

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TRENDY VÝVOJE ELEKTROEROZIVNÍCH HLOUBICÍCH STROJŮ

TREND DEVELOPMENT OF ELECTRODISCHARGE SINKING MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DAVID ČUMPL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. KAREL OSIČKA

BRNO 2008

ABSTRAKT

Obsahem práce je popis principu elektroerozivní hloubicí technologie, porovnání výrobců strojů, technologie výroby elektrod a doporučení stroje pro středně velkou strojírenskou firmu. Poslední část je věnována technicko-ekonomickému rozboru na konkrétních typech strojů a nastínění dalšího směru vývoje.

Klíčová slova

Elektroerozivní obrábění, elektroerozivní hloubení, výrobci, porovnání, trendy, vývoj.

ABSTRACT

In this work, a principle of Electro Discharge Sinking Technology is described as well as comparison of individual machine producers. Further, description of an electrode production technology is included together with a recommendation of a machine to a middle mechanical engineering company. Last part is dedicate technical and economical analysis on concrete types of machines and adumbration another trends of development.

Key words

Electro discharge machining, Electro discharge machining-Sinking, producers, camparison, trends, development

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČUMPL, David. *Trendy vývoje elektroerozivních hloubicích strojů: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 61 s., příloh 2. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.

Prohlášení

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

Datum

.....
David Čumpl

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	8
1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ.....	9
1.1 Rozdělení technologií podle převládajících účinků oddělování materiálu.....	9
1.2 Technologické využití elektroeroze.....	12
2 PRINCIP ELEKTROEROZIVNÍ HLOUBICÍ TECHNOLOGIE.....	16
2.1 Fyzikální princip elektroerozivního obrábění	16
2.2 Zdroje elektrické energie (generátory).....	18
2.3 Časový průběh výboje	20
2.4 Regulace přísuvu nástrojové elektrody.....	22
2.5 Rozměrové rozdíly nástrojových elektrod při hrubování a dokončování.....	23
2.6 Kvalitativní parametry dosažitelné elektroerozivním obráběním.....	24
2.7 Dielektrikum.....	25
2.8 Pohyb nástrojových elektrod	27
2.9 Materiály nástrojových elektrod	28
2.10 Problematika správné volby grafitu	30
3 POROVNÁNÍ STÁVAJÍCÍCH VEDOUČÍCH SVĚTOVÝCH FIREM	32
3.1 Firma Agie Charmilles	32
3.2 Firma Sodick	34
3.3 Firma Exeron	37
4 OSTATNÍ VÝROBCI A TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI JEJICH STROJŮ.....	40
4.1 Firma Mitsubishi	40
4.2 Firma OPS-Ingersoll	41
4.3 Firma Ona	42
5 TECHNOLOGIE VÝROBY ELEKTROD	44
5.1 Řezné podmínky obrábění mědi a grafitu.....	44
5.2 Upínání elektrod	45
5.3 Specifika výroby grafitových elektrod	46
6 DOPORUČENÍ PRO STŘEDNÍ STROJÍRENSKOU FIRMU CHARAKTERU NÁSTROJÁRNY	48
7 TECHNICKO–EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	51
Závěr.....	54
Seznam použitých zdrojů.....	55
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	59
Seznam příloh.....	61

ÚVOD

Historie elektroerozivního obrábění sahá až k roku 1786, kdy anglický vědec J. Priestley při studii chování plynů zaznamenal, že na vodivostních plochách při elektrickém výboji v plynu vznikají krátery. S nápadem využití destruktivních účinků elektrických výbojů a vytvoření procesu kontrolovaného obrábění kovů přišli sovětští vědci, manželé Lazarenkovi, když prováděli pokusy zaměřené na eliminování erozivního efektu na elektrických kontaktech. V roce 1943 vylepšili proces jiskrového obrábění, který se takto nazývá díky elektrickým výbojům, kterými dochází mezi dvěma proudovými vodiči ponořenými v kapalině. Technologie se následující roky dále rozvíjela. Pracovalo se převážně na snížení nežádoucího úběru na straně nástrojové elektrody. Princip konstrukce výbojového generátoru podle Lazarenka se tehdy používal ještě řadu let. Jako jeden z prvních elektroerozivních strojů vyrobila v roce 1952 švýcarská firma *Agie*, která ho představila na Evropské výstavě obráběcích strojů v Miláně v roce 1955. (1,2,3,4)

Dalších 50 let vývoje znamenal mohutné rozšíření elektroerozivních strojů. Dnes tyto stroje využívají jak velké podniky, tak i menší firmy, a to díky cenové dostupnosti srovnatelné s moderními CNC obráběcími centry. Největší uplatnění mají hloubicí a drátové řezací stroje v nástrojárnách. Staly se nedílnou součástí procesu výroby střížných a lisovacích nástrojů, forem pro tlakové lití, atd. Pro svou schopnost obrábět velice přesně a dosahovat velmi nízkých hodnot drsnosti povrchu prakticky nahrazují brouscí operace. (1,2,3)



Obr. 1 Předvádění elektroerozivního hloubicího stroje firmy *Agie* (rok 1955) (4)

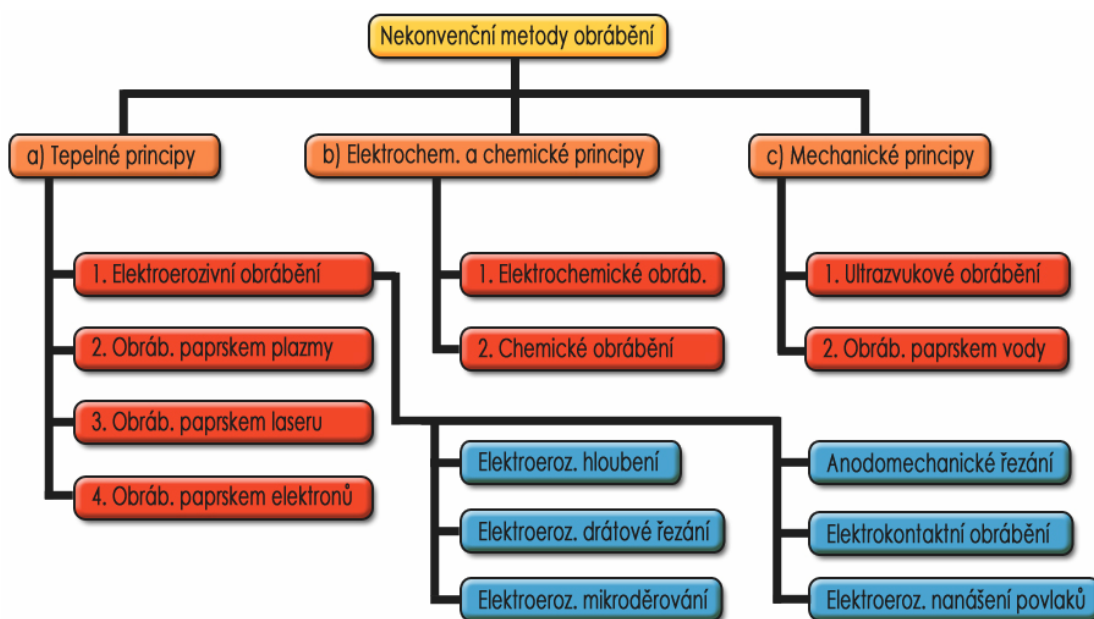
1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Rozvoj nekonvenčních metod obrábění (NMO) zapříčiňuje stále rostoucí používání materiálů s vysokou tvrdostí, pevností, odolností proti opotřebení, houževnatostí apod., které nelze standardními metodami efektivně obrábět. (5)

Charakteristika nekonvenčních metod obrábění:

- rychlost obrábění a jeho výkonnost nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu;
- obráběný materiál bývá často tvrdší než nástroj;
- možnost obrábění složitých tvarů, jako například výroba děr se zakřivenou osou, obrábění složitých tvarových dutin v materiálech o vysokých mechanických vlastnostech;
- NMO vesměs umožňují zavádění plné mechanizace, automatizace a včlenění dané operace do výrobní linky;
- NMO umožňují zvýšení sériovosti výroby a současně omezení výroby zmetků a snížení pracnosti daných operací;
- u některých NMO dochází ke změně vlastností povrchové vrstvy, především zvýšení odolnosti proti korozi, zvýšení únavové pevnosti apod. (5)

1.1 Rozdělení technologií podle převládajících účinků oddělování materiálu



Obr. 1.1 Diagram rozdělení nekonvenčních metod obrábění

a) *Oddělování materiálu tepelným účinkem:*

1. Elektroerozivní obrábění (Electro Discharge Machining – EDM)

- podrobný popis viz. dále

2. Obrábění paprskem plazmy (Plasma Beam Machining – PBM)

- technologie používaná od padesátých let. Plazmové obrábění je založeno na tavení a odpařování řezaného materiálu teplotou (10 000 až 30 000) °C. Plazma je složena z volných elektronů, pozitivně nabitých iontů a neutrálních atomů. Jako pracovní plyn se používá vzduch, argon, vodík, dusík a jejich směsi. (5,6)
- použití: nejčastěji k rozřezávání těžkoobrobitelných ocelí a slitin neželezných kovů. (5,6)

3. Obrábění paprskem laseru (Laser Beam Machining – LBM)

- k odebrání materiálu dochází účinkem úzkého paprsku silného monochromatického světla soustředěného na velmi malou plošku. Světelný paprsek při dopadu na překážku přemění svoji energii na tepelnou. Dosahovaná teplota se pohybuje řádově kolem 10 000°C. (5,6)
- použití: značení a popisování materiálu a součástí, rozřezávání těžkoobrobitelných materiálů, výroba průvlaků pro tažení tenkých drátů, výroba trysek karburátorů, součásti mikroelektroniky. (5,6)

4. Obrábění paprskem elektronů (Elektron Beam Machining–EBM)

- k obrábění se používá soustředěný urychlený svazek elektronů. Ten předává svoji kinetickou energii při dopadu na obráběný materiál ve formě tepla. Dochází k lokálnímu přehřátí, natavení a případně i odpaření materiálu. (5,6)
- použití: letecký a kosmický průmysl, výroba polovodičů a mikroelektronických prvků, vrtání děr malých rozměrů (0,1 až 1) mm. (5,6)

b) *Oddělování materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem:*

1. Elektrochemické obrábění (Electro Chemical Machining – ECM)

- k oddělování materiálu dochází anodickým rozpouštěním v elektrolytu (elektrolýza), kdy nástroj je katoda a obrobek anoda. Stejnosměrný proud o nízkém napětí (5 až 20) V rozpouští materiál na obrobku. (5,6)
- použití: obrábění kalených ocelí, žárupevných slitin, tvarových ploch a hlubokých děr (5,6)

2. Chemické obrábění (Chemical Machining – CM)

- podstatou je řízené odleptávání vrstev materiálu o tloušťce několika setin milimetru do několika milimetrů z povrchu

obrobku. Proces je založen na využití chemických reakcí obráběného materiálu a pracovním prostředím (nejčastěji kyselinou nebo hydroxidem). Plochy, které nechceme obrábět se chrání speciálním povlakem (maskou na bázi pryskyřice). (5,6)

- použití: při úběru malých tlouštěk materiálu a velkých plošných rozměrech obrobku, popřípadě složitých tvarů. Nejlépe se obrábí hliník a jeho slitiny, dále nerezavějící oceli, měď, mosaz, titan apod. V praxi se jedná o chemické postřikování a chemické rozměrové leptání. (5,6)

c) Oddělování materiálu mechanickým účinkem:

1. Ultrazvukové obrábění (Ultrasonic Machining – USM)

- k obrábění energie se využívá ultrazvukových kmitů. Základními metodami jsou ultrazvukové nárazové broušení a rotační obrábění ultrazvukem. (5,6)
- použití: ultrazvukové nárazové broušení – obrábění tvrdých křehkých materiálů jako je sklo, křemík, keramika, grafit, slinuté karbidy apod.
rotační obrábění ultrazvukem – pouze pro opracování nekovových materiálů jako je křemen, guma, safír, sklo, keramika apod. (5,6)

2. Obrábění paprskem vody (Water Jet Machining – WJM)

- technologie je založena na využití abrazivních účinků vodního paprsku. Rezným nástrojem je paprsek vody o vysokém tlaku (až 300 MPa) a rychlosti. Výhodou je tepelně neovlivněné místo řezu. Pro toto obrábění se někdy užívá výraz hydrodynamické obrábění. (5,6)
- použití: v leteckém a kosmickém průmyslu, řezání čistým vodním paprskem (např. laminátů, sklotextilu, gumotextilu apod.) a řezání paprskem s abrazivní příměsí (např. pro řezání titanu, kobaltu, SK, ale i skla hliníku apod.). (5,6)

Tab.1.1 Technologické parametry nekonvenčních metod obrábění (5)

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

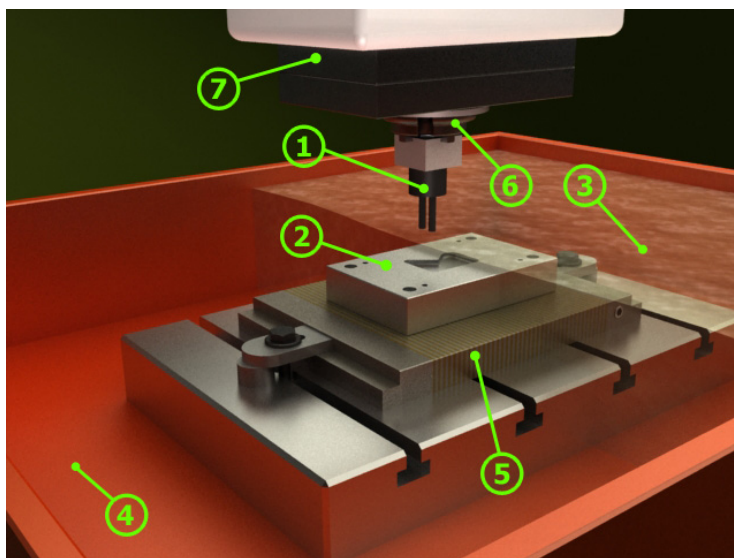
1.2 Technologické využití elektroeroze

V průmyslu existuje řada variant využití principu elektroeroze. K nejvíce používaným způsobům patří:

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

Elektroerozivní hloubení

K úběru materiálu elektrickými výboji dochází mezi anodou (nejčastěji ji tvoří nástrojová elektroda) a katodou (nejčastěji ji tvoří obrobek) ponořenými do tekutého dielektrika. Touto metodou se obrábí i tvary, které jsou klasickými metodami obrábění nerealizovatelné. Nejčastěji nachází uplatnění při výrobě střížných a lisovacích nástrojů, forem pro tlakové lití, apod. Jako materiály nástrojových elektrod se používají grafit, měď, mosaz, wolfram, atd. Přesnost elektroerozivního hloubení dosahuje 0,01 mm a střední aritmetická úchylka profilu až $R_a=0,1\mu\text{m}$. (5,6,7)



Legenda:

- 1 – nástrojová elektroda
- 2 – obrobek
- 3 – tekuté dielektrikum
- 4 – pracovní vana
- 5 – upínací systém obrobku
- 6 – upínací systém elektrody
- 7 – pracovní hlava

Obr.1.2 Uspořádání pracovního prostoru stroje

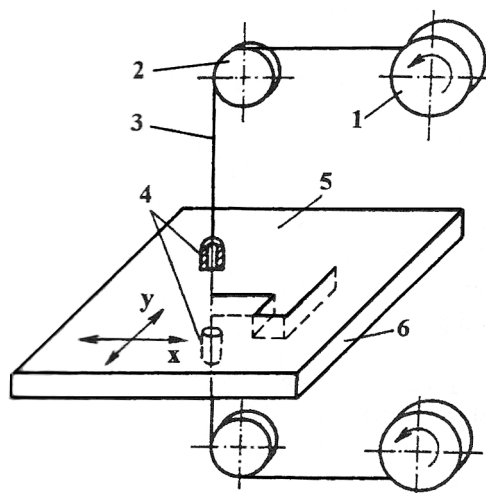
Elektroerozivní drátové řezání

Elektroerozivního řezání drátovou elektrodou se využívá při výrobě střížných a lisovacích nástrojů, šablon a řady dalších plochých součástí z kovových materiálů.

Princip této metody je naznačen na obrázku (obr. 1.3). Nástrojovou elektrodu tvoří tenký drát. Aby se předešlo jeho nadměrnému opotřebení, odvíjí se pomocí speciálního napínacího mechanismu. Drát umožňuje odebírat materiál po celém svém povrchu. S vhodným řídicím systémem a současně s naklápěcí svislou osou (rozsah $\pm 30^\circ$) lze přesně obrábět velmi složité tvary. Jako materiál pro drátové elektrody se používá měď a mosaz, pro velmi jemné řezy pak molybdenový drát o průměru (0,03 až 0,07) mm. (1,6,7)

Na drátovou elektrodu jsou kladeny následující technické požadavky:

- vysoká elektrická vodivost, protože malým průřezem drátu (0,03 až 0,3) mm se přivádí do pracovní mezery elektrická energie;
- úzké tolerance rozměru (průměru) a tvaru (kruhovitosti), na kterých závisí přesnost řezání. Ke kalibraci se používají průvlastky z polykrystalického diamantu. Dráty se žíhají a pokovují;
- velká mechanická pevnost a odolnost proti přetržení;
- pro přesné řezání a kvalitní řez je nutné udržovat drát řádně napnutý. (6)



Legenda:

- 1 – cívka
- 2 – napínací kladka
- 3 – drátová elektroda
- 4 – vedení drátu
- 5 – obrobek
- 6 – řízený pohyb obrobku

Obr. 1.3 Schéma elektrojiskrového řezání drátovou obrobku (5)

Elektroerozivní mikroděrování

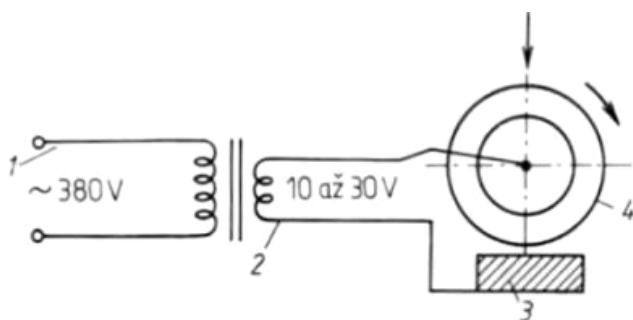
Pro mikroděrování je potřeba strojů se speciálními generátory pulzů. Díry je možno vyrábět kruhového i nekruhového průřezu v rozsahu (0,02 až 5) mm a hloubky až 100 mm. Stroj je vybaven přípravky pro vedení elektrody, např. skleněné kapiláry a optická zařízení pro polohování osy otvorů. Nástrojovými elektrodami jsou obvykle wolframové dráty. Tato technologie se využívá především pro výrobu startovacích otvorů pro elektroerozivní drátové řezání, výrobu průvlastků, trysek do karburátorů, trysek ze SK, v mikroelektronice apod. (1,6,7)



Obr. 1.4 Stroj pro výrobu mikrootvorů elektroerozivní technologií

Elektrokontaktní obrábění

K úběru materiálu dochází elektrickými nestacionárními kontaktními obloukovými výboji. Nástroj i obrobek je napájen zdrojem střídavého napětí. Nástrojová elektroda vykonává rotační případně přímočarý pohyb. Ten zabraňuje svaření nástroje a obrobku. Na nástrojové elektrodě se vyrábí drážky, které zlepšují vyplachování dielektrikem a zvyšují úběr. Elektrokontaktní obrábění je vhodné pro řezání těžkoobrobitelných materiálů, ořezávání nálitků a vtoků ve slévárnách, opracování svarů apod. Výhodami metody jsou vysoká úběrovost, jednoduchá konstrukce stroje, nízké pracovní napětí (10 až 30) V a malé opotřebení nástroje (2 až 10 % hmotnosti odebraného materiálu). Mezi nevýhody patří nízká kvalita obrobeného povrchu a jeho tepelné ovlivnění do hloubky až 5 mm, vysoká energetická náročnost, vznik návarů, hluchost, rozstříkování kovu a ultrafialové záření. (1,6,7)



Legenda:

- 1 – napájecí zdroj
- 2 – transformátor
- 3 – obrobek
- 4 – nástrojová elektroda

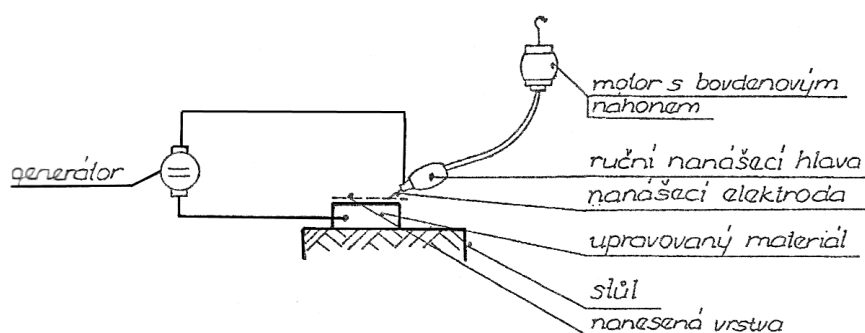
Obr 1.5 Principiální schéma elektrokontaktního dělení materiálu (7)

Elektroerozivní nanášení povlaků

Nanášecí elektroda ze slinutého karbidu je upnuta v nanášecí hlavě a je buď rozkmitávána nebo rotuje (bovdenový náhon). Vedení po obrobku je

ruční. Vzniklá tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí (2 až 40) μm . Nanesená vrstva zvětšuje otěruvzdornost povrchu. Náklady na povlakovaný nástroj jsou podstatně nižší než na celý nástroj ze SK a zůstávají zachovány přednosti houževnatých materiálů. Povlaky lze nanášet na komplikované plochy jednoduchým způsobem. Mezi nevýhody patří pracnost nanášení a nerovnoměrnost vrstvy, která je závislá na zručnosti a pečlivosti obsluhy. (6)

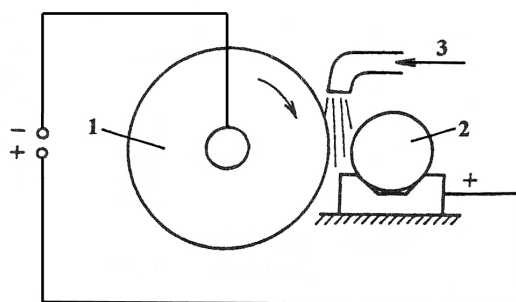
Touto technologií se povlakuji např. lisovací, ohýbací a protlačovací nástroje. Dále šroubovitě vrtáky, pilové listy apod. (6)



Obr. 1.6 Principiální schéma elektroerozivního nanášení povlaků (6)

Anodomechanické řezání

Anodomechanické řezání je kombinací jednak elektroerozivních tak i elektrochemických účinků. Vyšší napětí a proudy využívají účinek elektroerozivní, nižší hodnoty naopak účinek elektrochemický. Pracovní prostor je zaplaven elektrolytem (Na_2SiO_3 – vodní sklo), který plní funkci izolační a chladicí. Nástrojem je ocelový kotouč, pás nebo drát zapojený jako katoda a součást jako anoda. Nevýhodou je nekvalitní a nepřesný řez. Anodomechanické řezání se používá k dělení obtížně obrobitelných kovových materiálů a tenkostěnných trubek. (5,6)



Legenda:

- 1 – nástroj
- 2 – obrobek
- 3 – přívod pracovní kapaliny

Obr. 1.7 Principiální schéma anodomechanického obrábění (5)

2 PRINCIP ELEKTROEROZIVNÍ HLOUBICÍ TECHNOLOGIE

2.1 Fyzikální princip elektroerozivního obrábění

Při vzájemném přiblížení obrobku a nástroje (elektrody), na niž je přivedeno elektrické pulzní napětí, dochází k elektrickému jiskrovému výboji. Aby bylo možné výboj uskutečnit v co nejmenším prostoru, a aby se mohly oderodované částičky materiálu průběžně odstraňovat, je nutné, aby proces probíhal v proudící elektricky nevodivé kapalině, dielektriku. Elektrická eroze se uskutečňuje na obrobku i nástroji současně. (8)

Aby se vygeneroval elektrický výboj mezi obráběcí elektrodou a obrobkem je nutné aplikovat napětí, které je větší než vypínací napětí v jiskrové mezeře (prostor mezi elektrodou a součástí). (9)

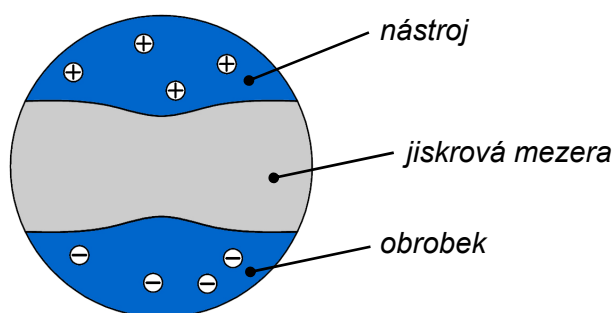
Vypínací napětí je závislé:

- na vzdálenosti mezi obráběcí elektrodou a součástí,
- na izolačních vlastnostech dielektrika,
- na stupni znečištění v mezeře mezi obráběcí elektrodou a součástí (rezidua z eroze). (2)

Výboj lze rozdělit na tyto fáze:

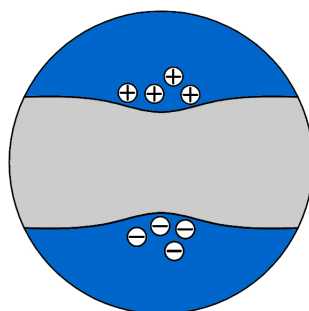
1. **průraz** – fáze zapálení
2. **vznik výbojového kanálu** – fáze výboje
3. **přerušení** – fáze bez výboje (2)

Před zahájením procesu obrábění jsou pozitivní ionty a elektrony volně rozptýleny v objemu jak nástroje (obráběcí elektrody) tak obrobku. (1,2)



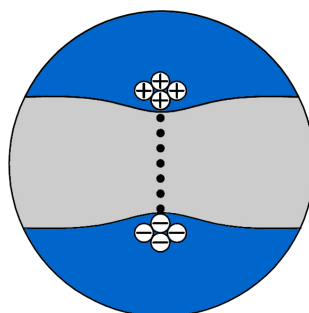
Obr. 2.1 Nástroj a obrobek před vyvoláním jiskrového výboje (2)

V okamžiku vyvolání elektrického napětí se pozitivní ionty a elektrony přeskupují k nejužšímu místu mezi elektrodou a obrobkem. V podstatě se jedná o nerovnosti povrchu nástroje a obrobku. (1,2)



Obr. 2.2 Kumulace kladných iontů a elektronů (2)

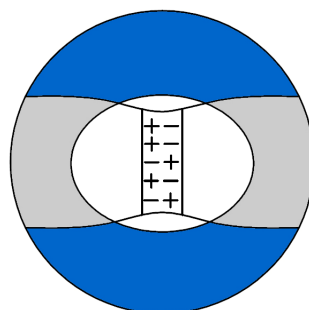
V místě kde je pole nejsilnější, dosáhnou volné pozitivní ionty a elektrony vysoké rychlosti a vytvoří ionizovaný výbojový kanál který vede elektřinu. Nyní již může proud protékat a mezi elektrodami dochází k jiskře způsobující nekonečný počet srážek mezi částicemi (průraz). (1,2)



Obr. 2.3 Ionizovaný výbojový kanál (2)

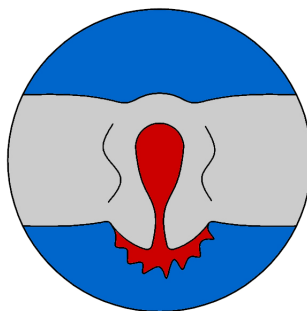
Vytváří se zóna plazmy, která velice rychle dosáhne extrémně vysokých teplot, která se zvyšuje v důsledku zvyšujícího se počtu srážek (8000°C až 12 000°C). To způsobuje neustálé lokální tavení materiálu na povrchu těchto dvou vodičů (vznik a rozvoj výbojového kanálu). (1,2)

Současně se v důsledku vypařování elektrod a dielektrika tvoří bubliny plynu. (1,2)



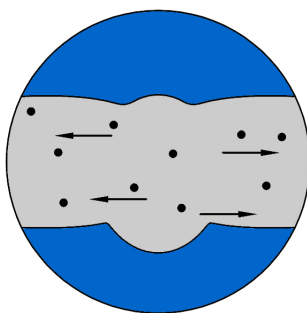
Obr. 2.4 Proud plazmy (2)

Když dojde k přerušení přiváděné energie a poklesu proudu, náhlé snížení teploty způsobí implozi plynové bubliny. Vznikají dynamické síly, které uvolní roztavený materiál z kráteru. (1,2)



Obr. 2.5 Uvolnění roztaveného materiálu (2)

Do vzniklého kráteru vniká dielektrikum, které ochlazuje taveninu a zabraňuje průniku tepla do hlubších vrstev kovu. Erodovaný materiál poté v dielektriku opět ztuhne. Dostane kulový tvar a je odveden dielektrikem ven z jiskrové mezery. (1,2)



Obr. 2.6 Odvedení nečistot z jiskrové mezery (2)

2.2 Zdroje elektrické energie (generátory)

Parametry impulzů patří k důležitým charakteristikám, které tvoří technologické ukazatele obrábění. Jednotlivé technologické aplikace (např. hrubování a obrábění načisto) využívají různých forem a parametrů elektrických výbojů. Ty jsou na nástrojovou elektrodu a obrobek přiváděny ve formě impulzů o určité frekvenci. Každý impulz je charakterizován napětím, proudem a svým tvarem. (1)

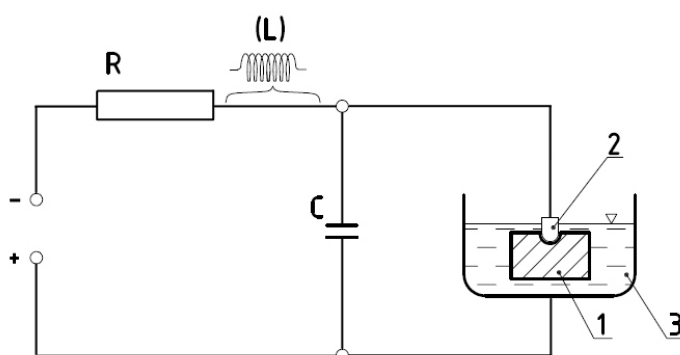
Závislé generátory (RC a RLC)

Tyto tzv. elektrojiskrové (relaxační) generátory patří k nejstarším zdrojům výbojů. Principem generátoru je opakující se nabíjení a vybíjení kondenzátoru ze zdroje stejnosměrného napětí. K vybití kondenzátoru dochází tehdy, když velikost napětí dosáhne průrazné hodnoty. Velikost průrazného napětí je závislé na znečištění dielektrika a mezielektrodové vzdálenosti. Změnou poměrů v jiskřišti měníme frekvenci a energii výbojů. (1,6)

Závislé generátory produkují velmi krátké výboje. Pro tento typ generátoru je vhodné zapojovat obrobek jako anodu a nástroj jako katodu (z důvodu menšího úbytku materiálu na nástroji). Konstrukce generátoru je

jednoduchá a spolehlivá. Mezi nevýhody se řadí objemový úbytek nástroje (30% i více), omezená možnost regulace tvaru a frekvence výbojů a nízká produktivita obrábění. Při obrábění oceli úběrovost nepřesahuje hodnotu $500 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ a $100 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ při obrábění SK. (1,6)

Zapojením indukčnosti (L) v nabíjecím obvodu (zapojení RLC) dle obrázku (Obr 2.7) se dosáhne ustálení nabíjecího proudu a tím zkrácení doby nabíjení (vzrůst frekvence a výkonu). Úběrovost při obrábění oceli dosahuje hodnoty až $2000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. (1,6)



Legenda:

- 1 – obrobek
- 2 – nástrojová elektroda
- 3 – dielektrikum

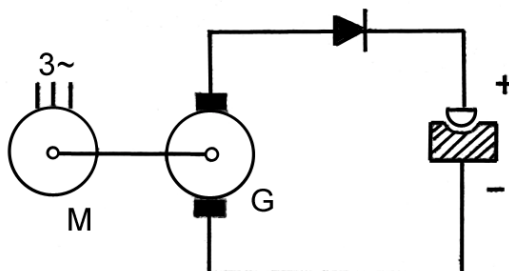
Obr. 2.7 Schéma el. obvodu s RC/RLC prvky (6)

Nezávislé (pulzní) generátory

Pomocí nezávislých generátorů lze nastavovat pracovní podmínky eroze bez ohledu na poměry v pracovní mezeře. Charakterizujícím znakem těchto zdrojů je delší doba trvání impulzů a nižší pracovní napětí. V podstatě existují dva typy nezávislých generátorů. A to rotační a polovodičové. (1,6)

Rotační

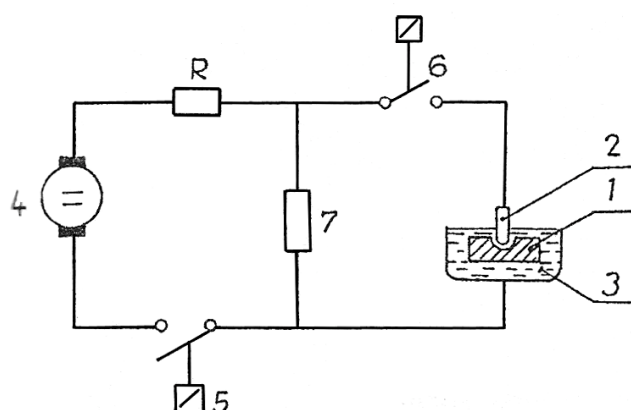
Roztáčením dynama asynchronního motoru vznikají impulzy o stálé frekvenci (např. 400 Hz). Rotační nezávislé generátory umožňují vysokou úběrovost až $5000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Mezi nevýhody se řadí vysoká hluchost a obtížná regulace frekvence pulzů. (6)



Obr. 2.8 Schéma rotačního pulzního generátoru (6)

Polovodičové

Předností polovodičových nezávislých generátorů je možnost nastavení elektrických parametrů ve značném rozsahu (např. frekvenci od 0,5 Hz až po 50 kHz). Dobu trvání impulzu t_i a dobu pauzy t_o vytváří multivibrátor. Při výbojích nevzniká negativní půlvlna a je dosahován malý relativní objemový úbytek nástroje (cca 1%). V současnosti se převážně používají polovodičové (impulzní) generátory řízené CNC řídicími systémy. Dosahovaný úběr bývá až $7000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, u velkých zařízení až $25\,000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. (6)



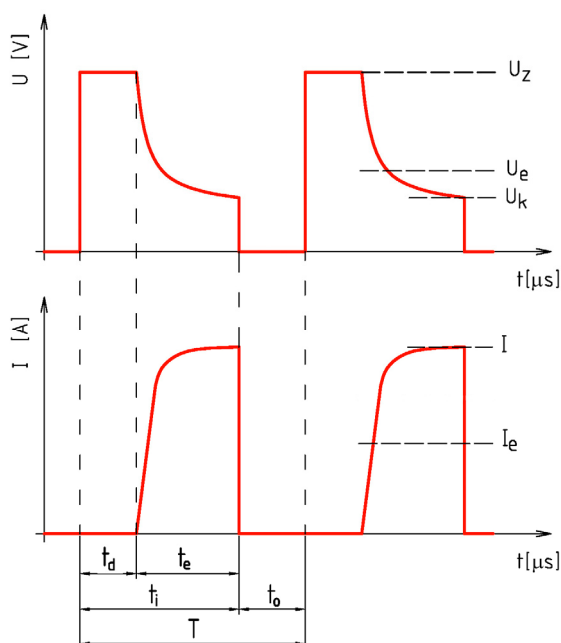
Legenda:

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

Obr. 2.9 Schéma polovodičového pulzního generátoru (6)

2.3 Časový průběh výboje

Uvedený časový průběh výboje se týká polovodičového generátoru, který se dnes používá nejvíce.



Obr. 2.10 Proudová a napěťová charakteristika polovodičového generátoru (1)

- t_i – doba impulzu. Je to časový úsek mezi zapojením a vypojením generátoru. Pro dobu impulzu platí vztah $t_i = t_d + t_e$. (1)
- t_o – prodleva. Okamžik mezi dvěma napěťovými pulzy. Zvětšováním přestávky lze zlepšovat bezpečnost procesu. (2)
- t_d – zpoždění výboje. Je to čas, který uplyne mezi zapnutím napěťového pulzu a průrazem výbojové dráhy, tzn. nárůstem proudu v pracovní mezeře. U delšího času zpoždění zapálení je bezpečnost procesu tendenčně vyšší, rychlost obrábění je však současně menší. Opačně zase snížením času zpoždění zapálení se zvýší rychlost obrábění, současně však poklesne bezpečnost procesu. Čas zpoždění zapálení závisí vždy na pracovních podmínkách, tzn. znečištění vyjiskřovací mezery, a tím se optimální hodnota liší u každého konkrétního případu. (1,2)
- t_e – doba trvání výboje. Je to časový úsek, po který výbojovou dráhou prochází proud. Touto hodnotou lze ovlivnit opotřebení elektrod. Při kladné polaritě se opotřebení s rostoucí dobou trvání výboje zmenšuje a zvyšuje se tepelný vliv na materiál. Příliš dlouhá doba trvání výboje má za následek metalizaci, tzn. usazování materiálu na elektrodě, elektroda „roste“. U negativní polarity klesá opotřebení se zmenšováním doby trvání výboje a tepelný vliv na povrch je malý. V malé míře má doba trvání výboje vliv na drsnost povrchu, která se zvětšuje se zvětšováním doby trvání výboje nezávisle na polaritě elektrod. (2)
- T – doba periody. Časový úsek součtu doby impulzu a prodlevy ($T = t_i + t_o$), určující frekvenci výbojů. (1)
- U_z – napětí na prázdko. Napětí při zapnutí generátoru (zápalné napětí výboje). Tímto napětím lze ovlivňovat šířku mezery. Vyšší hodnota a větší mezera znamená lepší vyplachovací podmínky. Tento efekt se využívá při obrábění lamel, aby se tím kompenzovaly velmi špatné vyplachovací podmínky, zvláště při hrubování. Při dokončovacím obrábění může na základě nízké energie výbojů vzniknout velmi malá mezera a v důsledku toho se může zvýšit náchylnost ke zkratu. I v tomto případě lze podmínky procesu zlepšit zvýšením napětí naprázdno. (2)
- I – pracovní proud výboje. Maximální vybíjecí proud protékající mezi elektrodami v okamžiku výboje. Je to směrodatný parametr, který rozhoduje o úběru a drsnosti povrchu. Velké hodnoty proudu znamenají velký úběr a špatnou kvalitu povrchu. (1,2)
- I_e – střední vybíjecí proud. Střední hodnota proudu mezi okamžikem zapálení výboje a vypnutím generátoru. (1)
- U_e – střední vybíjecí napětí. Střední hodnota napětí mezi okamžikem zapálení výboje a vypnutím generátoru. (1)
- 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)

$$W_i = \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (2.1)$$

2.4 Regulace přísuvu nástrojové elektrody

U každého elektroerozivního stroje je nedílnou součástí servomechanismus, který umožňuje regulaci nástrojové elektrody a nastavení pracovní mezery GAP. Servomechanismus má za úkol nastavování optimální vzdálenosti mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem a tím zajišťovat plynulost a rovnoměrnost erozivního úběru. Optimální vzdálenost pracovní mezery je nutná pro vytvoření výboje. Hlavními faktory jsou pracovní podmínky (U_z – napětí na prázdko, t_i – doba impulsu, t_o – doba pauzy), dielektrikum a materiál elektrod. (1)

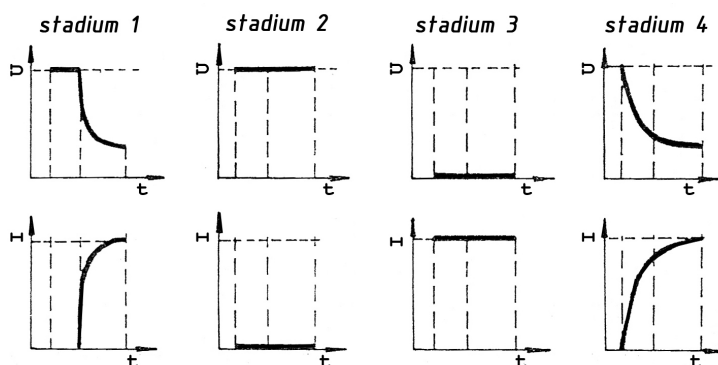
Čtyři nejdůležitější stadia tvořící základ regulační strategie při elektroerozivním obrábění:

Stadium 1 – optimální pracovní podmínky hloubení;

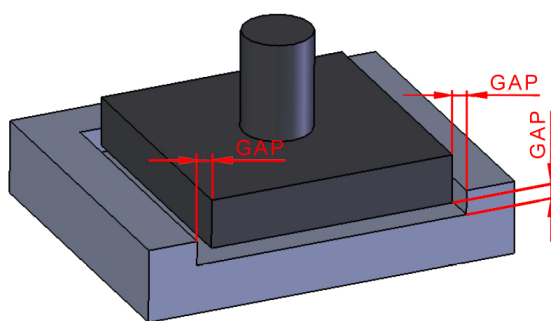
Stadium 2 – chod na prázdko bez výboje v pracovní mezeře. Důvodem je velká pracovní mezera, případně příliš vysoký tlak přiváděného dielektrika. Regulační elektronika identifikuje nulové hodnoty proudu v jiskřišti;

Stadium 3 – vznik zkratu. Důvodem je přímý kontakt elektrody s obrobkem například v důsledku špatného vyplachování. Regulační elektronika tento stav vyhodnocuje na základě dramatického poklesu napětí;

Stadium 4 – vznik světelných výbojů. Důvodem je nedostatečná deionizace dielektrika, krátká doba pauzy nebo příliš znečištěné dielektrikum. Následkem je nárůst drsnosti a opotřebení nástrojové elektrody. Regulační elektronika vyhodnotí uvedený stav na základě nulové hodnoty zpoždění výboje t_d . (1)



Obr. 2.11 Možné napěťové a proudové situace při elektroerozivním obrábění (1)



Obr. 2.12 Jiskrová mezera „GAP“

Pozn.: Boční GAP činí přibližně 80% čelního.

2.5 Rozměrové rozdíly nástrojových elektrod při hrubování a dokončování

Rozměry elektrody, respektive vůle mezi elektrodou a obrobkem $\underline{M}$, je určujícím faktorem výsledné rozměrové přesnosti obrobenej plochy. Nástrojové elektrody se vyrábí menší o hodnotu $\underline{M}$. U hrubování je vůle $\underline{M}$ složena z pracovní mezery $\underline{GAP}$, hodnoty $\underline{R_z}$ a přídávku $\underline{z}$. (1)

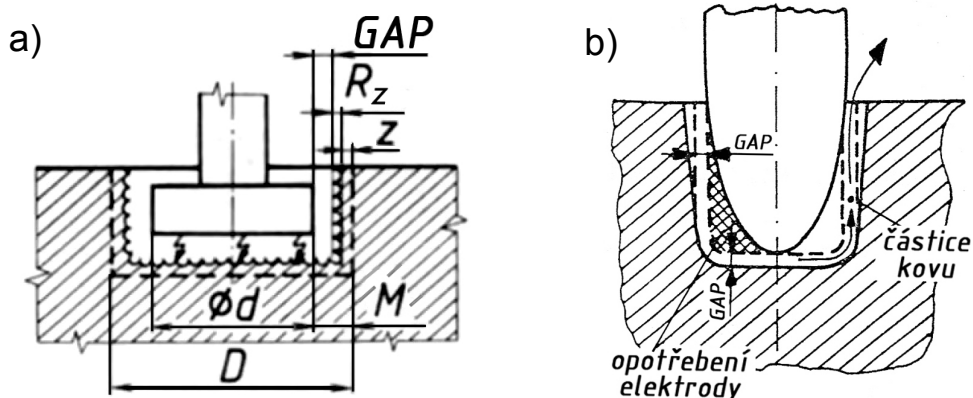
Výpočet vůle $\underline{M}$: (1)

$$M = GAP + R_z + z \quad (2.2)$$

Výpočet rozměru hrubovací elektrody: (1)

$$d = D - 2 \cdot (GAP + R_z + z) = D - 2 \cdot M \quad (2.3)$$

Hrubovací přídavek $\underline{z}$ v sobě zahrnuje tloušťku narušené vrstvy. Pracovní mezera je dána pracovními parametry generátoru a určuje se z normativů dodaných výrobcem stroje. Při obrábění se nástrojová elektroda opotřebovává a uvolněné vodivé částice způsobují nežádoucí boční výboje. Namísto válcového otvoru vzniká otvor kuželový (Obr. 2.13b). Tohoto jevu se zbavíme například použitím výplachu odsáváním. (1)



Obr. 2.13 Parametry jiskrové mezery (1,7)

Při hloubení dokončovacími elektrodami se volí výboje s nižší energií jednotlivých impulzů. Obrobená dutina je oproti dokončovací elektrodě větší pouze o hodnotu GAP . Vzniklá hodnota nejvyšší výšky profilu R_z je vzhledem k velikosti pracovní mezery zanedbatelná, proto ve vztahu nefiguruje. (1)

Výpočet rozměru dokončovací elektrody: (1)

$$d = D - 2 \cdot GAP \quad (2.4)$$

2.6 Kvalitativní parametry dosažitelné elektroerozivním obráběním

Při každém druhu obrábění vznikají chyby, resp. odchylky od žádaného tvaru a rozměru o určitou odchylku δ . Pro elektroerozivního obrábění se δ vypočítá podle vztahu (2.5). (1)

$$\delta = \delta_{ST} + \delta_T + \delta_{NAST} + \delta_{ER} \quad (2.5)$$

δ_{ST} – chyba obráběcího stroje způsobená deformacemi a nepřesnostmi pohybových mechanismů a upínacího systému nástrojových elektrod. Obvykle tato hodnota nepřevyšuje 0,003 mm. (1)

δ_T – chyba vzniklá oteplením během obrábění, tj. ohřevem dielektrika a elektrod. Na obrázku (Obr. 2.18) je uvedena teplotní roztažnost mědi. Na elektrodě dlouhé 200 mm a ohřáté o $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ bude vlivem teplotní roztažnosti $\delta_T = 0,05$ mm. (1)

δ_{NAST} – výrobní nepřesnost nástrojové elektrody. Pro elektrody frézované to bude přibližně $\delta_{NAST} = \pm 0,01$ mm a pro elektrody broušené, případně obráběné na elektroerozivních drátových strojích $\delta_{NAST} = \pm 0,002 \div 0,005$ mm. (1)

δ_{ER} – chyba daná podstatou elektroerozivního obrábění. Uvedená chyba nepřesahuje řádově hodnoty μm . (1)

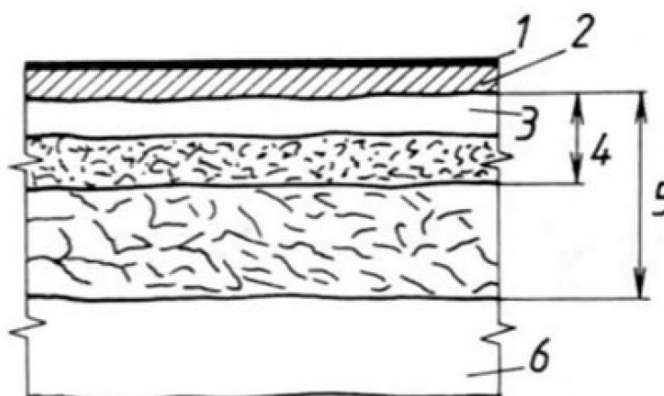
Drsnost povrchu a stav povrchové vrstvy vymezuje oblast použití elektroerozivního obrábění. Jak je patrné ze vztahu (2.6), drsnost povrchu úzce souvisí s energií jednotlivých výbojů. (1)

Pro nejvyšší výšku nerovnosti profilu platí vztah,

$$R_z = K \cdot W_i^r \quad (2.6)$$

kde W_i je energie impulzu a K a r jsou experimentálně zjištěné konstanty. Obecně se dá konstatovat, že nejlepší kvality povrchu se dosahuje při nižších hodnotách proudu, krátkých impulzech a vysokých frekvencích výbojů. Kvalitní povrch s sebou nese zvýšené opotřebení nástrojové elektrody a s rostoucí energií výbojů i stav povrchové vrstvy. Studium obrobků byly

zjištěny změny povrchových vrstev, jejichž rozložení je zachyceno na obrázku (Obr 2.14). (1)



Obr. 2.14 Složení povrchu opracované vrstvy (7)

Legenda:

- 1** – mikrovrstva nasycená částicemi dielektrika a chemické sloučeniny vytvořené difuzí;
- 2** – vrstva obsahující materiál nástrojové elektrody (v případě zapojení nástroje na záporný pól);
- 3** – tzv. bílá vrstva, silně nauhličená, znovu ztuhlá tavenina, jemná struktura charakteru martenzitu, tvrdost 60 HRC, tloušťka od 0,04 mm až do několika desetin milimetru v závislosti na energii impulzů;
- 4** – pásmo termického ovlivnění, přesahující rozměrem bílou vrstvu, vykazující v oblasti 3 a 4 svojí strukturou zakalený a popuštěný výchozí materiál;
- 5** – pásmo plastické deformace vyvolané tlakovými rázy impulzů;
- 6** – základní materiál. (1,7)

2.7 Dielektrikum

Dielektrikum je pracovní kapalně prostředí, ve kterém se uskutečňuje vlastní elektrojiskrový výboj. Současně plní nejrůznější funkce nutné pro stabilní průběh elektroerozivního obrábění. Působí jako izolátor mezi elektrodami, odvádí teplo z pracovní mezery, ohraničuje výbojový kanál, odvádí drobné produkty eroze z míst výbojů a zabraňuje usazování uhlíku a mikročástic materiálu na povrchu nástrojové elektrody, jehož následkem by docházelo ke zkratům. Jako dielektrika se používají strojní olej, transformátorový olej, petrolej, destilovaná voda, deionizovaná voda a speciální dielektrika dodávaná výrobcí strojů. Při elektroerozivním hloubení se používají nejčastěji dielektrika na bázi petroleje, které umožňují dobrou kontrolu nad výboji. (1,3,6,7)

Požadavky na dielektrické kapaliny:

- dostatečné dielektrické vlastnosti (odpor) umožňující vznik výboje průrazem dielektrika;
- dobrou smáčivost a malou viskozitu, zajišťující rychlé obnovení izolace v místě výboje;
- bod vzplanutí dielektrika musí být vyšší než 60°C, protože při výbojích vznikají vysoké teploty, které způsobují ohřátí elektrod a dielektrika;
- chemická neutrálnost pro zamezení vzniku koroze;
- hygienická a ekologická nezávadnost, nesmí docházet k rozkladu a vzniku zdraví nebezpečných plynů. U některých typů dielektrik (např. petroleje) je nutné při velkých výkonech obrábění odsávání;
- nízká pořizovací cena. (1,3,6)

Součástí elektroerozivního stroje jsou zásobník dielektrické kapaliny, čerpadlo, potrubí, filtrační zařízení a chladí zařízení. Je velmi důležité, aby dielektrikum při erozi nebylo příliš znečištěné. Pro vlastní filtraci se používají zařízení různých konstrukcí (např. papírové filtry, usazovací filtry nebo odstředivé filtrační zařízení). Správné vyplachování je charakterizováno rovnoměrností. Přívod dielektrika mezi obrobek a nástrojovou elektrodu, tzv. vyplachování, je možné realizovat několika způsoby. Jedná se o vnější vyplachování, tlakové vyplachování (vnitřní), odsávání a pulzní vyplachování. (1,3)

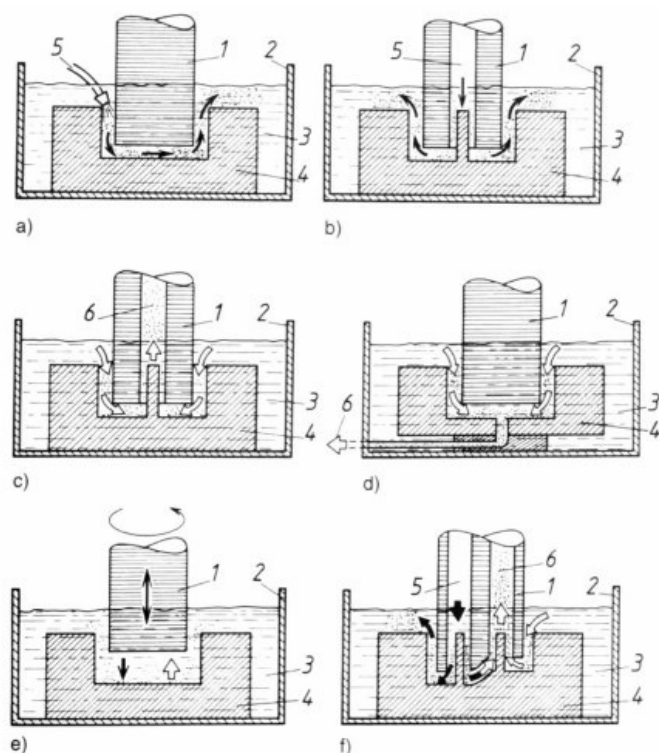
Vnější vyplachování (Obr. 2.15a) se nejčastěji používá při obrábění dutin o větší hloubce. V praxi se využívá toto vyplachování zároveň s pulzním. Odstraňování nečistot mezi nástrojem a obrobkem je ulehčováno kmitavým pohybem elektrody. (1,2,7)

U vnitřního tlakového vyplachování (Obr. 2.15b) je dielektrikum přiváděno otvorem v nástrojové elektrodě přímo do pracovního prostoru. Nevýhodou je menší tvarová přesnost boků hloubené dutiny. Důvodem jsou odváděné částice, které jsou zdrojem bočních výbojů. (1,2,7)

Vyplachování odsáváním (Obr. 2.15c,d) se uskutečňuje odsáváním dielektrika dutinou v nástrojové elektrodě nebo v obrobku. Vyznačuje se velmi dobrou tvarovou přesností obráběné dutiny. (7)

Pulzní vyplachování (Obr. 2.15e) je charakterizováno přerušením procesu elektroeroze na (0,15 až 10) s. Současně se oddaluje (případně rotuje) nástrojová elektroda od obrobku o (0,02 až 10) mm. Dochází tím ke zvětšení pracovní mezery mezi obrobkem a elektrodou a dosáhne se tak jejího dokonalého vypláchnutí. Při vyjíždění elektrody se vypíná pracovní proud, aby se zabránilo vzniku bočních výbojů. Po nastavení elektrody do pracovní vzdálenosti je proud opět spuštěn. Tento způsob vyplachování je výhodný při výrobě hlubokých dutin, při použití tenkých elektrod nebo při obrábění načisto. (1,2,7)

Kombinované vyplachování (Obr. 2.15f) je kombinace vnitřního tlakového vyplachování a odsávání. Touto metodou lze dosáhnout přesných tvarů obráběné dutiny. Používá se především tam, kde hloubíme tvarově komplikovanou dutinu. (7)



Legenda:

- a) vnější vyplachování
- b) tlakové vnitřní vyplachování
- c), d) vyplachování odsáváním
- e) pulzní vyplachování
- f) kombinované vyplachování

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

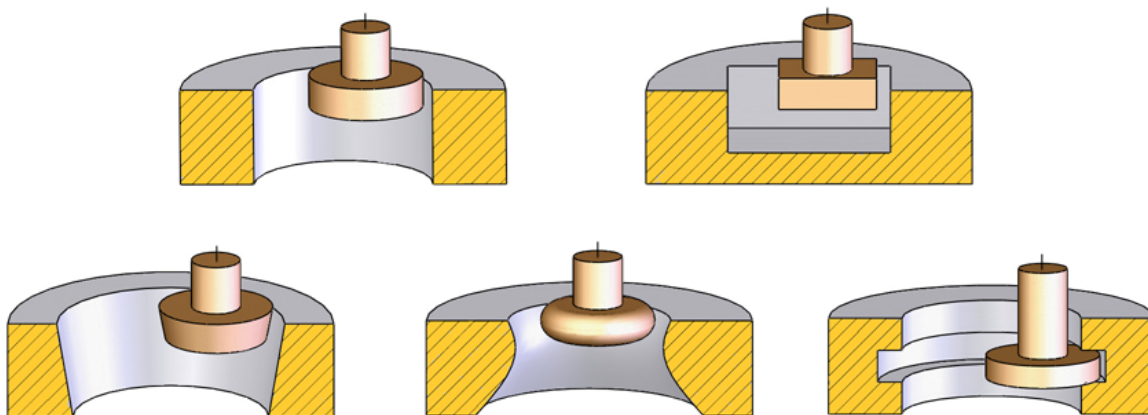
Obr. 2.15 Přívod dielektrika mezi obrobek a nástrojovou elektrodu (7)

2.8 Pohyb nástrojových elektrod

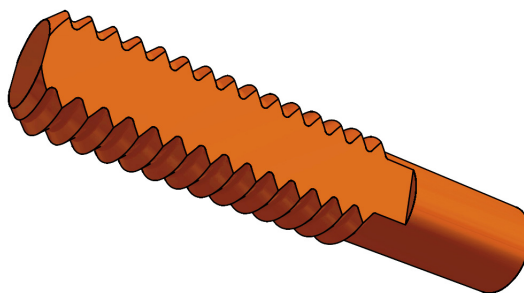
Materiál můžeme obrábět klasickým „přenášením“ tvaru nástrojové elektrody, kdy obrobená část se jeví jako negativ samotné elektrody. Pohyb nástroje při obrábění vykonává svislá osa (Z). (6)

Další metodou obrábění je využití planetového pohybu na nástroji. Při obrábění větších nebo tvarově složitějších dutin se používá základních tvarů elektrod s kruhovým, čtvercovým či obdélníkovým průřezem. V procesu tohoto obrábění se využívají 4 osy (X,Y,Z,C). Výhodou je zlepšení odvádění elektricky vodivých oderodovaných částic z místa elektroeroze a tím zkvalitnění a zpřesnění obrobeného povrchu. Elektrojiskrová mezera je větší a vyplachování se tím značně usnadní. U planetového obrábění se také snižuje spotřeba elektrod. Strojní časy se zkracují o (40 až 60) %. Úbytek elektrody při vhodném pracovním režimu lze korigovat velikostí výchylky translace. Jedinou elektrodou lze zhotovovat v otvoru zápich i podkos, dále otvory s kuželem negativním i pozitivním, otvory s konvexními nebo konkávními stěnami. Závity se vyrábí buďto právě planetově nebo klasicky vytvářením negativu v obrobku kombinací rotačního (osa C) a radiálního

pohybu (osa Z). Na závitové elektrodě se vyfrézují dvě rovnoběžné plošky. Důvodem je usnadnění vyplachování (Obr. 2.17). (1,6)



Obr. 2.16 Příklady planetových pohybů nástrojových elektrod



Obr. 2.17 Závitová elektroda

2.9 Materiály nástrojových elektrod

Opotřebení se děje jak na obrobku tak i na nástrojové elektrodě. Úbytky materiálu z nástroje vyvolávají změnu rozměrů a tvaru. Cílem volby pracovních podmínek je zajistit minimální opotřebení nástroje při požadované produktivitě a drsnosti obrobenej plochy. (1)

Pro volbu materiálu nástrojové elektrody se zavedlo relativní objemové opotřebení ($\mathcal{G}$). Tato veličina porovnává objemové opotřebení nástroje ku odebranému objemu materiálu obrobku. (1)

$$\mathcal{G} = \frac{V_N}{V_O} \cdot 100\% \quad (2.7)$$

Výpočet míry úběru na obrobku (2)

$$V_O = \frac{\Delta m_O}{\rho_O \cdot t} \quad (2.8)$$

Výpočet míry opotřebení na nástrojové elektrodě (2)

$$V_N = \frac{\Delta m_N}{\rho_N \cdot t} \quad (2.9)$$

Eroze (opotřebení) na elektrodě a součásti je asymetrická a závisí zejména:

- na polaritě obou elektrod,
- na tepelné vodivosti,
- na teplotě tavení materiálu nástroje i obrobku,
- na konstrukci generátoru,
- na volbě dielektrika,
- na intenzitě výbojů. (2)

Tab. 2.1 Parametry materiálů využívající se v elektrojiskrovém obrábění (10,11,12,13)

materiál	Hustota [g·cm ⁻³]	Tvrdost [HV]	Tepel. vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Elektrický odpor [nΩ·m]	Tepł. tavení [°C]	Cena [Kč·dm ⁻³]
Grafit	1,6 ÷ 2,1	80 ÷ 150	55 ÷ 100	2·10 ³ ÷ 2·10 ⁴	3200	1000 ÷ 5000
Měď	8,96	370	386	16,8	1085	3000
Wolfram	19,25	3430	173	52,8	3422	

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

Grafit – je nejčastěji používaný materiál. Snadno se obrábí, vykazuje dobré charakteristiky opotřebení a je málo citlivý na tepelné výkyvy. Při hrubovacích pracích se opotřebení elektrody pohybuje kolem $\vartheta = 1\%$ a při dokončování $\vartheta = (5 \div 10) \%$. Díky své hmotnosti lze realizovat velmi rozměrné elektrody, které se využívají například při obrábění forem nárazníků automobilů. Obráběním grafitu lze vytvořit vysoké lamely široké pouze 0,1 mm. (5,14)

Měď – má příznivé charakteristiky opotřebení stejně jako grafit. Měď se obrábí veškeré karbidy. Lze dosahovat drsnosti obrobeného povrchu lepší než $R_a = 0,5\mu\text{m}$. (5)

Měď a wolfram } jsou to nákladné materiály. Nejedná se o pravé slitiny. **Stříbro a wolfram** } Wolfram je lisován a spékán s mědí nebo stříbrem. Podíl wolframu se pohybuje v rozmezí (50 až 80) %. Vysoké procenta wolframu znamenají malé opotřebení elektrody (třikrát až pětikrát nižší oproti měděné elektrodě) avšak opracování je obtížnější. Tento materiál nemůže být tvarován po slinování, protože je velmi křehký. Používá se na obrábění hlubokých drážek, oceli, slinutých karbidů a karbidů wolframu. (5)

Měď a grafit – jedná se o grafit s mědí. Tento materiál je 1,5 až 2krát dražší než grafit, je výhodný pro obrábění karbidu wolframu. (5)

Mosaz – je relativně levný a snadno obrobitelný materiál. Z hlediska opotřebení není výhodný. Dnes se nahrazuje především grafitem nebo mědí. (5)

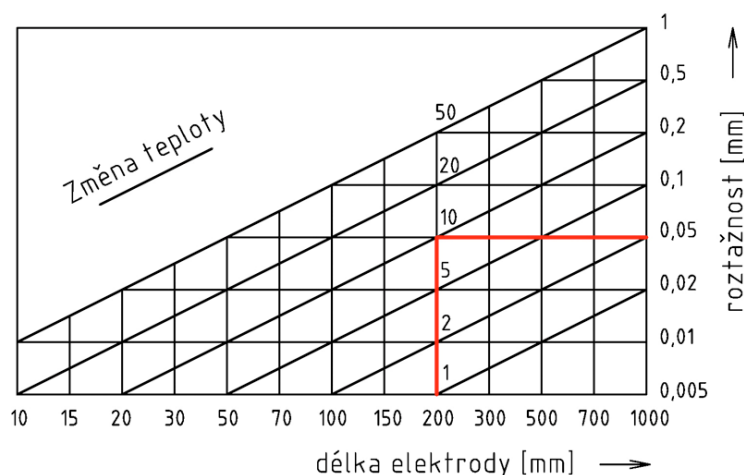
Wolfram – se používá pro obrábění slinutého karbidu a výrobu malých děr, tj. menších než 0,2 mm. (5)

Příklad:

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



roztážnost: 0,05 mm



Obr. 2.18 Teplotní roztážnost mědi (2)

2.10 Problematika správné volby grafitu

Grafit na elektrody se vyrábí v mnoha šaržích kvality a tím i ceny. Díky snadnému opracování se mu dává často přednost před mědí. Ne vždy je ale vhodné volit elektrody z grafitu. Například při leštění povrchu v dutině je měděná elektroda lepší než grafitová.

Různé vlastnosti grafitu ovlivňují oblast použití. V tabulce (Tab. 2.2) jsou uvedeny tři typy grafitů firmy *Tedok*, které se liší svými parametry. Obecně platí, že čím menší je zrna grafitu, tím jemnější detaily lze na elektrodě resp. obrobku vyhotovit.

Tab. 2.2 Porovnání grafitů firmy *Tedok* (15)

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]
Pevnost v ohybu [$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$]
Pevnost v tlaku [$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$]
Tvrdost [Shore]
Elektrický odpor [$\mu\Omega\cdot\text{m}$]

< 1
1019
1554
83
21,6

Použití:

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

Tab. 2.3 Porovnání grafitů firmy Tedok (15)

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. 2.4 Porovnání grafitů firmy Tedok (15)

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

Tab. 2.5 Volba materiálu elektrody vzhledem k materiálu obrobku (7)

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	korozivzdorná ocel	H	střední	stabilita oblouku u některých jakostí ocelí 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	korozivzdorná 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 POROVNÁNÍ STÁVAJÍCÍCH VEDOUCÍCH SVĚTOVÝCH FIREM

Při výběru vedoucích světových firem bylo přihlédnuto k prodejm elektroerozivních hloubicích strojů na území České republiky.

3.1 Firma Agie Charmilles



Počátky společnosti sahají k přelomu 19. a 20. století. Tehdy firma *Piccard & Pictet* zabývající se výrobou automobilů přenechala část svých výrobních hal firmě *Charmilles*. V roce 1954 je představen první elektroerozivní hloubicí stroj. Vývoj probíhal společně s firmou *Agie*. Po úspěšné výstavě obráběcích strojů v Miláně buduje v roce 1957 firma *Agie* první výrobní závod v Lausanne ve Švýcarsku. V roce 1969 spouští první řadu číslicově řízených drátových řezacích strojů. Pro firmu *Charmilles* rok 1987 znamenal velké stěhování. Z Ženevy se veškerá výroba přesunula do nových závodů na předměstí Meyrinu. V roce 1996 získává pan Georg Fischer většinový podíl ve společnosti *Agie Holding Ltd.*, jehož součástí byla jak firma *Agie* tak i *Charmilles*. Pan Fischer obě firmy sloučil ve společnost *Agie Charmilles Group* a vytvořil tak velice silnou skupinu na poli elektroerozivních technologií. V roce 2000 odkupuje firmu *Mikron* zabývající se vysokorychlostním obráběním a v roce 2001 firmu *System 3R Group* vedoucího výrobce upínacích systémů. (16)

Firma *Agie Charmilles* má zastoupení na pěti kontinentech. Divize obráběcích strojů vloni prodala své produkty za více jak 18 miliard korun. Z toho 41% patřilo EDM strojům a 29% obráběcím centrům. V současnosti firma nabízí 17 hloubicích strojů v několika skupinách, které pokryjí veškeré možné aplikace. (16)

Tab. 3.1 Porovnání modelů elektroerozivních hloubicích strojů firmy *Agie Charmilles* (4,17,18,19)

Model	AT HyperSpark™ EXACT 2 HS	AT HyperSpark™ 3 HS	AT Spirit 2
Typ konstrukce	„C“	„C“	„C“
Rozsahy pojezdů X/Y/Z [mm]	350x250x350	500x350x500	300x250x250
Max. velikost obrobku X/Y/Z [mm]	650x580x250 820x420x250	880x680x350 1070x530x350	630x400x185
Max. váha elektrody [kg]	50/100	50/200	25
Max. váha obrobku [kg]	400	800	200
Max. úběr materiálu [mm³·min⁻¹]	1000	1000	600
Max. dosahovaná drsnost povrchu R _a * [μm]	<0,2	<0,2	0,2
Nejmenší programovatelný krok [μm]	0,1	0,1	1
Vrcholový proud generátoru [A]	72 / 104	72 / 104	72
Automatické měření polohy obrobku	ANO	ANO	ANO
Objem dielektrika – nádrž [l]	415	620	300
Operační systém	AGIEVISION	AGIEVISION	CNC SPIRIT
Ruční řízení	ANO	ANO	ANO

Přívodní napětí	[V]	400	400	400
Příkon	[kVA]	8,3	8,3	4,7
Rozměry stroje D/V/Š	[mm]	2689x1855x2593	2855x2135x2965	1850x2360x2100
Váha stroje	[kg]	3200	3900	1280
Zvláštnosti / výbava		Pokročilý systém diagnostiky chyb, objektově orientovaný grafický systém člověk–stroj–místo obr., modul minimálního zadávání dat, simulace obrábění ve 2D i 3D, databanka elektrod, modul vyhotovení protokolu o průběhu obrábění, odesílání informací o chybách přes lokální síť případně SMS zprávou, design stroje umožňující nasazení robotizované jednotky, 40GB HDD, CD-ROM, 128MB RAM, 15" LCD display, atd.		Systém AEP (automat. erozní programování), databáze orbitálních pohybů, modul kontury, simulace obrábění ve 2D i 3D, 20GB HDD, USB/CD-ROM, 15" LCD display, atd.

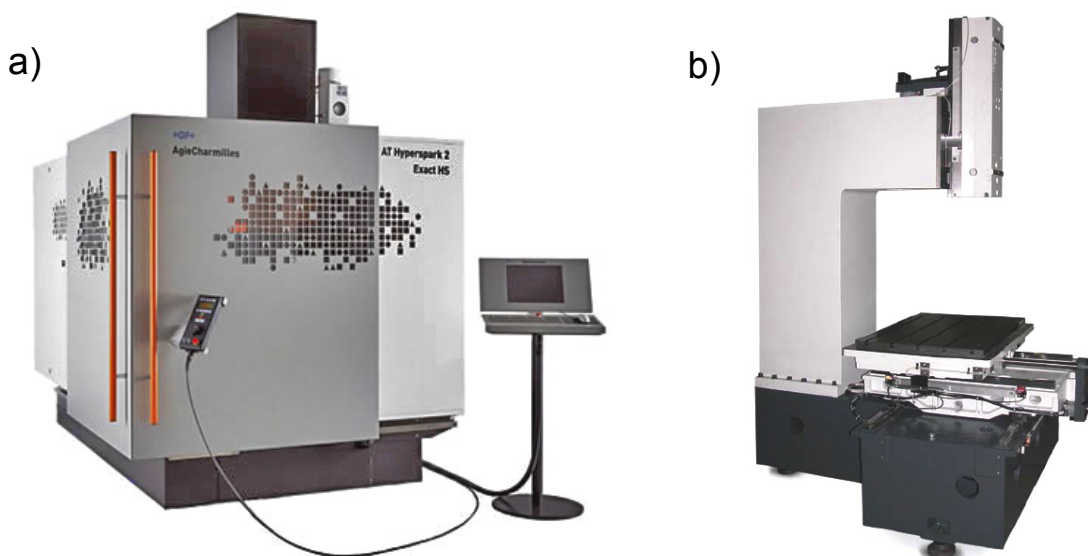
Pozn.: Váha strojů je udávána bez dielektrické kapaliny.

Tab. 3.2 Porovnání modelů elektroerozivních hloubicích strojů firmy Agie Charmilles (4,17,19,20,21)

Model	AT Spirit 4	FO350 MicroTEC	FO53P
Typ konstrukce	Portálová	„C“	„C“
Rozsahy pojezdů X/Y/Z [mm]	700x500x400	350x250x300	600x400x400
Max. velikost obrobku X/Y/Z [mm]	1100x750x 370	780x530x300	1200x800x500
Max. váha elektrody [kg]	80	50	50
Max. váha obrobku [kg]	2000	500	800
Max. úběr materiálu [mm ³ ·min ⁻¹]	1000	1000	600
Max. dosahovaná drsnost povrchu R _a * [μm]	0,2	0,1	0,1
Nejmenší programovatelný krok [μm]	1	0,1	0,1
Vrcholový proud generátoru [A]	72	64 / 128	64 / 128
Automatické měření polohy obrobku	ANO	ANO	ANO
Objem dielektrika – nádrž [l]	840	410	700
Operační systém	CNC SPIRIT	WINDOWS XP	WINDOWS XP
Ruční řízení	ANO	ANO	ANO
Přívodní napětí [V]	400	400	400
Příkon [kVA]	4,7	4,7	4,7
Rozměry stroje D/V/Š [mm]	3000x3000x2865	1900x2522x1690	1950x2700x2500
Váha stroje [kg]	4000	2600	3000
Zvláštnosti / výbava	Systém AEP (automat. erozní programování), databáze orbitálních pohybů, modul kontury, simulace obrábění ve 2D i 3D, 20GB HDD, USB/CD-ROM, 15“ LCD display, atd.	Optimalizace a hlídání obráběcích parametrů, ochrana proti zkratům, interaktivní grafický asistent, pomocník definování rozměru a počtu elektrod, 10GB HDD, CD-ROM, 12“ LCD display, atd.	Kontextová nápověda s grafickými vysvětlivkami, ochrana proti zkratům, pomocník definování rozměru a počtu elektrod, modul optimalizace opotřebení elektrod, 14“ CRT monitor, atd.

Elektroerozivní hloubicí stroje *Agie Charmilles* obsahují celou řadu softwarových modulů a funkcí, které zabezpečují kompletní dozor a kontrolu nad elektroerozivním procesem. V případě, že se vyskytne chyba, stroj ji diagnostikuje, navrhne možnosti nápravy a odešle chybové hlášení po firemní LAN síti nebo SMS zprávou. Podle závažnosti závady probíhá nahlášení na několika úrovních. (17,18,19,20,21)

K příslušenství patří zásobník a měnič elektrod. Nové modely jsou schopny značné automatizace a bezobslužnosti. EDM hloubicí stroj je propojen s 3D souřadnicovým měřícím strojem, na kterém se proměří elektrody a obrobek upevněný na peletě. Data z měření se pošlou do hloubicího stroje. Elektrody a obrobek se připraví do zásobníku k dalšímu hloubení. Po ukončení obrábění dochází k okamžité výměně. Osy elektrod a poloha obrobku jsou již známé a může se začít rovnou hloubit. Toto řešení minimalizuje časové prostoje mezi následujícím hloubením. (17,18,19,20,21)



Obr. 3.1 a) Agietron HyperSpark™ EXACT 2 HS (19)

b) rámová konstrukce tvaru „C“ stroje ROBIFORM 53P (21)

* drsností povrchu R_a se rozumí průměrná aritmetická úchylka profilu

3.2 Firma Sodick

Sodick

Japonská firma *Sodick* byla založena v roce 1976 a výrobou elektroerozivních strojů se tedy zabývá již 30 let. První EDM hloubicí stroj byl představen téhož roku. V roce 1980 vstoupily na americký trh a o rok později představují pětiosý drátový řezací stroj. Souběžně budují svoji centrálu v Yokohamě, kterou dokončují v roce 1982. O dva roky později vstupují na tokijskou burzu. V roce 1990 *Sodick* dokončil výstavbu výrobních závodů v Thajsku. O rok později odkupují firmu *JAPAX*, která se stává součástí *Sodick group*. V dubnu roku 1999 *Sodick* představil jako první na světě elektroerozivní stroj s lineárním pohonem. Od tohoto roku bylo vyrobeno a nainstalováno po celém světě více než 10 000 těchto strojů. Od roku 2006 *Sodick* nabízí na své produkty desetiletou záruku. Podíl prodeje EDM strojů

na japonském trhu činí 49%. V současnosti má Sodick v nabídce 8 elektroerozivních hloubicích strojů. (22)

Tab. 3.3 Porovnání modelů elektroerozivních hloubicích strojů firmy Sodick (23,24,25,26)

Model	AQ35L	AQ55L	AQ75L
Typ konstrukce	„C“	„C“	„C“
Rozsahy jezdů X/Y/Z [mm]	350x250x250	550x400x350	700x500x350
Max. velikost obrobku X/Y/Z [mm]	750x 550x320	950x725x410	1100x950x500
Max. váha elektrody [kg]	50	50	100
Max. váha obrobku [kg]	550	1000	2000
Max. dosahovaná drsnost povrchu R_a^* [μm]	0,1	0,1	0,1
Nejmenší programovatelný krok [μm]	0,1	0,1	0,1
Vrcholový proud generátoru [A]	40	40	40
Automatické měření polohy obrobku	ANO	ANO	ANO
Objem dielektrika – nádrž [l]	275	475	620
Operační systém	WINDOWS XP	WINDOWS XP	WINDOWS XP
Ruční řízení	ANO	ANO	ANO
Přívodní napětí [V]	200/220	200/220	200/220
Příkon [kVA]	10	10	10
Rozměry stroje D/V/Š [mm]	1535x2395x2210	1735x2720x2570	3050x3970x5260
Váha stroje [kg]	3900	6000	11000
Zvláštnosti / výbava	Keramický stůl, lineární pohony os, automatický hasicí systém, chladicí systém, měnič elektrod, upínací systém od firmy System 3R nebo EROWA, napojení na interní firemní síť, 12,1“ LCD display, atd.		

Tab. 3.4 Porovnání modelů elektroerozivních hloubicích strojů firmy Sodick (23,27,28,29)

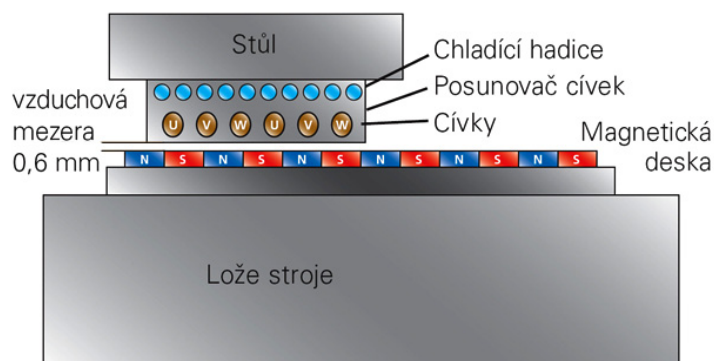
Model	AP1L	AQ15L	AD3L
Typ konstrukce	„C“	Portálová	„C“
Rozsahy jezdů X/Y/Z [mm]	200x120x200	900x1500x600	300x250x250
Max. velikost obrobku X/Y/Z [mm]	503x349x250	1100x950x500	925x555x300
Max. váha elektrody [kg]	5	100	50
Max. váha obrobku [kg]	25	10000	550
Max. dosahovaná drsnost povrchu R_a^* [μm]	0,1	0,1	0,1
Nejmenší programovatelný krok [μm]	0,1	0,1	0,1
Vrcholový proud generátoru [A]	10	80	40
Automatické měření polohy obrobku	ANO	ANO	ANO
Objem dielektrika – nádrž [l]	120	4500	400
Operační systém	WINDOWS XP	WINDOWS XP	WINDOWS XP
Ruční řízení	ANO	ANO	ANO
Přívodní napětí [V]	200/220	200/220	200/220
Příkon [kVA]	10	10	10
Rozměry stroje D/V/Š [mm]	1100x1895x1800	3050x5260x3970	1870x2315x1955
Váha stroje [kg]	2100	18000	3200
Zvláštnosti / výbava	Keramický stůl, lineární pohony os, automatický hasicí systém, chladicí systém, 15“ LCD display, atd.		

Sodick hojně využívá ve svých strojích keramické komponenty. Jejich výhodami jsou nižší váha v porovnání s ocelí nebo litinou, nerezaví, jsou dostatečně tvrdé, mají vysoký elektrický odpor a extrémní tepelnou stabilitu. (30,31)

Elektroerozivní hloubicí stroje *Sodick* také využívají dynamické vlastnosti lineárních pohonů, pomocí nichž lze provádět erodování bez výplachu. Pracovní stůl a pohon jsou jeden celek. (30,31)

Výhody lineárních pohonů jsou následující:

- bez údržbový systém,
- vyšší rychlost a větší zrychlení,
- žádné opotřebení,
- žádný mrtvý chod,
- úspora energie,
- vyšší přesnost. (30,31)



Obr. 3.2 Uspořádání lineárního pohonu (31)

Sodick nabízí největší elektroerozivní hloubicí stroj na trhu. Model **AQ15L** je portálové konstrukce. Lze obrábět formy o hmotnosti až 10000 kg a dosahovat průměrné aritmetické úchytky profilu $R_a=0,1\mu\text{m}$. Tento stroj se hodí především pro obrábění forem automobilových dílů nebo velkých plochých zobrazovacích panelů. (28,30)

Současně stroje *Sodick* obsahují elektronické kontrolní mechanismy zajišťující optimální proces obrábění. Nepřetržitě kontrolují jiskrovou mezeru a upravují poměry v jiskřišti (až 500x za sekundu). Stroje jsou vybaveny duálním procesorem a operačním systémem Windows XP, což nabízí rychlou práci s grafikou importovaných 3D modelů. (30,31)

3.3 Firma Exeron



Základem dnešního *Exeronu* byla německá firma *Herbert Walter*. Pan Walter svoji firmu založil v roce 1966. Nejdříve se specializovali na výrobu strojních dílů pomocí elektroerozivního obrábění. V roce 1975 se rozhodli pro vývoj vlastního stroje. První elektroerozivní hloubicí stroj byl dokončen v roce 1978 nesl typové označení **HW 103 V** a ještě ten rok se začalo s jeho sériovou výrobou. V roce 1981 je představeno první čtyřosé CNC řízení. V roce 1985 zase první elektroerozivní hloubicí stroj s portálovou konstrukcí nesoucí označení **Exeron 304**. Firma *Okuma Japan* se v roce 1991 stává společníkem *Walteru* a zahajují společný vývoj elektroerozivního drátového řezacího stroje s názvem **Exeron D 603**. Herbert Walter v roce 1995 prodává svůj podíl ve společnosti firmě *Okuma Japan*. Dnešní *Exeron* vzniká sloučením *Walter-exeron* a *Exeron-multiform* v roce 1999. (32,33)

Vývoj, konstrukce a montáž probíhá v německém sídle společnosti ve městě Fluorn-Winzeln. Zastoupení má firma v Evropě, Asii a USA. Firma se rovněž zabývá výrobou HSC obráběcích center. Na trh jich dodává 5 typů stejně jako elektroerozivních hloubicích strojů. V České republice *Exeron* zastupuje firma *Penta Trading, spol. s r.o.* (32,33)

Tab. 3.5 Porovnání modelů elektroerozivních hloubicích strojů firmy *Exeron*
(17,33,34,35,36,37)

Model	EDM 310	EDM 312	EDM 313
Typ konstrukce	„C“	„C“	Portálová
Rozsahy pojezdů X/Y/Z [mm]	350x270x270	450x300x300	620x420x400
Max. velikost obrobku X/Y/Z [mm]	770x520x300	900x520x300	1070x670x400
Max. váha elektrody [kg]	25	150	250
Max. váha obrobku [kg]	500	800	1500
Max. dosahovaná drsnost povrchu R_a^* [μm]	0,1	0,1	0,1
Nejmenší programovatelný krok [μm]	1	1	1
Vrcholový proud generátoru [A]	60	60	60
Automatické měření polohy obrobku	ANO	ANO	ANO
Objem dielektrika – nádrž [l]	400	750	1200
Operační systém	Exowin MF20	Exowin MF20	Exowin MF20
Ruční řízení	ANO	ANO	ANO
Přívodní napětí [V]	400	400	400
Příkon [kVA]	8	8	12
Rozměry stroje D/V/Š [mm]	1812x2221x1550	1910x2300x1798	2315x2450x2430
Váha stroje [kg]	1650	3300	4400
Zvláštnosti / výbava	integrováný chladicí systém, modul optimalizace erodovacího procesu, vysouvací naplněná nádrž, propracované planetové cykly, měnič elektrod, upínací systém od firmy System 3R, Hirschmann nebo EROWA, atd.		

Tab. 3.6 Porovnání modelů elektroerozivních hloubicích strojů firmy *Exeron* (17,33,34,35,36)

Model	EDM 314	EDM 316	EDM 316 XXL
Typ konstrukce	Portálová	Portálová	Portálová
Rozsahy jezdů X/Y/Z [mm]	900x750x450	1500x1150x600	1800x1150x600
Max. velikost obrobku X/Y/Z [mm]	1200x900x500	1800x1400x750	2200x1400x750
Max. váha elektrody [kg]	500	1000	1000
Max. váha obrobku [kg]	3000	8000	8000
Max. dosahovaná drsnost povrchu R_a^* [μm]	0,1	0,1	0,1
Nejmenší programovatelný krok [μm]	1	1	1
Vrcholový proud generátoru [A]	60	100	100
Automatické měření polohy obrobku	ANO	ANO	ANO
Objem dielektrika – nádrž [l]	1800	5000	6000
Operační systém	Exowin MF20	Exowin MF20	Exowin MF20
Ruční řízení	ANO	ANO	ANO
Přívodní napětí [V]	400	400	400
Příkon [kVA]	12	18	18
Rozměry stroje D/V/Š [mm]	2200x3100x3410	2600x3800x4700	2600x3800x5500
Váha stroje [kg]	8000	10000	12000
Zvláštnosti / výbava	integrováný chladicí systém, modul optimalizace erodovacího procesu, vysouvací naplněná nádrž, propracované planetové cykly, měnič elektrod, upínací systém od firmy System 3R, Hirschmann nebo EROWA, atd.		

Stroje firmy *Exeron* jsou charakteristické svou jednoduchou a tuhou konstrukcí. Navrženy jsou tak, aby obsadily co nejmenší plochu. (37)

Pro maximální využití strojního času je možné aplikovat automatizovanou buňku **Exo-cell 100/8**. Skládající se ze dvou elektroerozivních hloubicích strojů **Exeron EDM 312** a **Exeron EDM 313** a robotizovaného ramene firmy *FANUC*, který oba stroje zásobuje elektrodami a paletami do hmotnosti 70 kg. Levnější alternativou je samostatný stroj **AWEX 100/5**, který obsluhuje každý hloubicí stroj zvlášť. Obsahuje čtyři palety pro obrobky do hmotnosti 60 kg a zásobník na 100 elektrod. (38)

Řídícím systémem je **Exowin MF20**, který je založen na operačním systému Windows. Jeho přednostmi jsou jednoduché ovládání, snadné programování, textová a grafická nápověda, automatická volba vhodných pracovních parametrů, grafická databanka všech používaných planetových cyklů, atd. Příkazy obsluha zadává jednak klávesnicí nebo pomocí dotykového displeje. (33,35,37)



Obr. 3.3 Exeron EDM 316 (34)

4 OSTATNÍ VÝROBCI A TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI JEJICH STROJŮ

4.1 Firma Mitsubishi



Výrobou elektroerozivních hloubicích strojů se zabývá firma *MC Machinery Systems*, která je součástí *Mitsubishi Corporation*. Firma byla založena počátkem 70. let. Její pole působnosti je značně široké. Produkty nacházejí využití např. v průmyslu strojírenském, chemickém, automobilovém, energetickém a potravinářském. První elektroerozivní hloubicí stroj byl vyroben v roce 1983. Nyní jich mají v nabídce pět. Firma má zastoupení po celém světě. V České republice je to firmou *EDM Trade*. (39)

Tab. 4.1 Porovnání modelů elektroerozivních hloubicích strojů firmy *Mitsubishi* (40,41,42,43)

Model	EA12V	EA28V	EA30E
Typ konstrukce	„C“	„C“	„C“
Rozsahy pojezdů X/Y/Z [mm]	400x300x300	650x450x350	700x500x350
Max. velikost obrobku X/Y/Z [mm]	800x550x250	1050x760x350	1170x800x350
Max. váha elektrody [kg]	50	200	200
Max. váha obrobku [kg]	700	2000	2000
Max. dosahovaná drsnost povrchu R_a^* [μm]	0,1	0,1	0,1
Nejmenší programovatelný krok [μm]	0,1	0,1	0,1
Vrcholový proud generátoru [A]	80	120	120
Automatické měření polohy obrobku	ANO	ANO	ANO
Objem dielektrika – nádrž [l]	340	390	670
Operační systém	WINDOWS XP	WINDOWS XP	WINDOWS XP
Ruční řízení	ANO	ANO	ANO
Přívodní napětí [V]	200/220	200/220	200/220
Příkon [kVA]	10,4	16,5	19,0
Rozměry stroje D/V/Š [mm]	2600x2365x3000	2430x2615x2510	2780x2495x3050
Váha stroje [kg]	3700	5400	6860
Zvláštnosti / výbava	Jednoduchý filtrační systém, příplatkový 120 A generátor, integrovaný chladicí systém, měnič elektrod, atd.	Integrovaný chladicí systém, jednoduchý filtrační systém, automatický mazací systém, rotační měnič elektrod s 20 pozicemi (příplatkově 40), atd.	

Oproti předchozím modelům došlo k přepracování konstrukce strojů. Díky tomu se zvýšila tuhost. Předností strojů je jeho řídicí systém, který je možné nalézt i u jiných firem zabývajících se výrobou EDM strojů. Nově byly přidány další módy vyplachování. Operátor může regulovat rychlost toku dielektrické kapaliny podle potřeby. *Mitsubishi* používá ve svých strojích jako filtry papírové cartridge, které zachytí i velice jemné nečistoty. Na všechny

elektroerozivní hloubicí stroje je možné aplikovat automatizovanou jednotku pro výměnu nástrojů a obrobků. (41,42,43)

4.2 Firma OPS-Ingersoll

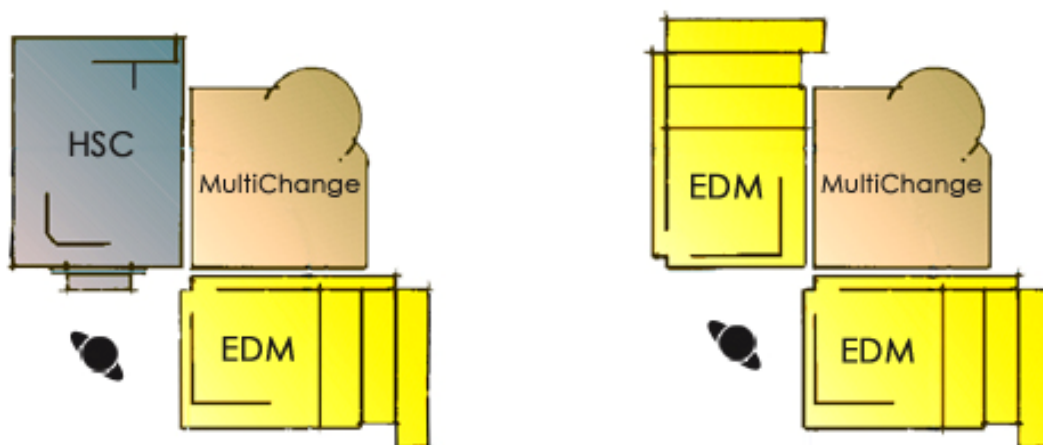


Firma vznikla v červnu roku 2003 sloučením podniků *OPS* a *Ingersoll*. *OPS-Ingersoll*, se sídlem v německém Burbachu, se specializuje na výrobu vysokorychlostních obráběcích center a elektroerozivních hloubicích strojů. Na výběr jich mají v nabídce šest. Největší zastoupení firmy je v Evropě, dále v USA, Asii a Austrálii. Českou republiku zastupuje firma *EDM Trade*. (44)

Tab. 4.2 Porovnání modelů elektroerozivních hloubicích strojů firmy *OPS-Ingersoll* (17,45,46)

Model	Gantry EAGLE 400	Gantry EAGLE 500	Gantry EAGLE 800
Typ konstrukce	Portálová	Portálová	Portálová
Rozsahy pojezdů X/Y/Z [mm]	420x300x400	525x400x450	550x850x450
Max. velikost obrobku X/Y/Z [mm]	645x495x335	765x665x415	795x1095x475
Max. váha elektrody [kg]	100	100	200
Max. váha obrobku [kg]	500	1000	2000
Max. úběr materiálu [mm ³ ·min ⁻¹]	500	500	500
Max. dosahovaná drsnost povrchu R _a * [μm]	0,2	0,2	0,2
Nejmenší programovatelný krok [μm]	1	1	1
Vrcholový proud generátoru [A]	60	60	60
Automatické měření polohy obrobku	ANO	ANO	ANO
Objem dielektrika – nádrž [l]	320	400	800
Operační systém	WINDOWS XP	WINDOWS XP	WINDOWS XP
Ruční řízení	ANO	ANO	ANO
Přívodní napětí [V]	400	400	400
Příkon [kVA]	10,5	10,5	10,5
Rozměry stroje D/V/Š [mm]	2780x2550x2093	3196x2653x2284	3236x2703x2789
Váha stroje [kg]	4140	5000	6840
Zvláštnosti / výbava	Příplatkový 110 A generátor, integrovaný chladicí systém, měnič elektrod, upínací systém od firmy System 3R, Hirschmann nebo EROWA, atd.		

OPS-Ingersoll na vývoji řídicího systému spolupracuje s firmou *Mitsubishi Electric*. Volitelným příslušenstvím jsou dvě automatizované jednotky sloužící k výměně nástrojů a obrobků. Obě jsou kompatibilní jak s HSC tak i s EDM stroji. Větší z nich s označením **MultiChange Performance** může obsahovat 10 palet na obrobky do hmotnosti 100 kg a zásobník na 70 elektrod. Obě jednotky je možno konfigurovat na přání zákazníka. Další možností je vytvoření výrobní buňky, skládající se ze dvou EDM strojů a automatizovaného výměníku nástrojů a obrobků (AVNO) nebo z HSC a EDM stroje a AVNO, tak jak je to naznačeno na obrázku (Obr. 4.1). (47)



Obr. 4.1 Schéma výrobní buňky (47)

4.3 Firma Ona



Španělská firma *Ona* se sídlem v Durangu byla založena roku 1952. Zpočátku se zabývala vývojem generátorů. Prvním vyrobeným EDM strojem byl v roce 1977 drátový řezací stroj. Firma již prodala více než 12 000 EDM strojů do 60 zemí světa. Strojů firmy *Ona* využívá řada předních výrobců automobilů (např. *Ford*, *Seat*, *Renault* a *Peugeot*). V současnosti firma nabízí 7 elektroerozivních hloubicích strojů. V České republice ji zastupuje společnost *CIM Group a. s.* (48)

Tab. 4.3 Porovnání modelů elektroerozivních hloubicích strojů firmy *Ona* (49,50)

Model	NX3	NX6	NX7
Typ konstrukce	„C“	„C“	„C“
Rozsahy pojezdů X/Y/Z [mm]	400x300x300	1000x600x500	1500x750x650
Max. velikost obrobku X/Y/Z [mm]	800x550x280	1650x950x550	2250x1250x650
Max. váha elektrody [kg]	100	400	400
Max. váha obrobku [kg]	750	4000	10000
Max. úběr materiálu [mm ³ ·min ⁻¹]	600	600	600
Max. dosahovaná drsnost povrchu R_a^* [μm]	0,1	0,1	0,1
Nejmenší programovatelný krok [μm]	1	1	1
Vrcholový proud generátoru [A]	100	100	100
Automatické měření polohy obrobku	ANO	ANO	ANO
Objem dielektrika – nádrž [l]	580	1650	3400
Operační systém	WINDOWS XP	WINDOWS XP	WINDOWS XP
Ruční řízení	ANO	ANO	ANO
Přívodní napětí [V]	220	220	220
Příkon [kVA]	10	11,5	13,5
Rozměry stroje D/V/Š [mm]	2190x2360x1880	3260x2880x3300	3860x3380x4525
Váha stroje [kg]	2600	7000	9000
Zvláštnosti / výbava	příplatkově 200 A nebo 400 A generátor, chladicí zařízení, integrovaný protizkratový systém, lineární měnič elektrod s 6 až 40 pozicemi, 15" LCD display, trackball, USB port, atd.		

Rámová konstrukce byla navrhována pomocí metody konečných prvků. Části stroje pod největším zatížením byly vyztuženy. Tím bylo dosaženo optimální tuhosti. Všechny modely obsahují kontrolní mechanismy zabezpečující optimální parametry v jiskřišti. Filtrování probíhá přes speciální filtrační zařízení, jehož základem je papír. Předností je dlouhá životnost papírových vložek (více než 10 000 hodin) a schopnost zachytit částice veliké 1 μ m. (49,50)

5 TECHNOLOGIE VÝROBY ELEKTROD

Jestliže chceme porovnávat měděné elektrody s grafitovými, tak grafitová je rychleji vyrobená, protože při obrábění grafitu použijeme větší posuvy a řeznou rychlost než při obrábění mědi. Grafitové elektrody jsou vhodné na hrubování, hluboké tvary a úzká žebra. Na výrobu elektrod se používají válcové polotovary nebo hranoly s čtvercovým či obdélníkovým průřezem.

Přesné elektrody se vyrábí na drahých přesných CNC strojích. Proto je nutné vyrábět je ekonomicky. Vhodné je umístění na upínací plochu stroje technologickou paletu nebo i více palet, na kterých je připevněno dostatečné množství stejných upínání jaké je ve vřetenu hloubicího stroje. Polotovary elektrod připevněné na držácích se upnou do připravených „hnízd“. Osy „hnízd“ jsou zaneseny do programu. CNC frézka je napojena na počítač programátora a obsluha přesune programy do počítače stroje. Obsluha CNC frézky umístí do zásobníku potřebné nástroje a stroj je připraven pracovat bezobslužně mnoho hodin podle složitosti elektrod a podle počtu obsazených „hnízd“. Jelikož obrábíme vysokými řeznými rychlostmi, používáme nástroje ze slinutých karbidů. Na každé elektrodě vyfrézujeme podle osy elektrody válcovou plochu nebo strany čtverce či obdélníka a to podle tvaru polotovaru. To nám usnadní práci při seřizování na hloubicím stroji. Vyrobená elektroda se změří na 3D souřadnicovém měřicím stroji způsobem porovnání digitálního modelu elektrody vůči elektrodě vyrobené.

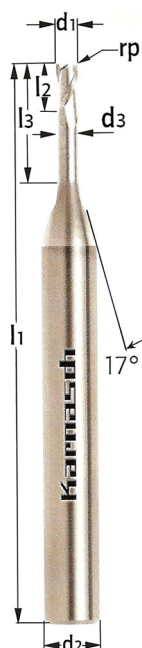


Obr. 5.1 Upínací paleta na frézce

5.1 Řezné podmínky obrábění mědi a grafitu

Pro porovnání řezných podmínek byly zvoleny nástroje německé firmy *Karnasch*. Konkrétně monolitní stopkové frézy určené na obrábění načisto.

Obě mají průměr šest milimetrů a dva zuby. První určená k obrábění hliníku, mědi, mosazi a umělé hmoty. Druhá opatřená diamantovým povlakem určená speciálně pro obrábění grafitu. (51,52)



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 [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	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. 5.2 Stopková fréza od firmy Karnasch (52,53)

5.2 Upínání elektrod

Je mnoho způsobů jak připevnit elektrodu na držák, který pak upneme do stroje. A je více druhů upnutí a upínacích systémů. Vhodné jsou systémy, při kterých můžeme elektrodu opakovaně z držáku sejmout a znovu ji na držák vrátit s tím, že elektroda bude vždy ve stejné poloze. Jedním z vhodných systémů je *3R Macro* a *3R Micro*.

Princip systému *3R Macro* spočívá v tom, že v elektrodě na horní upínací ploše jsou vyrobeny přesné otvory v přesných souřadnicích a otvor se závity. Elektroda se pak nasune na rozpínací kolíky na držáku a přitáhne šroubem nebo šrouby. Taková elektroda je pak snímatelná a při opakovaném upnutí je vždy ve stejné poloze. (54)

Systém *3R Micro*. Tento typ upínání se používá pro menší elektrody. Na polotovar elektrody je přilepen a šrouby připevněn nakoupený, přesně odlitý kovový díl, který zase umožní přesné opakované upnutí do vřetene hloubicího stroje. Tento díl zpravidla zůstává na elektrodě po celou její životnost. (54)

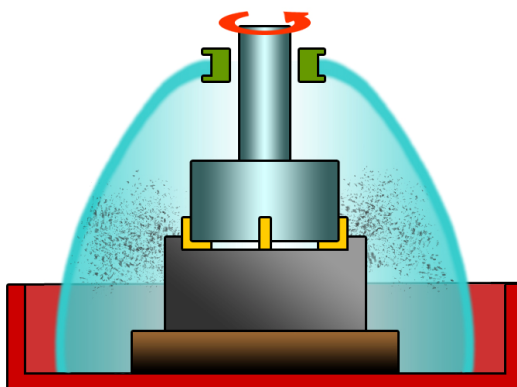


Obr. 5.3 Princip upínání elektrod systému 3R Macro

5.3 Specifika výroby grafitových elektrod

Samotný grafit se vyrábí například tvářením na izostatických lisech. Tento postup lisování vede k homogenním, izotropním grafitovým tělesům (kvádrové bloky a válce) ve velkých formátech. Pro výrobu elektrod tak nemá význam, zda se materiál odebírá z jádra nebo z okrajových partií. Pro volbu správného grafitu na dané obrábění je charakteristická jeho zrnitost a pórovitost. (55)

Pro obrábění grafitu se používají zpravidla konvenční CNC frézky, ale i speciální centra obrábění grafitu. Řezným nástrojem bývají dvou až čtyřbřité frézy opatřeny polykrystalickým diamantovým povlakem, který zvyšuje životnost nástroje. Při obrábění na sucho může být problémem prachový grafit z obráběného dílce, který značně znečišťuje okolí, ubírá životnosti nástrojů a zhoršuje jakost obrobeného povrchu. Řešením je odsávání z místa řezu, případně odclonění odlétajícího prachu. Zajímavým řešením je frézování uvnitř vodního zvonu. Pomocí kruhové trysky se vytváří vodní závěs okolo pracovní oblasti. Do pracovní oblasti lze volně nahlédnout. Pomocí mobilního systému lze zařízení připojit k různým strojům. Ke sběru vody slouží separátní jímací nádoba. V případě zpracování za mokra se prach z opracování kompletně váže bezprostředně v místě vzniku. (14,55,56,57,58)



Obr. 5.4 Obrábění grafitu ve vodním zvonu

Grafitové elektrody je také možné lepit, což se často preferuje před jinými technikami spojování. Malé průměry se účelně lepí pomocí takzvané

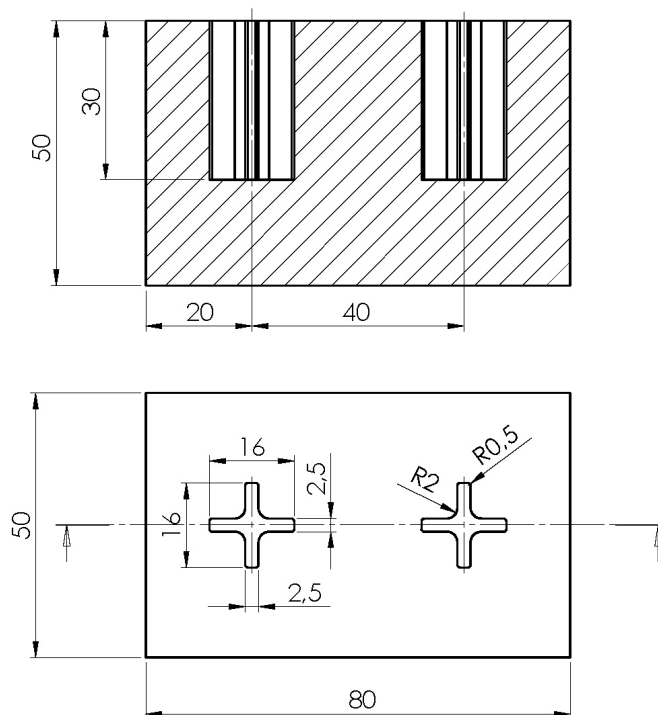
bleskových lepidel na bázi kyanakrylátu. Tenký film lepidla těchto nízkoviskozních lepidel nevede k porušení toku elektrického proudu. Tím je umožněno i nasazení elektrod lepených napříč ke směru erodování. U větších průměrů se doporučuje používat dvoukontaktní pryskyřice, které dovolují delší doby opracování než kyanakrylátová lepidla. Na základě izolačních účinků je třeba elektricky přemostit horizontálně probíhající spáru lepení, např. použitím montážních kolíků z grafitu. (14,55)

6 DOPORUČENÍ PRO STŘEDNÍ STROJÍRENSKOU FIRMU CHARAKTERU NÁSTROJÁRNY

Doporučení se týká firmy *Tokoz*, která vypsala výběrové řízení na nákup nového elektroerozivního hloubicího stroje. Firma vlastnila starší model *Agie Charmilles Innovation 2*. Ten už nesplňoval požadavky na čas obrábění a velikost obrobku, který je možné ještě upnout ve stroji. (59)

Do výběrového řízení byly vybrány čtyři elektroerozivní hloubicí stroje. Konkrétně se jednalo o stroje firem *Agie Charmilles* (model **Roboform 550** a **HyperSpark™ 3 HS**), *OPS-Ingersoll* (model **Gantry 880**) a *Exeron* (model **EDM 313**). Součástí testů bylo porovnání strojů z hlediska výrobních časů, kvality povrchu a přesnosti výroby obrobené součásti. (59)

Zadáním bylo vyhloubení geometricky definované dutiny tvaru kříže (Obr. 6.1) jednak měděnou elektrodou (hrubovací a dokončovací), tak i grafitovou elektrodou (hrubovací a dokončovací). Materiálem polotovaru byla ocel ČSN 41 9552 tvrdosti 55 ± 1 HRC. Požadavkem bylo dodržení tolerance rozměrů dutiny ($\pm 0,02$ mm) a průměrnou aritmetickou úchytku profilu $R_a = 3 \mu\text{m}$. (59)



Obr. 6.1 Obrobek (59)

Vlastní hloubení probíhalo u firem zastupujících výrobce. Jak je patrné z tabulky (Tab. 6.1) požadovanou drsnost povrchu splnily všechny stroje. Stejně tak i kontrolovaný rozměr dutiny byl v toleranci u všech testovaných strojů. Značné rozdíly jsou patrné při porovnání výrobních časů. Obecně lze říci, že hloubení grafitovou elektrodou v porovnání s měděnou je rychlejší. To je dáno možností většího proudového zatížení grafitu (cca 12 A/cm^2). U mědi je to přibližně 8 A/cm^2 . U modelu **EDM 313** firmy *Exeron* je však tento rozdíl zanedbatelný. Nejhorší v testu rychlosti hloubení dopadl model **Gantry 800**

firmy *OPS-Ingersoll*, který při použití měděné elektrody hrubovací a dokončovací dutinu hloubil 2 hodiny a 37 minut. Naopak nejlépe se jeví oba modely firmy *Agie Charmilles*. Při použití grafitových elektrod jsou výrobní časy obou modelů prakticky totožné. Liší se při užití měděných elektrod, kdy lepších výsledků dosahuje model **HyperSpark™ 3 HS**. (59)

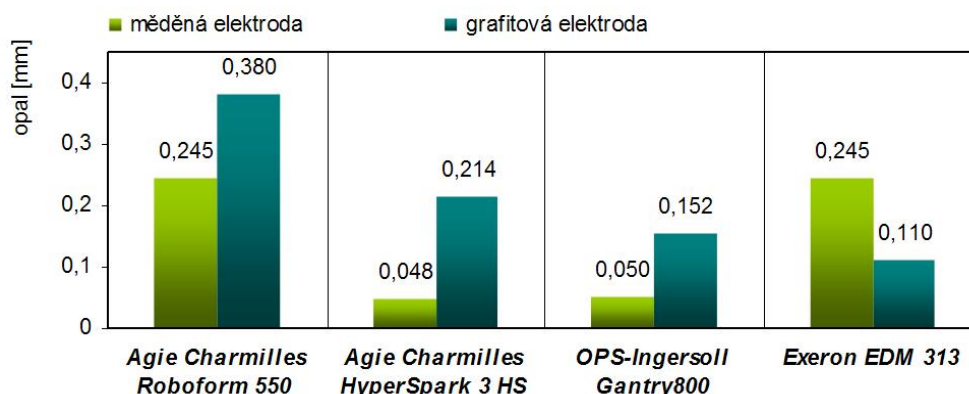
Tab. 6.1 Výsledky testů výrobních časů a kvality povrchu (59)

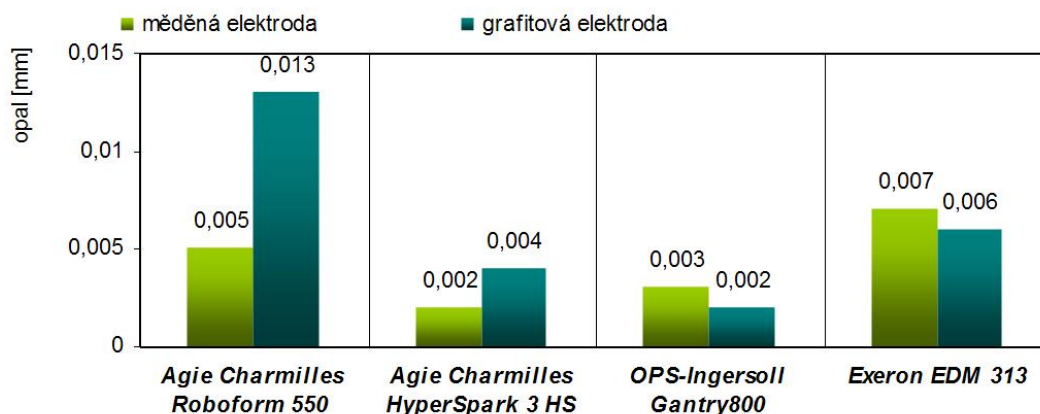
	Měděná elektroda		Grafitová elektroda		Povrch		Kontrol. rozměr	
	hrubování	dokončov.	hrubování	dokončov.	28 VDI / 3 R _a		2,5 mm	
					měď	grafit	měď	grafit
Agie Charmilles Roboform 550	1 hod 56 min	21 min	1 hod 19 min	20 min			2,52	2,51
	2 hod 17 min		1 hod 39 min					
Agie Charmilles HyperSpark™ 3 HS	1 hod 22 min	32 min	1 hod 24 min	16 min			2,52	2,50
	1 hod 54 min		1 hod 40 min					
OPS-Ingersoll Gantry 800	1 hod 42 min	55 min	1 hod 45 min	17 min			2,49	2,51
	2 hod 37 min		2 hod 3 min					
Exeron EDM 313	1 hod 16 min	58 min	1 hod 37 min	33 min			2,48	2,51
	2 hod 14 min		2 hod 10 min					
TOKOZ Agie Innovation2	2 hod 22 min	53 min	1 hod 57 min	48 min				
	3 hod 15 min		2 hod 45 min					

Pozn.: Ceny modelů: **Roboform 550** - 205 930 €, **HyperSpark™ 3 HS** – 178 000 €, **Gantry 800** – 189 000 €, **EDM 313** – 164 560 €.

V následujících dvou grafech je uvedeno srovnání opalu elektrod. Hrubovací elektrody mají vždy větší opal, protože je odebráno větší množství materiálu a proudové zatížení je rovněž větší. Nejlepších výsledků dosahuje model **HyperSpark™ 3 HS**, jelikož i při relativně nízkých hodnotách opalu stroj hloubí nejrychleji z testovaných modelů. **Gantry 800** sice vykazuje hodnoty opalu velice příznivé, avšak za cenu značné časové náročnosti hloubení. K největšímu opotřebení docházelo u stroje **Roboform 550**, a to převážně při užití grafitových elektrod. (59)

Opal čela elektrod - hrubování

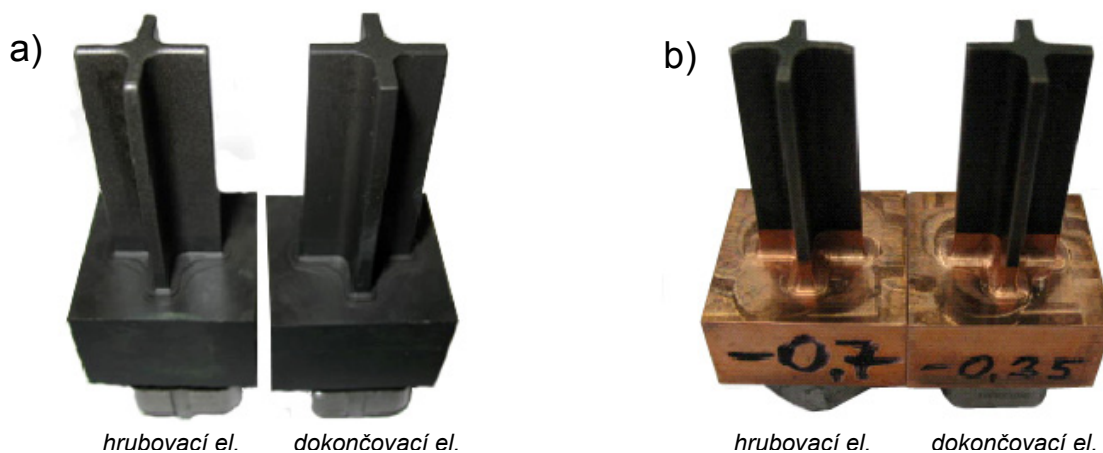


Opal čela elektrod - obrábění načisto

Obr. 6.2 Opal čela elektrod při hrubování a obrábění načisto (59)

Pozn.: S opalem elektrod je počítáno při výběru strategie hloubení. Přibližnou hodnotu lze vyhledat v tabulkách dodávaných výrobcí strojů.

Frézování testovací měděné elektrody trvalo 54 minut a grafitové 19 minut. Úspora strojního času při užití grafitu je tedy 65%. Opracování grafitu vyžaduje frézky schopny obrábět vysokými otáčkami ($n = 50\,000\text{ min}^{-1}$). (59)



Obr. 6.3 Opotřebované elektrody - a) grafitové, b) měděné (59)

Doporučení:

Na základě těchto dostupných informací nejpříznivějších výsledků dosáhl model **HyperSpark™ 3 HS** švýcarské firmy **Agie Charmilles**. Při požadované přesnosti hloubení a drsnosti povrchu obráběl nejrychleji z testovaných elektroerozivních hloubicích strojů. Cena je ve srovnání s ostatními modely rovněž vyhovující (178 000 €).

7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Technicko-ekonomické zhodnocení bylo provedeno na výrobě dvoudutinové formy (Obr. 7.1). Hloubicí stroj byl použit *Agie Charmilles Innovation 2*. Na hloubení formy bylo třeba 56 kusů měděných elektrod. Strojní čas obrábění měděných elektrod činil 161 hodin. Odhadnutý strojní čas obrábění grafitu při úspoře 65% je přibližně 57 hodin. Při sazbě 690 Kč za hodinu práce stroje a rozdílu strojních časů 104 hodiny činí úspora 71 760 Kč, zvolíme-li materiál nástrojových elektrod grafit. (59)

V tabulce (Tab. 7.1) je uvedeno srovnání časových a finančních úspor nových modelů elektroerozivních hloubicích strojů v porovnání se starším strojem *Agie Charmilles Innovation 2*. Strojní čas hloubení formy měděnými elektrodami byl 158 hodin. (59)

Tab. 7.1 Úspory při hloubení dvoudutinové formy MAKITA novými stroji.

	Rozdíl při hloubení mědí	Rozdíl při hloubení grafitem	Časová úspora hloubení mědí	Časová úspora hloubení grafitem	Finanční úspora hloubení mědí	Finanční úspora hloubení grafitem
Agie Charmilles <i>Roboform 550</i>	30 %	40 %	47,4 hod	63,2 hod	22 278 Kč	29 704 Kč
Agie Charmilles <i>HyperSpark™ 3 HS</i>	41 %	40 %	64,8 hod	63,2 hod	30 456 Kč	29 704 Kč
OPS-Ingersoll <i>Gantry 800</i>	20 %	25 %	31,6 hod	39,5 hod	14 852 Kč	18 565 Kč
Exeron <i>EDM 313</i>	31 %	21 %	49,0 hod	33,2 hod	23 030 Kč	15 604 Kč

Pozn.: Náklady na hodinu práce elektroerozivního hloubicího stroje je 470 Kč·h⁻¹.

Příklad výpočtu:

Porovnání stroje *Exeron EDM 313* s *Agie Charmilles Innovation 2*.

Čas hloubení měděnou elektrodou strojem *Innovation 2* 3 hod 15 min (3,25 hod)
Čas hloubení grafitovou elektrodou strojem *Innovation 2* 2 hod 45 min (2,75 hod)
Čas hloubení měděnou elektrodou strojem *EDM 313* 2 hod 14 min (2,23 hod)
Čas hloubení grafitovou elektrodou strojem *EDM 313* 2 hod 10 min (2,16 hod)
Čas hloubení dvoudutinové formy strojem *Innovation 2* 158 hod
Náklady na hodinu práce elektroerozivního hloubicího stroje Nhs. 470 Kč·h⁻¹

úspora času hloubení měděnou elektrodou:

$$u_m = 100\% - \frac{2,23 \cdot 100}{3,25} = \underline{31\%} \quad (7.1)$$

úspora času hloubení grafitovou elektrodou:

$$u_g = 100\% - \frac{2,16 \cdot 100}{2,75} = \underline{21\%} \quad (7.2)$$

úspora času hloubení dvoudutinové formy měděnou a grafitovou elektrodou:

158 hod 100 %	158 hod 100 %	(7.3), (7.4)
x hod 31 %	x hod 21 %	

$$x = 158 \cdot \frac{31}{100} = 49,0$$

$$t_{UM} = \underline{49,0 \text{ hod}}$$

$$x = 158 \cdot \frac{21}{100} = 33,2$$

$$t_{UG} = \underline{33,2 \text{ hod}}$$

finanční úspora hloubení dvoudutinové formy měděnou a grafit. elektrodou:

$$F_{UM} = t_{UM} \cdot Nhs \quad (7.5)$$

$$F_{UM} = 49,0 \cdot 470 = \underline{23030 \text{ Kč}}$$

$$F_{UG} = t_{UG} \cdot Nhs \quad (7.6)$$

$$F_{UG} = 33,2 \cdot 470 = \underline{15604 \text{ Kč}}$$



Obr. 7.1 Forma pro tlakové lití (59)

V následující tabulce (Tab. 7.2) je uvedeno porovnání celkových nákladů výroby dvoudutinové formy **MAKITA**. Forma byla vyrobena pomocí měděných elektrod strojem **Agie Charmilles Innovation 2** a celkové výrobní náklady činily 185 350 Kč. Jestliže bychom tuto formu hloubili strojem **Agie Charmilles HyperSpark™ 3 HS** a použili grafitové elektrody, náklady by činily 83 886 Kč. (59)

Tab. 7.2 Porovnání výrobních nákladů (59)

Agie Charmilles *Innovation 2*

Strojní čas obrábění měděných elektrod	161 hodin	111 090 Kč
Strojní čas hloubení formy měděnými elektrodami	158 hodin	74 260 Kč
Celkové náklady		185 350 Kč

Agie Charmilles *HyperSpark™ 3 HS*

Strojní čas obrábění grafitových elektrod	57 hodin	39 330 Kč
Strojní čas hloubení formy grafitovými elektrodami	94,8 hodin	44 556 Kč
Celkové náklady		83 886 Kč

Jak je patrné, celková úspora hloubení elektroerozivním hloubicím strojem **Agie Charmilles *HyperSpark™ 3 HS*** je téměř 55% a rozdíl nákladů 101 464 Kč. Rozdíl je dán jednak desetiletým vývojem mezi oběma stroji, tak i využitím grafitu. Grafitové elektrody jsou rychleji obrobené a samotné hloubení také trvá kratší dobu.

Provozní náročnost elektroerozivního hloubení

Vložky filtračního zařízení se mění zhruba po 10 000 hodinách provozu. Obsluha kontroluje tlak na manometru. Jestliže překročí určitou hodnotu, znamená to, že průchodnost filtračního zařízení je příliš nízká a filtr se musí vyměnit. Cena papírového filtru se pohybuje kolem 500 Kč. (2,9)

U dielektrika se doporučuje kompletní výměna jednou ročně. V praxi se spíše používá průběžné dolívání nového dielektrika do nádrže. Cena se pohybuje kolem 90 Kč/l. (2,9)

ZÁVĚR

Budoucnost elektroerozivní hloubicí technologie je v dohledné době jistě příznivá. Vývoj EDM strojů je komplexní záležitostí a zasahuje celou řadu oblastí. Pokrok je patrný při porovnání nového stroje s deset let starým. Z rozboru technicko-ekonomického hodnocení je patrné, že při nasazení nového elektroerozivního hloubicího stroje a využitím vlastností grafitu by výrobní náklady formy klesly o téměř 55%. Dá se však do jisté míry očekávat, že rozvoj HSC frézování a stále dokonalejší řezné materiály schopné efektivně obrábět kalenou ocel částečně nahradí potřebu užití EDM strojů. Na trhu dnes existují takzvané mikronástroje, tzn. frézy o průměru až 0,05 mm, schopné obrábět velice jemné detaily. Avšak tam, kde potřebujeme ostré hrany v dutině formy nebo se jedná o tvary nemožné frézovat, je elektroerozivní hloubení nezastupitelné. Dalším kladem této technologie je skutečnost, že dosahovaná geometrická přesnost a jakost povrchu obrobené součásti je srovnatelná s broušením. Složité tvary forem prakticky vylučují nasazení brousicích operací. Vývoj elektroerozivního hloubení postupuje ruku v ruce s rozvojem HSC obrábění. V budoucnu se bude klást větší důraz na maximálně možné využití HSC obrábění. Nasazení elektroerozivního stroje po nahrubování značně zkrátí strojní časy výroby forem.

Trendy se budou dále ubírat k větší automatizaci a bezobslužnosti obrábění. Výroba se bude více soustředit jednak do výrobních buněk a do větších výrobních celků. Například několik elektroerozivních strojů společně s HSC obráběcím centrem je zásobováno robotem, který mění nástroje a obrobky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 1989. 122 s. 6523.
2. *Příručka k zařízení AGIETRON Impact, Innovation, Exact*. [CD-ROM]. c2001, [citováno 15. března 2008].
3. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
4. *Versatility in ED die sinking*. Agie Charmilles Group. 20 s.
5. KOČMAN, K., PROKOP, J. Nekonvenční metody obrábění. In *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. ISBN 80-214-1996-2. Kapitola 11, s. 205-220.
6. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Tiskové středisko ZČU, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
7. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. Nekonvenční metody obrábění. *MM – průmyslové spektrum*, MM 2007/7. s. 60. ISSN 1212-2572.
8. POSLUŠNÝ, Petr. Elektroerozivní obrábění. *MM – průmyslové spektrum*, MM 2006/7. s. 37. ISSN 1212-2572.
9. *Manuál Roboform 350/550*. [CD-ROM]. Ver. 1.6.3:1.2. [citováno 2. března 2008].
10. MIKULČÁK, J., KRKAVEC, L., KLIMEŠ, B., PAUKOVÁ, M. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*. 3. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1968. 288 s. 1197.
11. *Carbon*. [online]. [citováno 12. února 2008]. Dostupné z: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon>>
12. *Cuprum*. [online]. [citováno 12. února 2008]. Dostupné z: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Cuprum>>
13. *Tungsten*. [online]. [citováno 12. února 2008]. Dostupné z: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Tungsten>>
14. ATIUR. *Obecné charakteristiky grafitu*. [online]. [citováno 18. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.atiur.cz/>>
15. TEDOK, spol. s r. o. *Tabulka správné volby grafitu*. [online]. [citováno 16. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.tedok.cz/tabulka-spravne-volby>>
16. AGIE CHARMILLES GROUP. *Historical Milestones 1861-2007*. [online]. [citováno 14. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.gfmc.com/gfmc/company/history.html>>
17. *Senkenerodieren*. Werkzeug & formenbau. 9 s.

18. AGIE CHARMILLES GROUP. *Hyperspark HS*. [online]. [citováno 14. února 2008]. Dostupné z: <http://www.us.gfac.com/newsroom/literature/serve_lit.cfm?litID=17>
19. AGIE CHARMILLES GROUP. *Die Sinking EDM*. [online]. [citováno 14. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.gfac.com/gfac/products/die-sinking-edm.html>>
20. AGIE CHARMILLES GROUP. *Mikro TEC*. [online]. [citováno 14. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.charmillesus.com/newsroom/literature/Charmilles/ROBOFORM350 MicroTEC US.pdf>>
21. AGIE CHARMILLES GROUP. *Roboform 53P*. [online]. [citováno 14. února 2008]. Dostupné z: <http://www.us.gfac.com/newsroom/literature/serve_lit.cfm?litID=44>
22. SODICK. *Milestones*. [online]. [citováno 26. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.sodick.jp/company/milestones.html#genesis>>
23. SODICK. *Die sinker EDM*. [online]. [citováno 26. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.sodick.jp/product/dedm/index.html>>
24. SODICK. AQ35L. [online]. [citováno 26. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.sodick.com/files/library/AQ35L.pdf>>
25. SODICK. AQ55L. [online]. [citováno 26. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.hybridedm.com/files/library/AQ55L.pdf>>
26. AQ75L. Sodick. 2 s.
27. SODICK. AP1L. [online]. [citováno 26. února 2008]. Dostupné z: <www.ichungary.hu/letoltes/ap1l.pdf>
28. AQ15L. Sodick. 16 s.
29. SODICK. AD3L. [online]. [citováno 26. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.sodick.com/files/library/AD3L.pdf>>
30. SODICK. *Sodick product news*. [online]. [citováno 26. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.sodick.de/cms/files/14-pager-cz.pdf>>
31. *Sodick lineární pohony*. [online]. [citováno 23. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.cnc-stroje.cz/obrabeci-stroje/linearni-pohony-vice>>
32. EXERON. *Company history*. [online]. [citováno 4. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.exeron.de/ceasy/modules/cms/main.php5?cPagelId=110>>
33. PENTA TRADING, spol. s r.o. *Exeron brožura*. [online]. [citováno 4. března 2008]. Dostupné z: <http://www.onlineservices.cz/penta/vyvoj_test/foto/clanky_produkty/prilohy/EXERON%20zlom__207.pdf>
34. EXERON. *EDM line overview*. [online]. [citováno 4. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.exeron.de/ceasy/modules/cms/main.php5?cPagelId=112>>
35. PENTA TRADING, spol. s r.o. *Elektroerozivní hloubičky*. [online]. [citováno 4. března 2008]. Dostupné z:

<http://www.onlineservices.cz/penta/vyvoj_test/foto/clanky_produkty/prilohy/1203419890__211.pdf>

36. Exeron – řešení pro elektroerozi. *Technik*, T 2006/12. s. 55.
37. *Senkerodiermaschine EDM 310*. Exeron. 2 s.
38. PENTA TRADING, spol. s r.o. *Automatizace*. [online]. [citováno 4. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.penta-edm.cz/>>
39. MITSUBISHI. *Corporate history*. [online]. [citováno 12. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.mitsubishicorp.com/en/about/history/index.html>>
40. MITSUBISHI. *Sinker EDM overview*. [online]. [citováno 12. března 2008]. Dostupné z: <http://www.mitsubishi-world.com/index.php?option=com_content&task=view&id=104&Itemid=680>
41. MITSUBISHI. *New-design Die-sinking EDM „EA12V“*. [online]. [citováno 12. března 2008]. Dostupné z: <http://www.global.mitsubishielectric.com/pdf/advance/vol112/112_TR8.pdf>
42. TALTEK. *EA28V CNC Sinker EDM*. [online]. [citováno 12. března 2008]. Dostupné z: <http://www.taltek.com/downloads/SinkerEDM/SinkerEDM_EA28V.pdf>
43. TALTEK. *EA30E CNC Sinker EDM*. [online]. [citováno 12. března 2008]. Dostupné z: <http://www.taltek.com/downloads/SinkerEDM/SinkerEDM_EA30E.pdf>
44. OPS-INGERSOLL. *Enterprise history*. [online]. [citováno 21. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.ops-ingersoll.de/company/history/content/page/history.html>>
45. OPS-INGERSOLL. *EDM - program*. [online]. [citováno 21. března 2008]. Dostupné z: <http://www.ops-ingersoll.de/products/pro_sparkerosion/products/group/sparkerosion/0.html>
46. OPS-INGERSOLL. *Broschure Gantry Eagle*. [online]. [citováno 21. března 2008]. Dostupné z: <http://www.ops-ingersoll.de/includes/download.php?file=modules/products/attachments/218&art=pdf&name=ops_products_gantryeagle400_Broschuere_GantryEagle_ENG>
47. OPS-INGERSOLL. *OPS-INGERSOLL Automation*. [online]. [citováno 21. března 2008]. Dostupné z: <http://www.ops-ingersoll.de/includes/download.php?file=modules/products/attachments/178&art=pdf&name=ops_products_moldcenter OPS-INGERSOLL%20Automation>
48. ONA. *Company history*. [online]. [citováno 26. března 2008]. Dostupné z: <http://www.ona-electroerosion.com/eng/compania/prin_comp.html>
49. ONA. *Product*. [online]. [citováno 26. března 2008]. Dostupné z: <http://www.ona-electroerosion.com/eng/compania/prin_comp.html>

50. ONA. *ONA NX series*. [online]. [citováno 26. března 2008]. Dostupné z: <www.ona-electroerosion.com/eng/productos/NX-INGLeS-MM.pdf>
51. PRŮŠA, Vojtěch. Nové kopírovací mikrofrézy. *MM – průmyslové spektrum*, MM 2007/4. s. 58. ISSN 1212-2572.
52. *Schnittdaten Fräsen 2007/2008*. Karnasch GmbH. 50 s.
53. *Professional Tools - price list 2007/2008*. Karnasch GmbH. 73 s.
54. SYSTEM 3R. [online]. [citováno 11. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.system3r.com>>
55. *Grafit EDM Ringsdorff*. Ringsdorff. 17 s.
56. JASPAR, Jiří. Speciality pro výrobu nástrojů a forem. *MM – průmyslové spektrum*, MM 2006/4. s. 105. ISSN 1212-2572.
57. JASPAR, Jiří. Nástroje pro obrábění grafitu. *MM – průmyslové spektrum*, MM 2006/10. s. 82. ISSN 1212-2572
58. MAŘATA, Ladislav. Sací a foukací systém pro obrábění. *MM – průmyslové spektrum*, MM 2004/5. s. 54. ISSN 1212-2572.
59. TOKOZ. *Investice 2007 – Elektroerozivní hloubička*. [CD-ROM]. c2007, [citováno 24. března 2008].

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
a_p	[mm]	šířka záběru ostří
d	[mm]	rozměr nástrojové elektrody
D	[mm]	rozměr dutiny
f	[Hz]	frekvence
F_{UG}	[Kč]	finanční úspora hloubení grafitovou elektrodou
F_{UM}	[Kč]	finanční úspora hloubení měděnou elektrodou
f_z	[mm]	posuv na zub
GAP	[mm]	velikost pracovní mezery
I	[A]	proud
I_e	[A]	střední vybíjecí proud
M	[mm]	vůle mezi elektrodou a obrobkem
m_N	[g]	hmotnost nástrojové elektrody
m_O	[g]	hmotnost obrobku
n	[min ⁻¹]	otáčky
N_{hs}	[Kč·h ⁻¹]	náklady na hodinu provozu elektroerozivního hloubicího stroje
R_a	[μm]	střední aritmetická úchylka profilu
R_{max}	[μm]	maximální výška nerovnosti
t	[s]	čas
T	[μs]	doba periody
t_0	[μs]	prodleva
t_d	[μs]	zpoždění výboje
t_e	[μs]	doba trvání výboje
t_i	[μs]	doba impulzu
T_{TAV}	[°C]	teplota tavení
t_{UG}	[hod]	časová úspora hloubení grafitovou elektrodou
t_{UM}	[hod]	časová úspora hloubení měděnou elektrodou
U	[V]	napětí
U_e	[V]	střední vybíjecí napětí
u_g	[%]	úspora času hloubení grafitovou elektrodou
U_k	[V]	napětí při zhasnutí výboje
u_m	[%]	úspora času hloubení měděnou elektrodou

U_Z	[V]	napětí na prázdno
v_c	$[m \cdot min^{-1}]$	řezná rychlost
v_f	$[mm \cdot min^{-1}]$	posuvová rychlost
V_N	$[mm^3 \cdot min^{-1}]$	opotřebení na nástrojové elektrodě
V_O	$[mm^3 \cdot min^{-1}]$	úběr na obrobku
W_i	[J]	energie impulzu
δ	[mm]	celková chyba obrábění
δ_{ER}	[mm]	chyba daná podstatou elektroerozivního obrábění
$\delta_{NÁST}$	[mm]	výrobní nepřesnost nástrojové elektrody
δ_{ST}	[mm]	chyba obráběcího stroje způsobená deformacemi a nepřesnostmi pohybových mechanismů a polohovacího mechanismu nástrojových elektrod
δ_T	[mm]	chyba vzniklá oteplením během obrábění
λ	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	tepelná vodivost
v	[-]	relativní objemové opotřebení
ρ	$[n\Omega \cdot m]$	měrný elektrický odpor
ρ_N	$[g \cdot cm^{-3}]$	hustota materiálu nástrojové elektrody
ρ_O	$[g \cdot cm^{-3}]$	hustota materiálu obrobku
CM	[-]	chemické obrábění
CNC	[-]	počítačové řízení obrábění
EBM	[-]	obrábění paprskem elektronů
ECM	[-]	elektrochemické obrábění
EDM	[-]	elektroerozivní obrábění
HSC	[-]	vysokorychlostní obrábění
LBM	[-]	obrábění paprskem laseru
PBM	[-]	obrábění paprskem plazmy
SK	[-]	slinutý karbid
USM	[-]	obrábění ultrazvukem
WJM	[-]	obrábění paprskem vody

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 3D souřadnicový měřicí stroj.

Příloha 2 Výkres elektrody - nájezdy os hloubení pro obsluhu stroje.

PŘÍLOHA 1



PŘÍLOHA 2

