl v počtu strojů. Stejně tak jako *Fanuc* u drátových řezacích strojů. *Fanuc* nabízí klasické spolehlivé řezací stroje. Společnost *Sodick* má velice progresivní vývoj, což dokazuje její ovládnutí japonského trhu. Oproti konkurenci má náskok zejména ve využití lineárních motorů. V podmínkách českého průmyslu nejsou tyto stroje sice rozšířené jako předešlé jmenované firmy, ale svým precizním zpracováním a možnostmi si jistě brzy najdou svoje místo i v českém EDM odvětví.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1989. 122 s.
2. MAŇKOVÁ, I. *Progresivne technologie*. 1.vyd. Košice: Viena, 275 s. ISBN 80-7099-430-4
3. ŘASA, J. a KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění. MM průmyslové spektrum*. červenec 2007, č. 7, s. 60-63. ISSN 1212-2572
4. KOCMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270s. ISBN 80-214-1996-2.
5. MORÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Tiskové středisko Západočeské univerzity, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9
6. HUMÁR, A. – *Technologie obrábění – 3.část*. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2005.
7. PENTA TRADING s.r.o. *Produkty* [online]. c2008. [citováno 3. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.penta-edm.cz/>>.
8. ZEMAN, Z. Unikátní řešení pro elektroerozivní řezání. *MM průmyslové spektrum*. Duben 2001, č. 4, s. 61.
9. Žďas a.s. *Žďas se představuje*. [online]. [citováno 6. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.zdas.cz/cz/index.php?res=1280>>.
10. Žďas a.s. *Nástroje*. [online]. [citováno 6. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.zdas.cz/cz/maxfoto.php?foto=534&txt=Doln%ED%20%E8%E1st%20slo%9Eit%E9ho%20st%F8i%9En%E9ho%20n%E1stroje>>.
11. AGIECHARMILLES. *Company* [online]. c2008. [citováno 2. března.2008]. Dostupné z: <<http://www.gfac.com/gfac/company.html>>.
12. AGIECHARMILLES. *Products: Wire Cut EDM*. [online]. c2008. [citováno 4. března.2008]. Dostupné z: <<http://www.gfac.com/gfac/products/wire-cut-edm.html>>.
13. AGIECHARMILLES. *Newsroom: Literature: Recent EDM literature: Agiecut Vertex* [online]. c2008. [citováno 11. března.2008]. Dostupné z: <http://us.gfac.com/newsroom/literature/serve_lit.cfm?litID=12>.
14. AGIECHARMILLES. *Newsroom: Literature: Recent EDM literature: Agiecut Challenge ED wire cutting* [online]. c2008. [citováno 6. března.2008]. Dostupné z: <http://us.gfac.com/newsroom/literature/serve_lit.cfm?litID=6>.
15. AGIECHARMILLES. *Newsroom: Literature: Recent EDM literature: Agiecut Classic V Series4* [online]. c2008. [citováno 5. března.2008]. Dostupné z: <http://us.gfac.com/newsroom/literature/serve_lit.cfm?litID=7>.
16. AGIECHARMILLES. *Newsroom: Literature: Recent EDM literature: Agiecut Progress 4* [online]. c2008. [citováno 6. března.2008]. Dostupné z: <http://us.gfac.com/newsroom/literature/serve_lit.cfm?litID=9>.
17. AGIECHARMILLES. *Products: Die Sinking EDM*. [online]. c2008. [citováno 7. března.2008]. Dostupné z: <<http://www.gfac.com/gfac/products/die-sinking-edm.html>>.
18. AGIECHARMILLES. *Products: Hole Drilling EDM*. [online]. c2008. [citováno 10. března.2008]. Dostupné z: <<http://www.gfac.com/gfac/products/hole-drilling-edm.html>>.

19. FANUC. *Profile*. [online]. c2008. [citováno 11. března.2008]. Dostupné z: <<http://www.fanuc.co.jp/en/profile/index.htm>>.
20. SODICK. *About Sodick*. [online]. c2008. [citováno 15. března.2008]. Dostupné z: <<http://www.sodick.jp/company/outline.html>>.
21. SODICK. *Downloads: Sodick Brochures: Sodick Product News*. [online]. c2008. [citováno 15. března.2008]. Dostupné z: <<http://www.sodick.de/cms/files/14-pager-cz.pdf>>.
22. SODICK. *Products: Wire EDM*. [online]. c2008. [citováno 15. března.2008]. Dostupné z: <http://www.sodick.com/index.php?t=comparison/products&category_id=1>.
23. ZENIT s.r.o. *Obráběcí stroje: EDM drátové řezačky*. [online]. [citováno 23. března.2008]. Dostupné z: <<http://www.cnc-stroje.cz/dratova-rezacka/>>.
24. SODICK. *Products: CNC Sinker EDM*. [online]. c2008. [citováno 15.března.2008]. Dostupné z: <http://www.sodick.com/index.php?t=comparison/products&category_id=2>.
25. ZENIT s.r.o. *Obráběcí stroje: EDM hloubičky*. [online]. [citováno 23. března.2008]. Dostupné z: <<http://www.cnc-stroje.cz/hloubicky/>>.
26. SODICK. *Products: CNC Sinker EDM*. [online]. c2008. [citováno 25. března.2008]. Dostupné z: <http://www.sodick.com/index.php?t=comparison/products&category_id=2>.
27. ZENIT s.r.o. *Obráběcí stroje: EDM vrtačky*. [online]. [citováno 26. března.2008]. Dostupné z: <<http://www.cnc-stroje.cz/vrtacky-edm/>>.
28. SODICK. *Products: Small Hole EDM*. [online]. c2008. [citováno 29. března.2008]. Dostupné z: <http://www.sodick.com/index.php?t=comparison/products&category_id=3>.
29. ONA. *Company*. [online]. c2008. [citováno 29. března.2008]. Dostupné z: <http://www.ona-electroerosion.com/eng/compania/prin_comp.html>.
30. ONA. *Company*. [online]. c2008. [citováno 29. března.2008]. Dostupné z: <http://www.ona-electroerosion.com/eng/compania/prin_comp.html>.
31. MITSUBISHI. *About us*. [online]. c2008. [citováno 30. března.2008]. Dostupné z: <<http://www.mitsubishicorp.com/en/about/index.html>>.
32. MITSUBISHI. *Products: Wire EDM products*. [online]. c2008. [citováno 25.března.2008]. Dostupné z: <http://www.mitsubishi-world.com/index.php?option=com_content&task=view&id=33&Itemid=675>.
33. MITSUBISHI. *Products: Sinker EDM products*. [online]. c2008. [citováno 25.března.2008]. Dostupné z: <http://www.mitsubishi-world.com/index.php?option=com_content&task=view&id=104&Itemid=680>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CM	[-]	chemické obrábění
CNC	[-]	číslicově řízené stroje
EDM	[-]	elektroerozivní obrábění
EBM	[-]	obrábění paprskem elektronů
ECM	[-]	elektrochemické obrábění
GAP	[mm]	pracovní mezera
HSC	[-]	vysokorychlostní obrábění
I	[A]	proud
I_e	[A]	střední vybíjejjící proud
K	[-]	součinitel úměrnosti
LBM	[-]	obrábění laserem
M_m	[mm]	zvětšující rozměr
PAM	[-]	obrábění plazmou
Q_v	[mm ³ s ⁻¹]	úběr obráběného materiálu
R_a	[μm]	střední aritmetická úchylka povrchu
R_{max}	[μm]	maximální drsnost povrchu
T	[s ⁻¹]	doba periody
T_{TAV}	[°K]	teplota tavení materiálu
U	[V]	napětí
U_e	[V]	střední vybíjejjící napětí
U_K	[V]	napětí při zhasnutí výboje
U_z	[V]	napětí naprázdno
USM	[-]	ultrazvukové obrábění
V_l	[mm ³]	množství odebraného materiálu
V_E	[mm ³]	úbytek objemu elektrody
V_m	[mm ³]	úbytek objemu obráběného materiálu
W_i	[J]	energie výboje
WJM	[-]	obrábění vodním paprskem
a	[mm]	pracovní mezera
ϕd	[mm]	průměr elektrody
ϕd_i	[mm]	průměr kráteru
h	[mm]	hloubka kráteru
mV	[%]	relativní opotřebení nástrojové elektrody
t_d	[s ⁻¹]	doba zpoždění výboje
t_e	[s ⁻¹]	doba výboje
t_i	[s ⁻¹]	doba impulzu
t_o	[s ⁻¹]	doba pausy
δ_{ER}	[mm]	chyba elektroeroze
δ_{NAST}	[mm]	chyba rozměru nástroje
δ_{ST}	[mm]	chyba deformace a nepřesnosti stroje
δ_T	[mm]	teplotní chyba
z	[mm]	tloušťka narušené vrstvy

--