



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## MODERNÍ METODY ELEKTRO-EROZIVNÍHO, NAVAZUJÍCÍ DOKONCOVACÍ METODY

MODERN METHODS OF ELECTROEROSION MACHINING INCLUDING CONSEQUENTIAL  
FINISHING METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAN KALENDA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. OSKAR ZEMCÍK, Ph.D.

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2007/08

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Kalenda Jan

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

### **Moderní metody elektro-erozivního obrábění, navazující dokončovací metody**

v anglickém jazyce:

### **Modern methods of electroerosion machining including consequential finishing methods**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popis, charakteristika metod. Příklady využití, zhodnocení a předpoklady do budoucna.

Cíle bakalářské práce:

- Základní metody elektroerozivního obrábění.
- Oblasti použití elektroerozivního obrábění.
- Používané dokončovací metody.
- Příklady využití.
- Zhodnocení vybraných metod, včetně technicko-ekonomického využití.
- Srovnání metod a předpoklady do budoucna.

## Seznam odborné literatury:

1. KARAFIÁTOVÁ, S., LANGER I. Nekonenční technologie. Havlíčkův Brod: Fragment, 1998. ISBN 80-7200-296-1
2. KOČMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. Technologie obrábění. Brno : Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. MÁDL, Jan. Technologie obrábění. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2000. 3 sv. (79, 86, 81 s.). ISBN 80-01-02091-6.
4. KAFKA, J., VRABEC, M. Technologie obrábění. Praha: ČVUT, 2006. 120s. ISBN 80-01-01355-3.

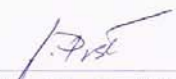
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

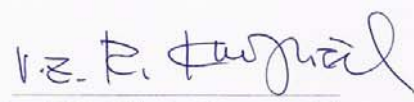
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 28.11.2007

L.S.



  
doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

  
doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

**LICENČNÍ SMLOUVA  
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO**

uzavřená mezi smluvními stranami:

**1. Pan**

Jméno a příjmení: Jan Kalenda

Bytem: Hornice 25, 67532

Narozen (datum a místo): 23.03.1984 v Třebíči

(dále jen „autor“)

a

**2. Vysoké učení technické v Brně**

Fakulta strojního inženýrství

se sídlem Technická 2896/2, 616 69 Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

**Článek 1  
Specifikace školního díla**

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Moderní metody elektro-erozivního obrábění, navazující dokončovací metody

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

Ústav: Ústav strojírenské technologie

Datum obhajoby VŠKP: červen

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

tištěné formě – počet exemplářů .....2.....

elektronické formě – počet exemplářů .....1.....

\* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

#### Článek 2 Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

#### Článek 3 Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 23.4.2008

.....  
doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

.....  
Autor: Jan Kalenda

## ABSTRAKT

V bakalářské práci je zpracováno téma moderní metody elektroerozivního obrábění včetně jejich navazujících dokončovacích metod. Základní rozdělení, použitelnost ve výrobě a porovnání metod včetně technickoekonomického využití.

### Klíčová slova

Metody elektroerozivního obrábění, dokončovací metody

## ABSTRACT

In bachelor work are processed motive modern methods of electroerosion machining including consequential finishing methods, their basic fission and application in manufacture and comparison method including technical economic use.

### Key words

Methods of electroerosion machining, finishing methods

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KALENDA, Jan. *Název: Moderní metody elektroerozivního obrábění, navazující dokončovací metody.* Technická 2896/2 Brno 616 69: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2008. Počet stran 30, Vedoucí práce. ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Moderní metody elektroerozivního obrábění, navazující dokončovací metody* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....  
Podpis bakaláře

## **Poděkování**

Děkuji tímto ing. Oskaru Zemčikovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

## ÚVOD

Elektro-erozivní obrábění patří k jedné z kapitol Strojírenské technologie. Její vývoj začal kolem 40let 20.století pro vojenský průmysl. Hlavními průkopníky v nové formě obrábění bylo Švýcarsko, Rusko a také USA. V poslední době jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu obrobené plochy, na přesnost obrobku a na vysokou produktivitu obrábění. Mnohem častěji se obrábí těžko obrobitelné materiály, což má za následek používání nástrojů z nových materiálů. Tyto nástroje dosahují vysoké řezné rychlosti, mají vysokou pevnost a jsou schopny obrábět materiál s vysokou přesností. Nelze však obrábět všechny materiály. Z tohoto důvodu se těžkoobrobitelné materiály obrábí různými nekonvenčními technologiemi obrábění.

Tyto technologie jsou založeny na využívání fyzikálního nebo chemického principu úběru materiálu. Jedná se většinou o bezsilového, bezstylového působení na obrobek a bez tvoření klasických třísek, které vznikají u obrábění na klasických konvenčních strojích.

Jako technologie pro nekonvenční obrábění lze použít metod elektrochemického obrábění, obrábění paprskem laseru, obrábění elektronovým paprskem, obrábění iontovým paprskem, obrábění paprskem plazmy, obrábění ultrazvukem, obrábění elektroerozivním způsobem.

Nekonvenční metody se dají rozdělit do čtyř skupin. Obrábění elektrickým výbojem, chemické obrábění, obrábění paprskem koncentrované energie a mechanické procesy. Všechny elektro-erozivní metody se využívají pro obrábění vodivých kovových materiálů, které vedou elektrický proud.

Jednu z nekonvenčních technologií obrábění se vám budu snažit vysvětlit na následujících textech.

Dále se práce bude zabývat dokončovacími metodami po nekonvenčním obrábění materiálu, což bývají různé druhy povlaků i když v praxi se součástka nakonzervuje a připraví se na export.

**OBSAH**

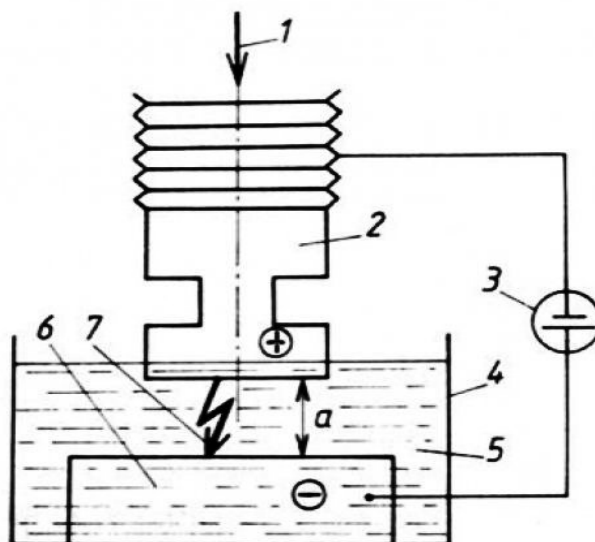
|   |    |
|---|----|
| Anotace .....   | 4  |
| Prohlášení .....  | 5  |
| Poděkování .....  | 6  |
| Obsah .....   | 7  |
| 1. Úvodem k elektroerozivnímu obrábění .....                  | 9  |
| 1.1. Princip elektroerozivní metody obrábění .....            | 9  |
| 1.1.1. Generátory výbojů .....                                | 10 |
| 1.2. Obrobitelnost kovů, materiál nástrojových elektrod ..... | 14 |
| 1.2.1. Regulace přísuvu nástrojové elektrody .....            | 16 |
| 1.2.2. Rozměry nástrojových elektrod .....                    | 17 |
| 1.3. Kapalné pracovní prostředí-dielektrikum .....            | 19 |
| 1.4. Dosahovaná přesnost a drsnost povrchu .....              | 21 |
| 2. Elektroerozivní hloubení dutin .....                       | 23 |
| 2.1. Nástrojové elektrody pro hloubení .....                  | 24 |
| 3. Elektroerozivní řezání drátkovou metodou .....             | 26 |
| 4. Elektrokotní obrábění .....                                | 30 |
| 5. Anodomechanické obrábění .....                             | 31 |
| 6. Dokončovací metody .....                                   | 32 |
| 7. Elektroerozivní nanášení povlaků .....                     | 32 |
| 8. Metoda Aero Lap .....                                      | 33 |
| 9. Technicko-ekonomické hodnocení .....                       | 34 |
| Závěr .....   | 35 |
| Seznam literatury .....                                       | 36 |
| Seznam použitých symbolů a zkratk .....                       | 37 |
| Seznam tabulek a obrázků .....                                | 38 |

## 1. Elektroerozivní obrábění

Elektrickou erozí nazýváme intenzivní periodicky opakující se elektrický výboj, který svým tepelným a tlakovým působením odstraňuje v povrchových vrstvách mikročástice materiálu, které mají tvar dutých kuliček a jsou z místa obrábění odplavovány dielektrickou kapalinou. Uvedený jev lze využít k elektrojiskrovému hloubení, děrování, řezání atd.

### 1.1 Princip elektroerozivní metody obrábění

Obrábění probíhá na dvou elektricky vodivých elektrodách, které jsou odděleny jiskrovou mezerou o velikosti 0,01 mm až 0,5 mm od obráběného materiálu. Obrobek je napojený na anodu s pólem kladným („+“) a nástroj je připojený na pól záporný („-“).



Obr.1-1 detail elektrického výboje <sup>7</sup>

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

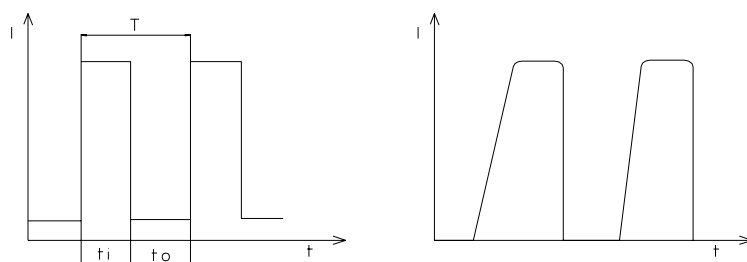
Základem procesu odebrání materiálu elektrickým impulzem je, že impulz statisticky rozložený po celé aktivní ploše celého nástroje. U elektrického výboje mezi obrobkem a nástrojem dojde k narušení povrchové vrstvy materiálu na obrobku i na nástroji. Vznikají tak jamky mezi kterými může protékat dielektrická kapalina. Impuls se přerušuje na takovou dobu, aby se mohly odplavovat vniklé mikročástice.

Elektrický výboj mezi elektrodami vzniká v místech s nejsilnějším elektrickým napěťovým polem. Pole umožňuje vytvoření vodivého kanálu a přechod jiskry mezi nástrojem a obrobkem. Vznikne krátkodobá koncentrace elektrické a mechanické energie elektronů při které ve vysoké teplotě a tlaku dojde k natavení kovu a následného vymrštění do dielektrické kapaliny. Vymrštění do kapaliny způsobuje také vnitřní spát napětí a elektrodynamické síly.

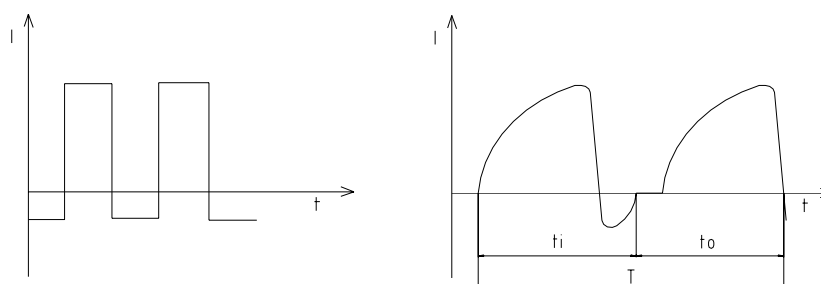
### 1.1.1 Generátory výbojů

Je zřejmé, že parametry impulsů patří k nejdůležitějším charakteristikám procesu, určujícím technologické ukazatele obrábění. Každý impuls je charakterizován napětím, proudem a svým tvarem. Podle tvaru rozdělujeme proudové impulsy do tří skupin :

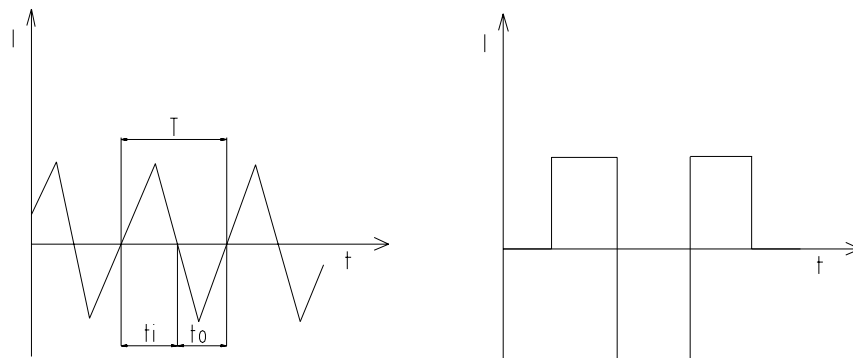
- 1) Jednopolové impulsy – typické pro elektroimpulzní obrábění
- 2) Střídavé impulsy nesymetrické – typické pro obrábění generátorů RC
- 3) Dvoupólové impulsy symetrické – pro elektro-kontaktní obrábění



Obr.1-2 jednopolové impulsy<sup>2</sup>

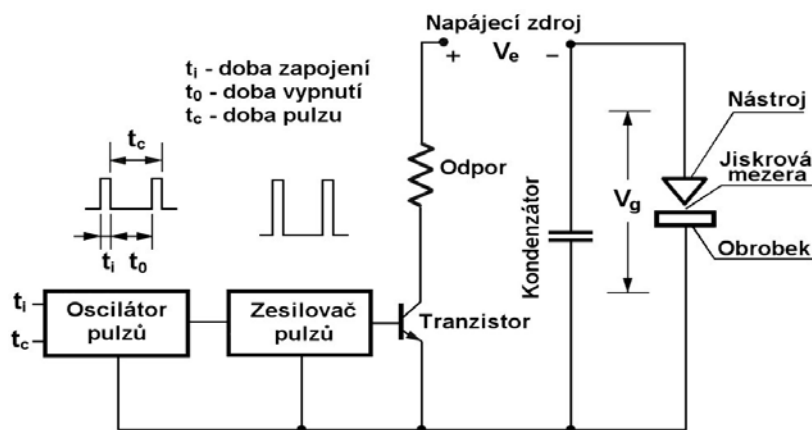


Obr.1-3 střídavé impulsy nesouměrné<sup>2</sup>



Obr.1-4 dvoupólové impulsy symetrické<sup>2</sup>

Jednotlivé impulzy se vyrábějí pomocí elektronické části obráběcího stroje – „**GENERÁTORU**“, který je jednou z nejdůležitějších částí stroje. Existuje celá řada zapojení a konstrukce generátorů.



Obr. 1-5 pracovní okruh<sup>3</sup>

### Relaxační generátory závislí RC a RLC

Je to jeden z nejstarších generátorů výbojů a vycházejí ze zapojení a principů, používaných při osvojování elektroživního obrábění. Činnost generátoru spočívá v opakovaném nabíjení a vybíjení kondenzátoru ze zdroje stejnosměrného napájení. Kondenzátor je paralelně zapojený do obvodu a jeho vybití nastane tehdy, když velikost napětí dosáhne průrazné hodnoty. Velikost průrazného napětí je závislá také na znečištění dielektrika a mezielektrodové vzdálenosti. Změnou poměrů v jiskřišti se změní frekvence i energie jednotlivých výbojů. Pro tuto závislost na poměrech v jiskřišti se tyto generátory nazývají závislé.

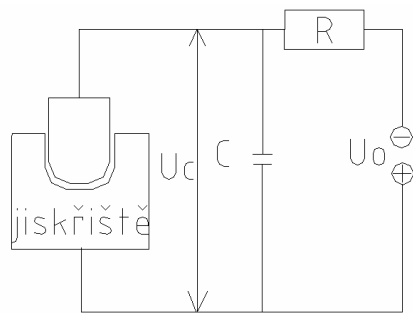
Zdroje produkují velmi krátké výboje  $t_i = 10^{-4}$  až  $10^{-7}$ , v kterých převládá elektrická vodivost. Obrobek je zapojen jako anoda a nástroj jako katoda. Servomechanismus na základě vyhodnocování napěťových poměrů v jiskřišti, řídí velikost pracovní mezery. Změnou odporu  $R$  se mění hodnota nabíjecího proudu a je ovládáno nabíjení kondenzátoru (frekvence). Produktivita obrábění je úměrná energií výbojů.

$$f_o = \frac{1}{2 * R * C} \quad (1.1)^2$$

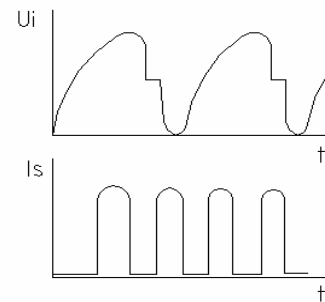
$$W = \frac{1 * U_c^2 * C}{2} \quad (1.2)^2$$

$$K_n = R * C \quad (1.3)^2$$

$$U_c = 0,8 U_o \quad (1.4)^2$$



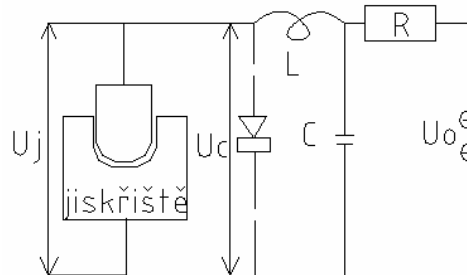
Obr.1-6 schéma RC generátoru



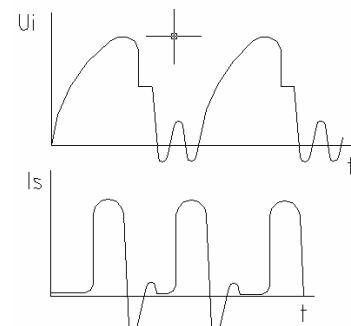
Obr. 1-7 průběh pulzů

**výhody** : jeho jednoduchost a spolehlivost

**nevýhody** : omezené možnosti regulace tvaru a frekvence výboje, vyšší úbytek elektrod, nízká produktivita obrábění



Obr.1-8 schéma RLC generátoru



Obr. 1-9 průběh pulzů

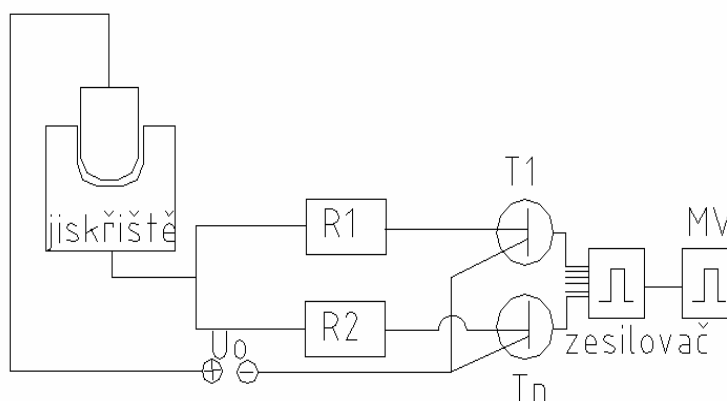
**výhody** : úbytek elektrody je menší než u generátoru RC, vyšší frekvence a výkon

### Nezávislé generátory

Za účelem zvýšení produktivity obrábění byly v průběhu rozvoje erozivního obrábění vyvinuty dvě základní skupiny zdrojů výbojů, které umožňují rozmanitou volbu pracovních podmínek. Zde již nezáleží na poměrech v pracovní mezeře. Charakterizujícím znakem těchto zdrojů je delší doba trvání impulsů, nižší pracovní napětí a v řadě případů opačná polarita výbojů.

První skupina jsou **mechanické generátory kolektorové a bezkolektorové**. U těchto zdrojů vznikají impulzy roztočením dynamy pomocí asynchronního motoru. Zdroje umožňují vysoké úběry až  $5\text{cm}^3/\text{min}^{-1}$ . K nevýhodám patří vyšší hlučnost, obtížná změna frekvence a potřeba dokončovacího generátoru pro obrábění na čisto.

Druhou a nejrozšířenější skupinou jsou **tranzistorové širokorosahové nezávislé generátory**. Často jsou označovány jako generátory druhé generace výbojů. Generátory umožňují velikou variabilitu elektrických parametrů impulzů. Schéma je na obrázku 1.10.



Obr.1-10. - schéma tranzistorového širokorosahového nezávislého generátoru

Po sepnutí tranzistoru se na elektrodách objeví napětí za předpokladu, že mezielektrodová vzdálenost je příznivá pro jeho průraz, protéká po dobu sepnutí tranzistorem obvodem pracovní proud.

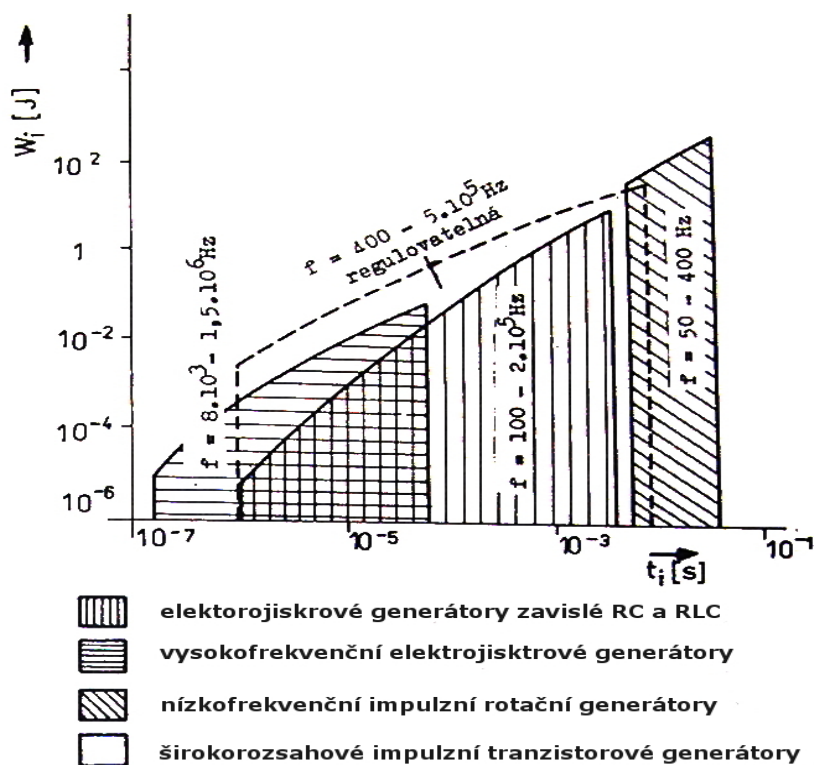
Výboj se přeruší uzavřením transformátoru. Dobu trvání impulsu  $t_i$  a dobu pauzy  $t_o$  určuje multiplikátor. Impulzy se v multiplikátoru zesilují impulsním zesilovačem, který budí výkonové spínací tranzistory. Proud je určován počtem paralelně zapojených tranzistorů.

Těmito zdroji je umožněno obrábět současně několika elektrodami najednou. Generátory zajišťují podstatné snížení nástrojových elektrod při značném zvýšení produktivity obrábění.

**výhody** : možnost nastavení vlastních parametrů

Při momentální výrobě na erozivních obráběcích strojích se používá takového impulzního zdroje, které jsou automaticky řízené CNC řídicími systémy obráběcího stroje podle zadaných technologických a pracovních parametrů.

Dosahované výkony na jeden ampér proudu v impulsu se pohybují v rozsahu  $8 - 10 \text{ mm}^3/\text{min}^{-1}$  ( při max.proudech až do 400 A ) a dosažitelné drsnosti  $R_a = 0,15\mu\text{m}$ . Při elektroerozivním řezáním drátovou metodou jsou dosahovány výkony  $35 - 70 \text{ mm}^2/\text{min}^{-1}$  s drsností  $R_a = 0,4\mu\text{m}$ .

Obr.1-11 Vzájemné porovnání parametrů výbojů zdrojů<sup>2</sup>

## 1.2. Obrobitelnost kovů, materiály nástrojových elektrod

Celkové množství odebraného materiálu, které vzniká působením výboje se rozloží na úbytek anody a katody. Při obrábění vzniká opotřebení nástroje a to vyvolává změnu jeho rozměru a tvaru. Cílem při volbě pracovních podmínek je zajistit minimální opotřebení nástroje při nesnížení produktivity a drsnosti obrobené plochy.

Elektroda ubývá v závislosti především na elektrických parametrech výboje, polaritě zdroje a fyzikálních vlastnostech materiálu ( jako jsou teplota tavení, elektrická a tepelná vodivost ). Na vlastnosti ke kterým se také musí přihlídnout je dobrá obrobitelnost, dostatečná pevnost a nízká pořizovací hodnota.

Pro zjištění optimálního materiálu nástrojové elektrody, bylo zavedeno **relativní objemové opotřebení**, pro které udává procentuální vyjádření úbytku materiálu na nástroji ku úbytku obráběného materiálu.

$$\zeta = V_n/V_o * 100\%$$

(1.5)<sup>2</sup>

**Hodnoty tohoto relativního objemového opotřebení jsou určeny :**

- polaritou
- pracovním proudem
- kombinací materiálu nástroje a obrobku
- dobou trvání impulsu

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

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

**Základní metody výroby nástrojových elektrod :**

- třískové obrábění
- lisováním
- lití rozžhaveného kovu do formy elektrody
- prášková metalurgie

**Jako nejrozšířenější materiály elektrod se používají :**

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

Nevýhodou grafitových elektrod je však malá pevnost a problémy při její výrobě ( odsávání prachu při výrobě ).

Měděné elektrody mají sice dobrou elektrickou vodivost a vykazují nízké opotřebení, ale nepracují tak dobře jako elektrody z grafitu nebo mosazi. Jsou vhodné spíše pro obrábění karbidu wolframu.

Sloučeniny W+Cu jsou drahé a jsou vyráběny slinováním. Používají se pro elektrody na hluboké drážky.

Elektrody z mosazi jsou relativně levné a dobře obrobitelné. Jako nevýhoda se však u nich jeví vysoká hodnota opotřebení.

### 1.2.1. Regulace přísuvu nástrojové elektrody

U každého elektroerozivního stroje se nachází servomechanismus, který umožňuje regulaci přísuvu nástrojové elektrody a nastavení čelní pracovní mezery. Optimální velikost této pracovní mezery k vytvoření výboje je závislá na pracovních podmínkách dielektrika a materiálu elektrod.

Servomechanismus umožňuje nastavení optimální vzdálenosti elektrod od obráběného materiálu a tím zajišťuje plynulost erozivního úběru. Vlastní regulace je nejčastěji odvozena od napěťových poměrů v jiskřišti.

#### Servomotory využívají různých principů pro změnu polohy :

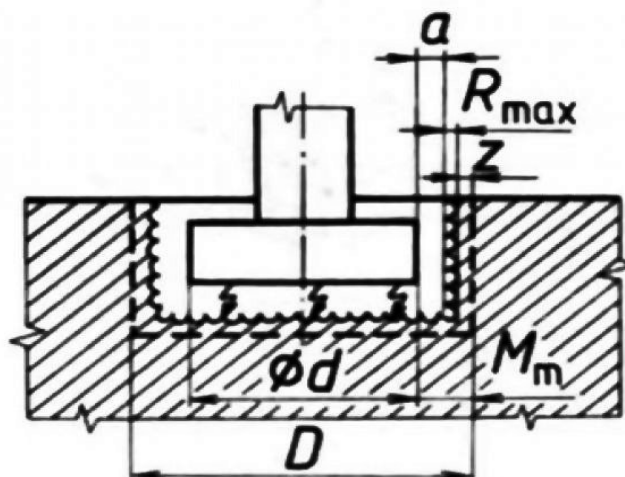
1. Elektrických principů – pomocí elektromagnetu
2. Elektromechanických principů – pomocí krokového motoru
3. Hydraulických principů

### 1.2.2. Rozměry nástrojových elektrod

U hloubení dutin rozměr nástrojové elektrody udává přesnost obráběné plochy.

#### **Rozměry elektrody jsou určovány :**

- požadovaným průměrem elektrody (  $D$  )
- velikostí pracovní mezery (  $a$  )
- drsností obroběné plochy (  $R_{\max}$  )
- tloušťkou narušené vrstvy (  $z$  )

Obr.1-12. rozměry hrubovací elektrody <sup>7</sup>**Pro výpočet rozměru hrubovací elektrody platí :**

$$d = D - 2 ( a + R_{\max} + z ) = d - 2 * M \quad (1.6)^2$$

hodnota M je minimum, o které musí být nástroj menší než požadovaný průměr D. Velikost pracovní mezery je závislá podle parametrů generátoru a určuje se podle normativů dodaných výrobcem stroje. Pracovní parametry určují i hodnotu  $R_{\max}$ . Hodnota drsnosti zahrnuje i chyby vzniklé při hrubování.

Boční výboje jsou nežádoucí a mají za následek tvarové chyby, které vznikají důsledkem opotřebení nástrojové elektrody a vodivých částic. Bočními výboji vznikají vodivé částice, které způsobují vytvoření kuželového otvoru.

Tomuto nežádoucímu jevu se dá předejít tvarovou úpravou nástrojové elektrody a použitím odsávacího výplachu.

Hodnota přídatku „ z “ která obsahuje tloušťka narušené vrstvy má význam pouze při výbojích s velkou energií a využije se pouze u dokončovací nástrojové elektrody a při obrábění na čisto.

**Pro výpočet rozměru dokončovací elektrody platí :**

$$d = D - 2 * a \quad (1.7)^2$$

V dokončovacích oblastech se výboje volí s energetickou hodnotou jednotlivých impulzů nižší, tudíž vzniklá hodnota  $R_{\max}$  je zanedbatelná k hodnotě a.

### 1.3. KapalnÉ pracovní prostředí – dielektrikum

Dielektrická kapalina je pracovní prostředí a jeho stav je velmi důležitý pro bezporuchový průběh elektrické eroze. Pracovní kapalina působí jako izolátor mezi elektrodami.

Za úkol má odvádět teplo z pracovního prostředí, ohraničovat výbojový kanál, umožňovat odplavení odebraných částic z místa výboje, zabraňovat usazování uhlíku a mikročástic materiálu na povrchu nástrojové elektrody čím zabraňuje vzniku zkratů.

#### **Požadavky na dielektrickou kapalinu :**

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

#### **Srovnání s ohledem na použitelnost dielektrik :**

Od nejvíce po nejméně používaného

- deionizovaná voda
- destilovaná voda
- petrolej
- lehké strojní oleje
- transformátorové oleje

Jednou z hlavních částí u moderních strojů je agregát pro přívod, chlazení a čištění dielektrika. Agregát přivádí do pracovního prostoru dielektrikum požadovaného množství, tlaku a čistotě.

Pro přefiltrování dielektrika se používají zařízení různých konstrukcí. Mnoho světových výrobců vyrábí speciální kapaliny, které jsou specifické tím, že neobsahují aromatické složky jako klasické petroleje.

Moderní elektroerozivní drátové řezací stroje, pracují s deionizovanou vodou jako dielektrikem. Pro zlepšení dielektrických vlastností vody se navíc používají deionizační kolony.

**Srovnání s ohledem na cenu jednotlivých dielektrik :**

Od nejlevnějších po nejdražších v rámci stovek Kč

- deionizovaná voda
- petrolej
- strojní olej
- transformátorový olej

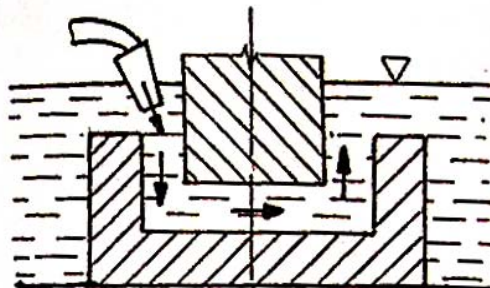
**Srovnání s ohledem na příkon obráběcího stroje**

Od největšího po nejmenší<sup>3</sup>

- elektrochemické obrábění
- plazmové obrábění
- obrábění elektronovým paprskem
- vodní paprsek
- obrábění laserem
- elektroerozivní obrábění
- obrábění ultrazvukem

**Konstrukční řešení odvodu nečistot :****1. Vnější vyplachování :**

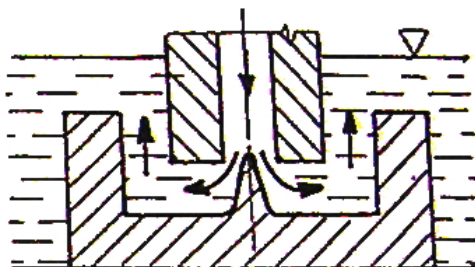
Tento způsob patří mezi nejvíce používané způsoby přívody dielektrika. Pro obrábění hlubších dutin je podporováno kombinováním s přerušovaným výplachem.



Obr.1-12. vnější vyplachování<sup>2</sup>

## 2. Vnitřní tlakové vyplachování :

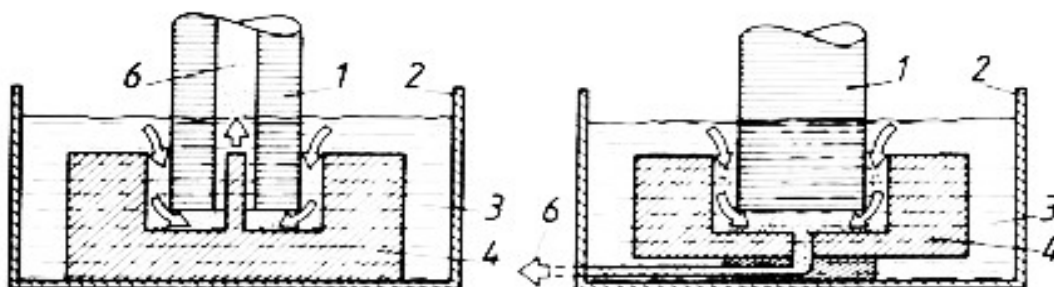
v této konstrukci je dielektrikum přiváděno otvorem v nástroji přímo do pracovního prostoru. Tento způsob však zhoršuje tvarovou přesnost na bočních plochách, protože odplavované částice ovlivňují boční výboje.



Obr.1-14. vnitřní tlakové vyplachování <sup>2</sup>

## 3. Vyplachování odsáváním :

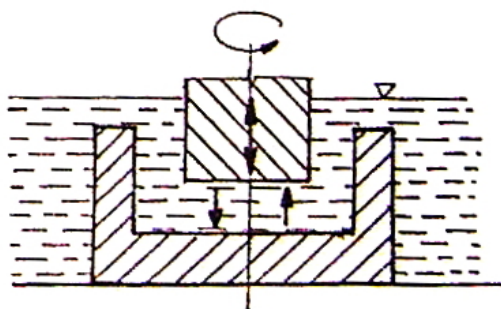
tohle řešení poskytuje velmi dobrou tvarovou přesnost



Obr.1-15. vyplachování odsáváním <sup>7</sup>

## 4. Pulzní vyplachování :

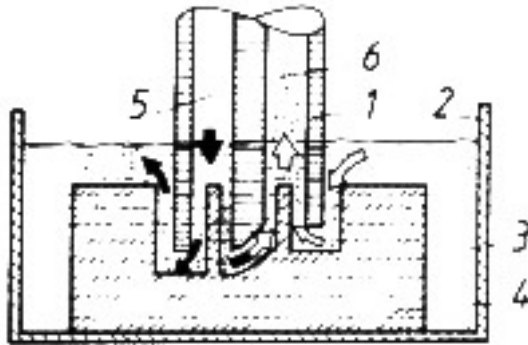
Tato konstrukce spočívá v oddalování elektrody a možnosti podpory rotací. Vyplachování je sdružené se zpětným pohybem elektrody. Pracovní proud se při odjíždění vypíná aby nedošlo k bočním výbojům a opětovně se zapne při najetí elektrody do pracovní vzdálenosti.



Obr.1-16. Pulzní vyplachování <sup>2</sup>

### 5. Smíšené vyplachování

konstrukce spočívá v kombinaci odsávacího a vyplachovacího způsobu odstraňování vzniklých nečistot



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

Obr.1-17. smíšené vyplachování <sup>7</sup>

### 1.4. Dosahovaná přesnost a drsnost povrchu

Každý vyrobený obrobek se žádaného rozměru a tvaru liší určitou odchylkou  $\bar{\delta}$ , která má v elektroerozivním obrábění hodnotu :

$$\bar{\delta} = \bar{\delta}_{ST} + \bar{\delta}_T + \bar{\delta}_{NÁST} + \bar{\delta}_{ER} \quad (1.8)^2$$

$\bar{\delta}_{ST}$  – chyba obráběcího stroje způsobená deformacemi, nepřesnostmi pohybových mechanismu a polohovacího mechanismu nástrojových elektrod. Hodnota nepřevyšuje 0,003 mm

$\bar{\delta}_T$  – chyba, která vznikla oteplením během obrábění ( dielektrikum a nástrojové elektrody se ohřívají ). Pokud stroj není vybavený tepelnou stabilizací, musí se obrobky větších rozměrů počítat na rozměrovou tepelnou kompenzaci.

$\bar{\delta}_{NÁST}$  - výrobní nepřesnost nástrojové elektrody. Elektrody frézované a broušené mají nepřesnost  $\bar{\delta}_{NÁST} = \pm 0,02$  mm, nepřesnost na drátových elektroerozivních strojích se pohybuje  $\bar{\delta}_{NÁST} = \pm 0,002 \div 0,005$  mm

$\bar{\delta}_{ER}$  – chyba, která je daná vlastní podstatou elektroerozivního obrábění. Hodnoty se pohybují v řádech  $\mu\text{m}$  a dají se upravit vhodným způsobem obrábění.

Drsnost povrchu, patří k jednomu z nejdůležitějších technologických charakteristik, která vymezuje oblasti použitelnosti elektroerozivního obrábění.

Jakost povrchové vrstvy záleží na energii jednotlivých výbojů, která má za následek rozměry vytvořeného kráteru.



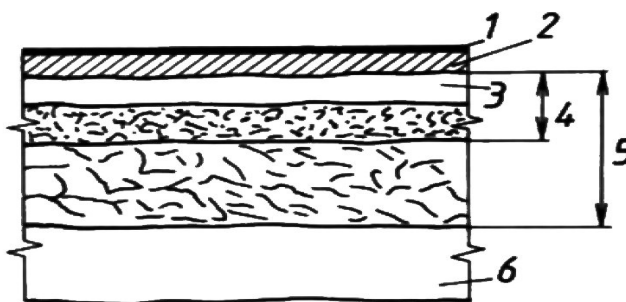
Obr.1-18 destička drsnosti pro vizuální porovnání od firmy Zimmer+Kreim

**Pro maximální výšku nerovnosti platí vztah :**

experimentálně zjištěná konstanta vynásobená energií impulzů

$$R_{\max} = K * W_i \quad (1.9)^2$$

Pro nejlepší kvality povrchu, jsou z technologického hlediska používány proudy při nižších hodnotách, krátkých impulzech a vysokých frekvenčních výbojů. Kvalita povrchu je ale na úkor opotřebování nástrojové elektrody. Elektrické výboje ovlivňují i stav povrchové vrstvy a jejich změny jsou na následujícím obrázku zobrazeny.



Obr. 1-19 změny povrchu materiálu <sup>7</sup>

- 1 – mikrovrstva tvořená chemickými sloučeninami vzniklými difuzí prvků dielektrika
- 2 – vrstva obsahující prvky materiálu nástrojové elektrody
- 3 – tzv.bílá vrstva (strukturně pozmeněná znovu ztuhlá tavenina martenzitické struktury)
- 4 – pásmo tepelného ovlivnění(zakalený a popuštěný základní materiál obrobku)
- 5 – pásmo plastické deformace vyvolané rázy pulzů
- 6 – základní materiál obrobku

## 2. Elektroerozivní hloubení dutin

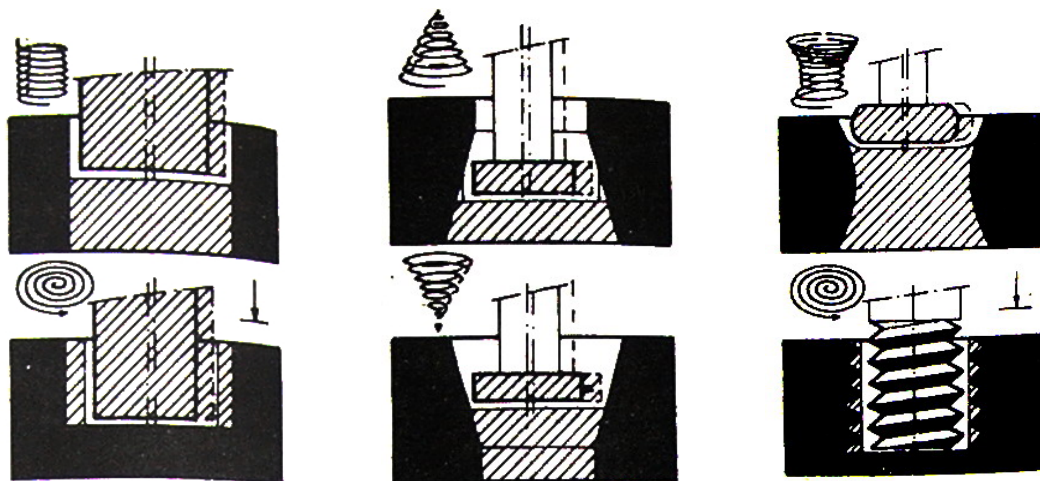
Elektroerozivní hloubení dutin v oblasti výroby střížných nástrojů, tvářecích nástrojů, forem pro lití, nástroje pro tváření plastu a výrobě zápusťek, patří mezi jednu z nejprogressivnějších technologických aplikací.

Zlepšení elektroerozivního obrábění se dosáhlo při zavedení možnosti **vychylování elektrod**, které zajistilo řízení obrábění ve všech rovinách.

Funkce vychylovače spočívá ve vychylování elektrody ve všech směrech, což umožňuje jednodušším elektrodám zhotovovat složitější tvary. Při vhodném pracovním režimu lze zlepšovat výchylky pohybu o velikost  $0\pm 2\text{mm}$  ve všech směrech, což vede ke snižování spotřeby elektrod.

Použitím rotace elektrody se také zlepší povrch vyjiskřovaného povrchu. Oddělené částice materiálu jsou vodivé a při jejich špatném odstranění z prostoru jiskřiště se tvoří tzv. přemostění.

Přemostění přímo ovlivňuje rychlost obrábění a nevhodně působí na rozměr a jakost povrchu. Strany elektrod se s pravidelnou přesností oddalují od stěny a dna dutiny a tím se vytváří mezera mezi elektrodou a plochou obrobku.



Obr.1-20 možnosti obrábění pomocí vychylovače elektrod <sup>2</sup>

Pomocí vychylovačů se výrazně zlepšila ekonomičnost pracovního procesu, protože zajistili zkrácení strojního času o 40 – 60% při zmenšené spotřebě elektrod.

Další urychlení a zlepšení pracovních postupů přišlo s vybavením obráběcích strojů pomocí NC řídicích systémů s možností řízením pracovního procesu v 6-ti osách současně. Dále následoval přechod na CNC řídicí systémy, které umožňují z automatizovat a zpřesnit proces eroze.

## 2.1. Nástrojové elektrody pro hloubení

Nástrojová elektroda se při elektrojiskrovém procesu automaticky posouvá proti obrobku, přitom řídicí systém udržuje konstantní velikost jiskrové mezery. Nami použitá elektroda má negativní tvar obráběné plochy, který je pomocí elektrojiskrových výbojů kopírován do obrobku.

### **Produktivita obrábění a jakost povrchu záleží:**

- parametrech elektrického proudu
- tvaru a frekvenci výbojů
- dielektrické kapalině
- materiálu nástroje a obrobku

### **Materiál elektrod by měl mít vlastnosti :**

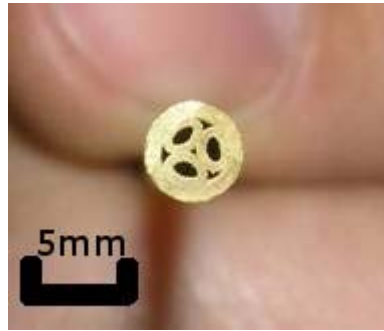
- vysokou elektrickou vodivost
- dobrou obrobitelnost
- vysoký bod tavení
- dostatečnou pevnost

Jako výhodná metoda pro výrobu elektrod pro hloubení je stříkání rozžhaveného kovu. Materiál je možný stříkat přímo do dutiny. Nejdříve se zhotoví model a pak do formy se stříká kov, který představuje nástrojovou elektrodu.

Nástrojové elektrody zhotovené z mědi se vyrábí tak, že samotná měď je odleptána kyselinou dusičnou na požadované rozměry.

Dalším materiálem pro elektrody je grafit, který lze klasicky obrábět třískovým obráběním, popřípadě speciálním způsobem vybrušování nebo řezáním pomocí elektroerozivních pil.

Pro hloubení se používají elektrody s průměry od 0,1 do 3mm s vlastní délkou do 400mm. Nástrojová elektroda se navrhuje a konstruuje pro každý případ obrábění samostatně. Náklady na její zhotovení činí až 50 % z celkových výrobních nákladů.



Obr. 1-21 detail nástrojové elektrody pro hloubení



Obr. 1-22 různé tvary nástrojových elektrod pro hloubení

**Moderní hloubicí stroje se vyznačují těmito parametry :**

- automatická výměna elektrod ze zásobníku
- automatická výměna obrobku upnutých v paletách
- součástí center jsou i měřící místa
- používají barevné obrazové grafiky na kontrolu programu
- program využívá zásobník technologických parametrů
- řídicí systémy umožňují ovládání pomocí dialogového způsobu
- stroje pracují s dielektrikem, které se regeneruje v uzavřeném okruhu
- používají se velmi dokonalé pomůcky na výrobu elektrod

### 3. Elektroerozivní řezání drátkovou metodou

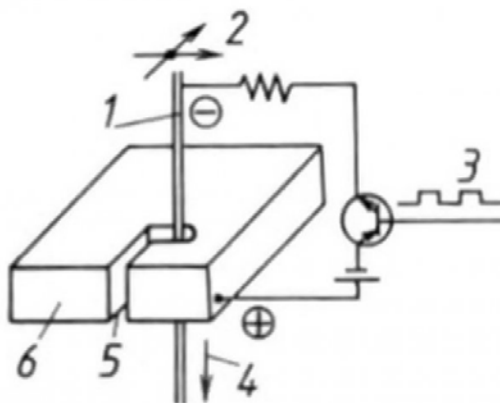
Zavedení řezání drátkovou metodou bylo dosaženo největšího pokroku a způsobuje revoluci ve výrobě střížných a lisovacích nástrojů. Metoda se vyznačuje minimální šířkou řezu a patří k nejvyužívanějším způsobům elektroerozivních způsobů.

Nástrojovou elektrodou - je zde drát, který se odvíjí pomocí speciálního zařízení, aby se předešlo jeho nadměrnému opotřebením. Dále je veden přes místo řezu pomocí vodícího zařízení a napínán pomocí napínacího mechanismu, které ovlivňuje pomocí napínací tahové síle svoji přesnost.

Obráběná součástka je připojena na kladná pól a procházející obráběcí drát je na záporný pól. Pomocí elektrických výbojů vzniká mezi drátkovou elektrodou a obrobkem pracovní mezera a tím šířka pracovního řezu.

#### Vlastnosti kladené na drátkové elektrody :

- dostatečná mechanická pevnost
- vysoká elektrická vodivost
- malé tolerance rozměru a tvaru
- ekonomičnost



Obr. 1-23 Princip elektroerozivního řezání drátkovou elektrodou <sup>8</sup>

- 1 – drátová elektroda
- 2 – CNC řídicí systém
- 3 – generátor
- 4 – směr posuvu elektrody
- 5 – vyřezaná drážka
- 6 – obrobek

Nejčastějším materiálem nástrojových elektrod - je zde měď, pro větší průměry se používá mosazný drát a na velmi jemné řezy molybdenový drát o průměru 0,03 až 0,07 mm.

Nástroj, který může odebírat materiál v každém směru a ve spojení s vhodným řídicím systémem je možné přesně obrábět i velmi složité tvary.

Těchto vlastností využívají moderní 6-ti osé centra CNC, které umožňují podstatné rozšíření pracovních možností. Systém umožňuje naklopení nástrojové elektrody vzhledem ke svislé ose v rozsahu  $\pm 30^\circ$ . Systém také provádí korekci dráhy, reverzaci chodu po programované dráze, automatickou regulaci rychlosti v průběhu procesu řízení, podle okamžitých obráběcích podmínek.

Pro zajištění automatizovaného procesu obrábění jsou moderní stroje vybaveny automatickým vrtáním díry pro zavedení drátu, automatickým zavedením drátu na počátku práce do vyvrtané díry a adaptivním řízením.

#### **Důležité parametry ovlivňující tvarovou přesnost :**

- vlastnosti stroje
- přesnost řídicího systému
- stabilita parametru generátoru
- kvalita dielektrika

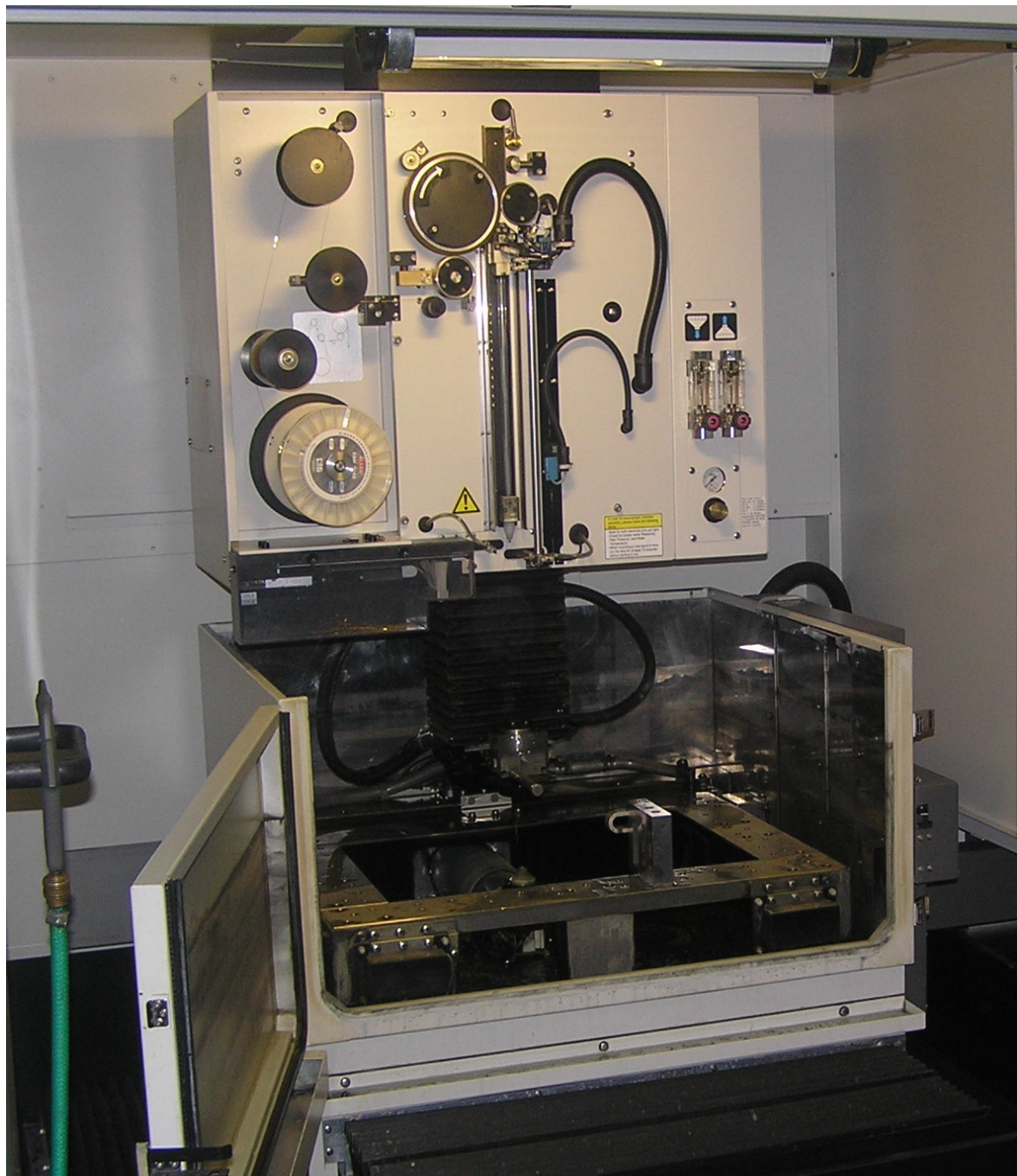
#### **Pro moderní drátková centra je charakteristické :**

- automatické navlékání drátu
- automatické zjišťování polohy obrobku
- automatické vyhledávání startovacího otvoru v materiálu
- plynulou změnu sklonu řezacího drátu
- růst kvality technologických parametr

#### **Navlékání drátu se provádí :**

- proudem dielektrika, který tryská z místa horního vodítka drátu, přes technologický otvor k tělesu spodního vodítka a do odváděcího mechanismu
  - mechanickými podávacími prostředky (kladky) přes trubičku vysunutou do technologického otvoru k tělesu spodního vodítka se volný konec drátu posouvá k odbíracímu mechanismu

Pro automatické navlékání se používají dráty o průměru 0,2 – 0,25 mm.



Obr. 1-24 pracovní prostor elektroerozivní drátkové metody

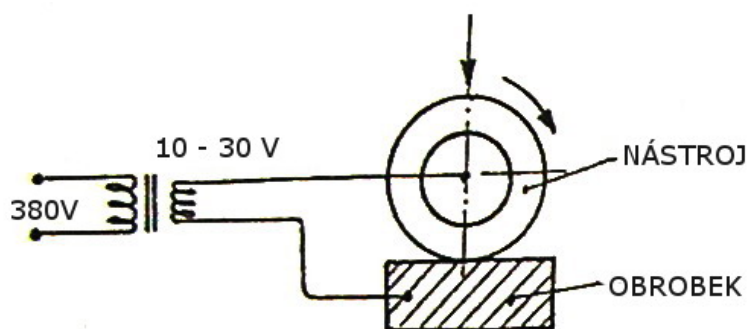
stroj Fanuc Robocut  $\alpha$ -1iC :

- Max. rozměr obrobku: 650x560x250mm
- Max. hmotnost obrobku: 500kg
- Rychlost řezání: 250mm<sup>2</sup> s drátem o průměru 0,25mm
- Přesnost polohování řezacího drátu vůči obrobku: 0,0007mm

## 4. Elektrokontaktní obrábění

Zvláštním případem elektroerozivního obrábění je obrábění elektrokontaktní, při kterém dochází k odebrání materiálu elektrickými nestacionárními kontaktními obloukovými výboji. Doba trvání výboje je až 0,01 s. Elektrody (tj. nástroj a obrobek) jsou zapojeny do obvodu se zdrojem střídavého napětí (transformátor o výkonu 10 až 250 kW při frekvenci 50 až 500 Hz).

Aby nedošlo k místnímu svaření, musí se nástroj neustále pohybovat (většinou rotuje). Při uvedeném pohybu se vytváří elektrický oblouk a tím se jedná o mechanické buzení elektrických oblouků. Nástroj se musí vždy vydatně chladit buď proudem kapaliny nebo vzduchu, který má za následek také odstranění částic obrobeného materiálu.



Obr.1-25 schéma elektrokontaktního obrábění <sup>1</sup>

Elektrokontaktní obrábění je vhodné pro řezání těžkoobrobitelných materiálů, pro odřezávání nálitků a vtoků ve slévárenství, opracování svárů atd.

### Výhody :

- vysoká produktivita obrábění
- jednoduchost zařízení
- cenově nenáročný stroj
- napěťově přijatelný výkon
- malé opotřebení nástroje

### Nevýhody :

- kvalita obrobeného povrchu
- tepelné ovlivnění až do hloubky 5mm
- vysoká energetická náročnost
- vznik ultrafialového záření

## 5. Anodomechanické obrábění

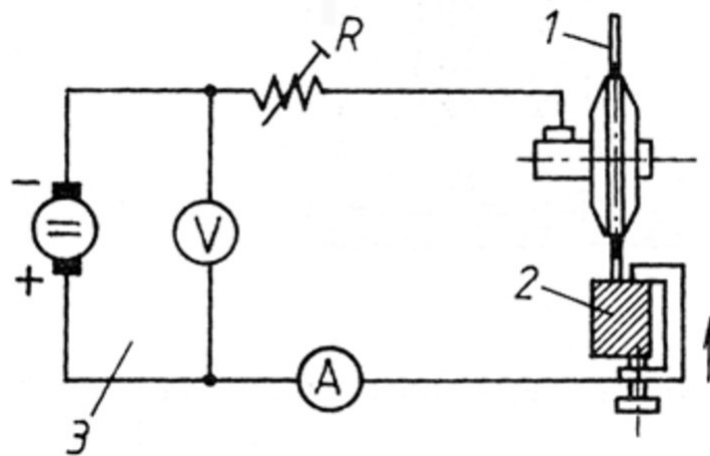
Při anodomechanickém obrábění dochází ke kombinaci elektrochemických i elektroerozivních účinků.

Obrobek je připojený na anodu stejnosměrného zdroje a je přitlačován malou k povrchu nástroje, který je připojený na katodu.

Elektrolyt zde bývá křemičitan sodný (vodní sklo  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), který vytváří pasivační vrstvu, zabráňující přímému styku nástroje s obrobkem. Místo styku se zahřívá a úkolem elektrolytu je také odvést vzniklé teplo.

Nástroj bývá úzký kotouč z hlubokotažné nebo běžné konstrukční oceli, který stírá pasivační vrstvu. Vznikají elektrické výboje a dochází k odtavení materiálu na stykové ploše. Elektrolyt pasivační vrstvu obnovuje a výboje se opakují.

Celkový úběr obráběného materiálu je při řezání  $1 \text{ až } 7 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ , při leštění a broušení pouze  $2 \text{ až } 30 \text{ mm}^3 \text{ min}^{-1}$ . Drsnost povrchu obrobkové plochy při řezání  $R_a = 6,3 \div 50,0 \text{ } \mu\text{m}$ , při leštění a broušení  $R_a = 0,1 \div 3,2 \text{ } \mu\text{m}$ . Kotouč se otáčí rychlostí  $v_c = 9 \div 12 \text{ m s}^{-1}$  a zdrojem energie je usměrňovač střídavého proudu s napětím 32-36V a proudem 3 až 3000A.



Obr. 1-26 Princip anodomechanického dělení materiálu<sup>9</sup>

- 1 – nástroj
- 2 – obrobek
- 3 – napájecí zdroj

Obrábění se používá pro dělení obtížně obrobitelných kovových materiálů a SK. Nevýhodou je však nepřesný řez.

## 6. Dokončovací metody

Dokončovací obrábění ploch je v mnoha průmyslových odvětvích velmi nákladný faktor. Jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu obráběné plochy. Mezi dokončovací metody patří abrazivní metody, které jsou charakterizovány použitím nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu.

Tyto metody patří mezi nejvíce využitelné metody pro obrábění strojních součástí u kterých jsou kladeny vysoké požadavky na přesnost tvaru a rozměrů a drsnost povrchu obrobených ploch.

Mezi dokončovací metody se zařazují :

- broušení ( IT 2 – 6 )
- lapování ( IT 2 – 5 )
- honování ( IT 3 – 8 )
- superfinišování ( IT 2 – 5 )
- elektroerozivní nanášení povlaků ( IT 3 – 6 )
- metoda Aero Lap ( IT 2 -5 )

Protože se však u elektroerozivního obrábění ze všech metod nejvíce používá řezání drátkovou metodou a hloubení dutin, z toho důvodu se jako možné dokončovací metody volí pouze elektroerozivní nanášení povlaků. Popřípadě je možné uvažovat o dokončovacím broušení, pro vylepšení tvarových rozměrů a drsnosti povrchu.

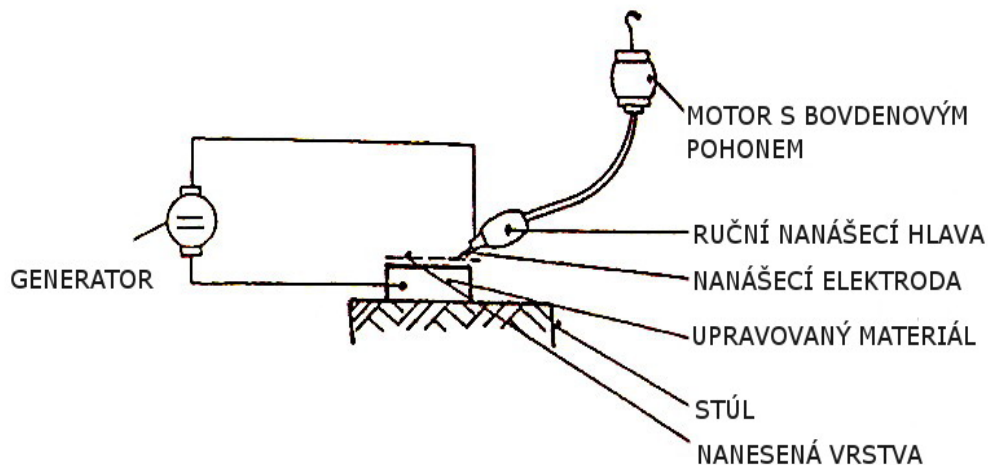
Po dosažení konečného výrobního tvaru součásti se v mnoha případech z praxe, pouze součást nakonzervuje příslušnými mazadly či konzervátory, aby se předešlo předčasné degradaci materiálu nebo korozi výrobku.

## 7. Elektroerozivní nanášení povlaků

Při této elektroerozivní metodě vznikají velmi vysoké lokální hustoty energie výbojů na elektrodách k tavení a zplyňování. V plazmovém stavu se materiál přesouvá do ruční nanášecí hlavy, kde je přes přeskokový kanálek přenesen na materiál.

Vlastní přenos prochází přes nanášení elektrodu, která je upnuta v nanášecí hlavici. Hlavice rotuje nebo je rozkmitána a je ručně přidržována u obrobku. Mezi samotnou hlavici a materiálem je vzduchová mezera.

Nanášená vrstva je složená ze slinutého karbidu a přechází pak přes mezistupně do neovlivněné vrstvy upravovaného materiálu. Tepelně ovlivněné pásmo se vyznačuje v závislosti na stavu a složení základní struktury zpevněním, popřípadě místním popuštěním. Slinutý karbid, který se nachází v povrchové vrstvě, má zásadní vliv na tvrdost vrstvy.



Obr. 1-27 princip elektroerozivního nanášení povlaku

Metoda se používá pro zvětšení ořezuvzdornosti povrchu nanesenou vrstvou v místech největších opotřebení. Používá se to především pro ohýbací, lisovací a protlačovací nástroje, šroubové vrtáky, frézy.

### mezi výhody patří:

- náklady jsou nižší než na celý nástroj ze slinutého karbidu
- zůstává houževnatý materiál povlakovaného materiálu
- možnost nanesení vrstvena komplikované tvary

### k nevýhodám se přisuzují :

- pracnost ručního nanášení
- zhoršení broušeného nebo lapovaného povrchu
- vrstva je závislá na pečlivosti a schopnosti obsluhy

## 8. Metoda Aero Lap

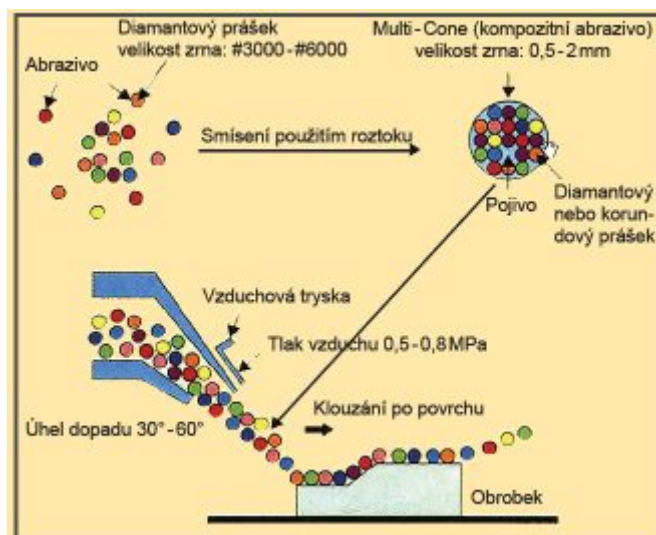
Metoda využívá unikátní technologie dokončují tvarové plochy zápustek, raznic, forem a řezných nástrojů, které bylo dosud většinou prováděno ručně.

V tomto zařízení jsou zrna kompozitního abraziva Multi-Cone usměrňována vzduchovou tryskou (tlak vzduchu 0,5 - 0,8 MPa) a dopadají pod úhlem 30° až 60° na dokončovaný povrch. Dopadem a skluzem zrn je povrch jemně broušen a leštěn.

Zrna Multi-Cone velikosti 0,5 - 2 mm tvoří diamantový nebo korundový prášek a speciální pojivo, které zajišťuje kompaktnost a pružnost zrn. Výrobce zdůrazňuje, že Multi-Cone byl vyvinut výhradně pro použití v zařízení Aero Lap.

Předností metody je vysoká produktivita a spolehlivost lapování i tvarově složitých povrchů (bez speciálních nástrojů), které přispívá ke zvýšení životnosti forem a zápustek (především pro tváření za studena) a povlaků PVD i CVD (v porovnání s jemným lapováním).

Uvedenou metodou lze ekologickým způsobem (v bezhlučném prostředí bez brusného prachu) dosáhnout homogenního povrchu součástí. Zařízení je nenáročné na údržbu. Vzhledem k vysoké životnosti recyklovatelného abraziva jsou i provozní náklady nižší v porovnání konvenčním lapováním.



Obr.1-28 princip metody Aero Lap <sup>10</sup>

Tab.1-1 tabulka používaných strojů <sup>10</sup>

| Aero Lap           | AYT-100         | AYT-300         |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| Provozní napětí    | 400V/50Hz       |                 |
| Stlačený vzduch    | 0,5MPa          |                 |
| Velikost (šxvxđ)   | 470x1300x650 mm | 700x1600x900 mm |
| Aplikační velikost | 200x200 mm      | 300x300 mm      |

## 9. Technicko - ekonomické zhodnocení

Velká výhoda elektrojiskrového obrábění spočívá v tom, že je možné obrábět všechny elektricky vodivé materiály libovolné tvrdosti s vysokou přesností tvaru a vysokou kvalitou povrchu. Všechny druhy slinutých karbidů a kalené nástrojové oceli se tak dají obrobit načisto. Odstraní se tím deformace a trhliny při kalení např. břitových destiček nebo průvlaků, neboť otvory, které jsou zdrojem deformací a trhlin se obrábí až po zakalení.

Výsledky praktického uplatnění metody na úpravu raznic ukázaly, že v porovnání s nástrojem bez úpravy vzrostl počet stříhů nástrojem dokončeným konvenčním lapováním asi 2,5x a uplatněním Aero Lap 7x. Podobný výsledek byl zaznamenán i při zkouškách raznic s PVD povlakem.

Z ekonomického hlediska, bude nejnákladnější výroba nástrojových elektrod pro hloubení, protože se musí používat klasických konvenčních, třískových strojů. Ty jsou energeticky a finančně náročné, protože se jedná o kusovou výrobu jednotlivých elektrod, oproti sériové výrobě.

Tab. 9-1 Technologické parametry vybraných metod <sup>5</sup>

| Metoda                      | Drsnost Ra (μm) | Stupeň přesnosti IT | Hloubka ovlivněné vrstvy (μm) | Úběr (cm <sup>3</sup> *min <sup>-1</sup> ) | Měrná potřeba energie (kWh*cm <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|-------------------------------|--|---|
| Elektrojiskrové obrábění    | 50 až 0,2       | 6 až 12             | 10 až 300                     | 10 <sup>-4</sup> až 0,6                    | 0,1 až 1                                      |
| Obrábění paprskem laserem   | 50 až 6,3       | 3 až 8              | 100                           | 10 <sup>-4</sup>                           | 8 až 13                                       |
| Obrábění paprskem elektronů | 50 až 6,3       | 3 až 8              | beze změn                     | 10 <sup>-2</sup> až 0,4                    | 9 až 15                                       |
| Obrábění paprskem plazmy    | 50 až 12,6      | 32 až 63            | 500 až 800                    | 100  | 9 až 16                                       |
| 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 <sup>-2</sup>                           | 0,04 až 0,08                                  |
| Ultrazvukové obrábění       | 6,3 až 0,4      | 7 až 9              | beze změn                     | 10 <sup>-4</sup> až 10                     | 0,07 až 0,8                                   |

## **Závěr :**

Protože stoupá použitelnost těžkoobrobitelných materiálů ve strojírenské výrobě, využití nekonvenčních metod obrábění se zdá jako jedna z nejúčelnějších technologií.

Má nezastupitelnou účast při řezání tvarových částí lisovacích a tvářecích komponentů nebo při hloubení na těžko dosažitelných místech ve výrobě kovacích zápustek.

Mezi těžkoobrobitelné materiály jsou brány kalené oceli, slinuté karbidy, kompozitní materiály, žárovevné a žáruvzdorné oceli. Mezi největší výhody nekonvenčních metod obrábění patří komplexní opracovatelnost i za možnosti značně nepravidelných tvarů a miniaturizaci výrobků.

Z nekonvenčních metod obrábění jsou v bakalářské práci podrobeny rozboru metody obrábění pomocí elektroerozivního hloubení, elektroerozivního řezání drátkovou metodou, elektrokontaktního obrábění a anodomechanického obrábění.

Nekonvenční metody se používají tam, kde nedostačují konvenční technologie obrábění. Protože se začíná používat velké množství různých druhů materiálů ve strojírenství, konstrukci a jiných odvětvích, patří nekonvenční metody obrábění mezi stále využívanější a perspektivnější.

V závěru jsou zmíněny následující dokončovací metody povrchu po nekonvenčních metodách obrábění. Ze všech možných dokončovacích metod pro elektroerozivní obrábění je možno využít pouze malé spektrum, protože dosahované geometrické tvary jsou velice přesné.

**POUŽITÁ LITERATURA:**

1. Morávek R., *Nekonvenční technologie obrábění*, Západočeská univerzita, 1999, ISBN 80-7082-518-9
2. Barcal J., *Nekonvenční metody obrábění*, ČVUT, 1989,
3. Karafiátová S., Langer I., *Nekonvenční technologie*, Havlíčkův Brod, Fragment 1998, ISBN 80-7200-296-1
4. Řasa J., Pokorný P., Gabriel V., *Strojírenská technologie 3*, Scientia 2001, ISBN 80-7183-227-8
5. Kocman K., Prokop J., *Technologie obrábění Brno*, CERM, 2005, ISBN 80-214-3068-0
6. Kafka J., Vrabec M., *Technologie obrábění*, Praha : ČVUT , 2006. 120 s. ISBN80-01-01355-3
7. Mádl J. .et al *Technologie obrábění* Praha: ČVUT , 2000. ISBN: 80-01-01-091-6
8. URL<<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>>
9. URL<<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2>>
10. URL <<http://www.misan.cz/okamoto/sortim/aerolap/aerolap.htm>>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|          |               |                              |
|----------|---------------|------------------------------|
| $f_o$    | kHz           | Opakovací frekvence          |
| $W$      | J             | Energie                      |
| $K_n$    | -             | Nabíjecí konstanta           |
| $U_c$    | V             | Průrazné napětí              |
| $U_o$    | V             | Nabíjecí napětí              |
| $R_a$    | $\mu\text{m}$ | Drsnost povrchu              |
| $d$      | mm            | Průměr elektrody             |
| $\delta$ | mm            | Odchylka                     |
| $R$      | $\Omega$      | Elektrický odpor             |
| $W_i$    | J             | Energie impulzů              |
| $K$      | -             | Experimentální konstanta     |
| $V_n$    | $\text{mm}^3$ | Úbytek materiálu na nástroji |
| $V_o$    | $\text{mm}^3$ | Úbytek materiálu na obrobku  |
| $C$      | F             | Elektrická kapacita          |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Tab. 8-1 | Tabulka používaných strojů              | 33 |
| Tab. 9-1 | Technologické parametry vybraných metod | 34 |

**SEZNAM TABULEK, OBRÁZKŮ A GRAFŮ**

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Obr. 1-1  | Detail elektrického výboje                                      | 9  |
| Obr. 1-2  | Jednopolové impulzy   | 10 |
| Obr. 1-3  | Střídavé impulzy nesouměrné                                     | 10 |
| Obr. 1-4  | Dvoupólové impulzy symetrické                                   | 10 |
| Obr. 1-5  | Pracovní okruh  | 11 |
| Obr. 1-6  | Schéma RC generátoru  | 12 |
| Obr. 1-7  | Průběh pulzů  | 12 |
| Obr. 1-8  | Schéma RLC generátoru   | 12 |
| Obr. 1-9  | Průběh pulzů  | 12 |
| Obr. 1-10 | Schéma tranzistorového širokorosahového nezávislého generátoru  | 13 |
| Obr. 1-11 | Vzájemné porovnání parametrů výbojů zdrojů                      | 14 |
| Obr. 1-12 | Rozměry hrubovacích elektrody                                   | 17 |
| Obr. 1-13 | Vnější vyplachování   | 19 |
| Obr. 1-14 | Vnitřní tlakové vyplachování                                    | 20 |
| Obr. 1-15 | Vyplachování odsáváním  | 20 |
| Obr. 1-16 | Pulzní vyplachování   | 20 |
| Obr. 1-17 | Smíšené vyplachování  | 21 |
| Obr. 1-18 | Destička drsnosti pro vizuální porovnání od firmy Zimmer+ Kreim | 22 |
| Obr. 1-19 | Změny povrchu materiálu   | 22 |
| Obr. 1-20 | Možnosti obrábění pomocí vychylovače elektrod                   | 23 |
| Obr. 1-21 | Detail nástrojové elektrody pro hloubení                        | 25 |
| Obr. 1-22 | Různé tvary nástrojových elektrod pro hloubení                  | 25 |
| Obr. 1-23 | Princip elektroerozivního řezání drátovou elektrodou            | 26 |
| Obr. 1-24 | Pracovní prostor elektroerozivní drátkové metody                | 28 |
| Obr. 1-25 | Schéma elektrokontaktního obrábění                              | 29 |
| Obr. 1-26 | Princip anodomechanického dělení materiálu                      | 30 |
| Obr. 1-27 | Princip elektroerozivního nanášení povlaku                      | 32 |
| Obr. 1-28 | Princip metody Aero Lap   | 33 |