

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní



Bakalářská práce

Elektroerozivní obrábění

Autor: Karel Matuška

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Pavel Novák, Ph.D.

Praha, 2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Matuška** Jméno: **Karel** Osobní číslo: **456373**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Elektroerozivní obrábění

Název bakalářské práce anglicky:

Electrodischarge machining

Pokyny pro vypracování:

1. Charakteristika a typy metod elektroerozivního obrábění
2. Oblasti využití elektroerozivního obrábění
3. Srovnání s ostatními výrobními metodami

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Novák, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Pavel Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.


24.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze literaturu uvedenou v příloženém seznamu.

V Praze dne:

.....

Karel Matuška

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D. za cenné rady a konzultace poskytnuté během psaní této bakalářské práce.

Anotační list

Jméno autora:	Karel Matuška
Název bakalářské práce:	Elektroerozivní obrábění
Název bakalářské práce anglicky:	Electrodischarge machining
Akademický rok:	2017/2018
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Novák, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran: 41
	počet obrázků: 27
	počet tabulek: 1

Klíčová slova: Elektroerozivní obrábění, EDM, Hloubení, SEDM, Drátové řezání, WEDM, Elektroerozivní vrtání, EDD, Elektroerozivní řezání, EDS

Keywords: Electrical discharge machining, EDM, Sinking EDM, Wire cut EDM, Electrical discharge drilling, EDD, Electrical discharge sawing. EDS

Abstrakt

Tato bakalářská práce je teoretickou rešerší na téma elektroerozivního obrábění, která v první řadě shrnuje historii a funkční princip této metody. Dále charakterizuje jednotlivé druhy elektroerozivního obrábění spolu s oblastmi jejich použití. A na závěr poskytuje porovnání tří nejvýznamnějších typů EDM s ostatními výrobními metodami a obecná pravidla pro volbu té nejvhodnější.

Abstract

This bachelor thesis is a theoretical review on the topic of electrical discharge machining which in the first place summarizes history and functional principle of this method. Furthermore, characterizes individual types of electrical discharge machining along with areas of their application. Lastly, it provides comparison of the three most significant types of EDM with other manufacturing techniques and gives general guidelines for choosing the optimal one.

Obsah

1	Úvod	1
2	Historie	1
3	Princip elektroerozivního obrábění.....	4
4	Základní parametry EDM	6
4.1	Mezielektroodová vzdálenost a , GAP	7
4.2	Napětí U_0 , U_z	7
4.3	Proud I	7
4.4	Časový průběh impulsu T , t_d , t_e , t_i , t_0 , q	7
4.5	Frekvence f	9
4.6	Eroze materiálu V_0 , V_n , u	9
4.7	Polarita, K_p	9
5	Obrobitelnost materiálů.....	10
6	Fyzická realizace strojů pro EDM	11
6.1	Dielektrikum	11
6.2	Filtrace.....	13
6.3	Generátory	14
6.4	Servopohony	16
6.5	Nástrojové elektrody.....	17
7	Druhy EDM	19
7.1	Vrtání (angl. Electrical discharge drilling EDD).....	19
7.2	Řezání (angl. Electrical discharge sawing EDS).....	21
7.3	Hloubení (angl. Sinking electrical discharge machining SEDM)	22
7.4	Drátové řezání (angl. Wire electro discharge machining WEDM)	24
7.5	Elektroerozivní frézování (angl. Milling EDM).....	26
7.6	Elektroerozivní broušení (angl. Electrical discharge grinding EDG)	27
8	Srovnání elektroerozivního obrábění s ostatními výrobními metodami	29
8.1	Elektroerozivní hloubení a tvrdé frézování.....	29
8.2	Drátové řezání, laser, vodní paprsek, plasma	30
8.3	Elektroerozivní vrtání a vrtání laserem	32
9	Závěr.....	33
10	Seznam použité literatury	34
11	Seznam obrázků	40
12	Seznam tabulek	40
13	Seznam použitých zkratk a symbolů	41

1 Úvod

Elektroerozivní nebo elektrojiskrové obrábění (zkratka EDM z angl. Electrical Discharge Machining) je nekonvenční metoda obrábění elektricky vodivých materiálů. Úběru je dosaženo lokálním odtavováním obráběného materiálu opakovanými, vysokofrekvenčními, elektrickými výboji vznikajícími mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem, v kapalném dielektriku. Elektroerozivní obrábění se od konvenčních metod liší tím, že úběr materiálu není výsledkem mechanického procesu, ale elektro-tepelného procesu elektrické eroze. A protože nástrojová elektroda není při obrábění v přímém kontaktu s obrobkem, nedochází k žádným řezným silám. Cílem této práce je popsat princip elektrické eroze, charakterizovat metody obrábění erozi využívající a poskytnout srovnání ostatními výrobními metodami. [1]

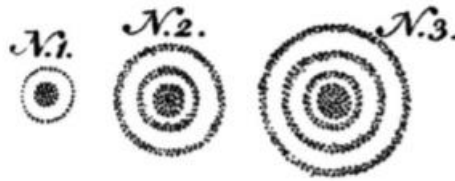
2 Historie

Přestože rozvoj EDM započal až po druhé světové válce, první zmínky o pozorování a použití elektrických výbojů můžeme najít již v 17. století. Jedna z prvních zmínek v literatuře pochází z roku 1694 od Roberta Boyla, který pozoroval statické výboje při tření diamantu. [4] V roce 1751 Benjamin Franklin objevil, že stejný fenomén vede k úběru materiálu. [5] Kolem roku 1745 vynalezli nezávisle na sobě německý duchovní Ewald George von Kleist a holandský vědec Pieter van Musschenbroek takzvanou Leidenskou láhev, pojmenovanou podle města Leiden, kde s ní Musschenbroek experimentoval. [6] Toto zařízení bylo schopné skladovat elektrický náboj a produkovat statický elektrický výboj.



Obr. 1 Leidenská láhev [32]

V roce 1766 Joseph Priestley objevil erozivní účinky elektrických výbojů generovaných z Leidenské láhve, když si všiml soustředných kruhů vznikajících v místě výboje na povrchu kovu připojeného k Leidenské láhvi. Tyto kruhy jsou dnes známé jak Priestlyho kruhy. [5]



Obr. 2 Priestlyho kruhy [33]

Myšlenka využití elektrických výbojů k obrábění však vznikla za druhé světové války, kdy byl pár sovětských fyziků Boris R. a Natalya I. Lazarenko pověřen úkolem minimalizovat opotřebení wolframových kontaktů elektrických výkonových spínačů. Boris R. Lazarenko poté ve své práci z roku 1944 *Inversion of the Erosion of metals and measures against contact devastation*. navrhl využití tohoto fenoménu k obrábění těžko obrobitelných kovových materiálů. [3]

Do té doby se využívaly pouze nízkofrekvenční elektrické výboje ve vzduchu (například k odstraňování zlomených závitníků), kdy se mezi elektrodu a součást přivedlo elektrické napětí a ty následně byly přiváděny do kontaktu mechanickou oscilací elektrody. Tato metoda nebyla schopna reprodukce žádného tvaru, kvalita povrchu byla velmi špatná a celkově se nejednalo o efektivní proces. [3]

Lazarenkovi si uvědomili, že pokud chtějí využít elektrickou erozi k obrábění, musí energii jisker lépe kontrolovat. Zjistili, že kratší výboje s větší četností vykazují vlastnosti použitelné pro obrábění a že ponoření obrobku a elektrody do dielektrika umožňuje koncentrovat energii výboje na velmi malou plochu. Za účelem generování jisker s těmito parametry vyvinuli RC relaxační obvod, ten je napájen stejnosměrným napětím a napětí na kondenzátoru musí být větší než průrazné napětí dielektrika, aby došlo k přeskočení jiskry. Po vybití kondenzátoru výbojem dojde k opětovnému nabití a celý proces se opakuje. Rozvoj elektroerozivního obrábění přišel právě včas, protože se v tu dobu Rusko potýkalo s nedostatkem diamantů pro obrábění tvrdých kovových slitin a hledalo alternativní obráběcí proces. [3]

Po konci války dále pokračoval jak teoretický výzkum, tak zdokonalování strojů pro EDM. Jednoduché RC obvody byly nejprve nahrazeny RLC obvody, které umožňovaly zvýšení frekvence výbojů, ovšem za cenu možných nepřesností vlivem indukčnosti cívek, která způsobovala větší rozptyl v energii jednotlivých výbojů. S omezeným úspěchem byly použity i generátory na bázi elektronek. [7]

V roce 1954 byla představena první komerční elektroerozivní hloubička Charmilles' Eleroda D1. [4]



Obr. 3 Charmilles' Eleroda D1 [34]

Ani přes rozsáhlý výzkum prováděný v 50 letech se nepodařilo překonat omezení relaxačních generátorových obvodů (relativně dlouhý čas nabíjení a krátký čas vybíjení), která vedla k nízké rychlosti úběru a vysokému opotřebení nástrojů. [4]

V šedesátých letech došlo k obrovskému rozvoji EDM způsobenému představením nového typu generátoru na principu tranzistorových spínačů, tyto statické pulsní generátory dokázaly vyřešit problémy relaxačních generátorů a jsou ve zmodernizovaných variantách používány i dnes. [4]

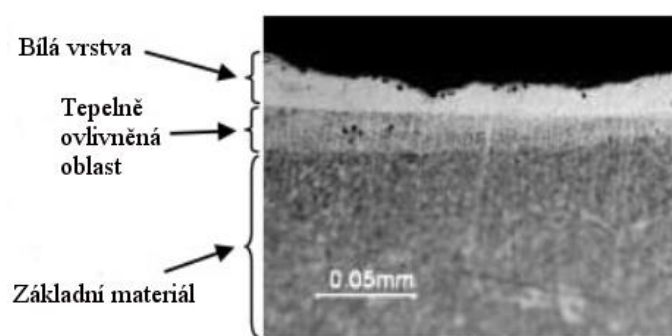
Dalším důležitým krokem ve vývoji EDM byl příchod mikroprocesorů, které umožnili číslicové řízení (1969 první NC EDM stroj AgieCut DEM 15) a později i CNC řízení (1972 Seibu). [4]

Od 80. a 90. let až do dnes dochází k dalšímu zdokonalování generátorů (tvarování časového průběhu pulsů pro dosažení co nejlepších parametrů), řídicích systémů (adaptivní řízení), využití CAD/CAM softwarů, monitorování a automatizaci celého procesu. [4] [7]

3 Princip elektroerozivního obrábění

Jak již bylo zmíněno, principem elektroerozivního obrábění jsou erozivní účinky elektrických výbojů. Samotného úběru materiálu je docíleno přivedením napětí U_0 mezi nástrojovou elektrodou a obrobek ponořené v kapalném dielektriku, vzdálené od sebe mezielektrodovou vzdáleností a . [3] [4] [9]

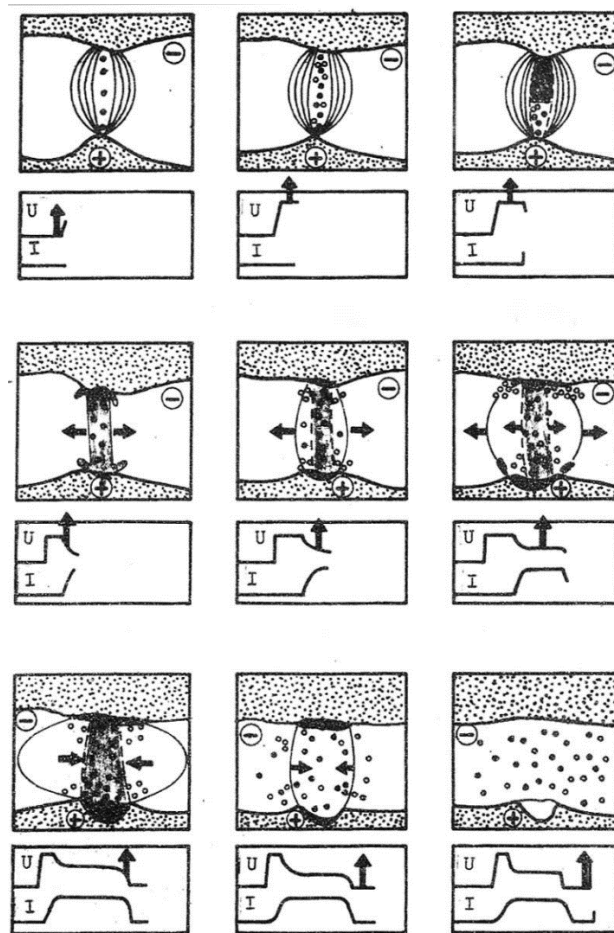
Výsledkem napětí mezi oběma elektrodami je elektrické pole. Tam, kde je elektrická pevnost dielektrika nejmenší, tj. v místě nejkratší vzdálenosti mezi elektrodami nebo v místě, kde je největší koncentrace vodivých částic dojde k lokální emisi elektronů z katody. Tyto primární elektrony jsou urychlovány elektrickým polem a narážejí do elektricky neutrálních částic dielektrika. Tím dochází k ionizaci, tedy tvorbě kladně nabitých iontů a sekundárních elektronů, které jsou urychlovány k odpovídajícím elektrodám a účastní se další ionizace. Po uplynutí času t_d nastane lavinový průraz dielektrika, kdy ionty a elektrony dosáhnou odpovídajících elektrod, utvoří vodivý kanálu o poloměru přibližně $10\mu\text{m}$ a začne téct proud I . Když nabitě částice dosáhnou elektrody, elektrony anody a ionty katody, předají svou kinetickou energii ve formě tepla. I přes krátké trvání výboje t_i ($10^{-2} \div 10^{-6}$ s) dojde lokálně k dosažení teplot mezi 3600 až 12000°C . Přestože jsou tyto teploty vyšší než teploty bodu varu jak obrobku, tak elektrody nedojde k jejich odpaření z důvodu obrovského tlaku (až 200 atm), způsobeného odpařením dielektrika v plasmovém kanálu. Po čase t_e je výboj ukončen a dochází k implozi bubliny odpařeného dielektrika, která způsobí vyvržení přehřátého, roztaveného materiálu do dielektrika, kde tuhne ve formě drobných kuliček o průměrech od 2 do $100\mu\text{m}$. Čerstvé dielektrikum s vlije do místa výboje, vyplaví vyvržený materiál a zakalí materiál, který byl roztaven, ale nedošlo k jeho vyvržení, tím vzniká takzvaná bílá vrstva (angl. recast layer). Bílá vrstva, o síle $1-40\mu\text{m}$, má martenzitickou strukturu a negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti výsledného obrobku. [3] [4] [9]



Obr. 4 Povrch materiálu po EDM [35]

Před přivedením následujícího pulsu se ponechává doba pauzy t_0 , aby došlo k deionizaci dielektrika a odplavení odtaveného materiálu. Celý cyklus se opakuje s frekvencí až v řádu MHz, a tak se výboje náhodně objevují po celé obráběné ploše. [3] [4] [9]

Po vyvržení roztaveného materiálu zůstává, v místě výboje, na povrchu obrobku i elektrody drobný kráter. K úběru tedy dochází jak na katodě, tak na anodě. Vztah mezi množstvím materiálu oderodovaného z katody a anody závisí na konkrétních příspěvcích elektronů a kladných iontů k celkovému toku proudu. Protože jsou kladné ionty přibližně 10^4 krát hmotnější než elektrony, a tudíž pomaleji urychlyitelné převládá na začátku výboje elektronová vodivost. To způsobuje větší opotřebení na anodě. Jak výboj postupuje, vliv kladných iontů na vodivost vzrůstá na úkor elektronů. Vzhledem k řádově vyšší hmotnosti iontů je i energie, předávaná ionty katodě vyšší a proporčně roste i množství materiálu z katody odebraného. Eroze materiálu z katody může činit až 99,5 % celkového odebraného materiálu. [3]



Obr. 5 Fáze výboje [24]

V závislosti na převládající vodivosti a časovém využití periody rozlišujeme dva základní typy výboje.

a) Výboj s elektrickou jiskrou

Tento typ výboje se vyznačuje krátkou dobou trvání impulzu ($t_i = 10^{-4} \div 10^{-6}$ s), nízkými hodnotami časového využití periody výboje ($q = 0,03 \div 0,2$) a vysokými frekvencemi. V důsledku krátkého trvání výboje převažuje elektronová vodivost a k většímu úběru materiálu tak dochází na anodě. V místě, kde elektrony dopadají na anodu, je vysoká proudová hustota pohybující se v řádu 10^6 A/mm² a teplota tam dosahuje až 10 000°C. Výboje s elektrickou jiskrou mají menší úběr materiálu a používají se tak pro obrábění na čisto a drátové řezání. [3] [24]

b) Výboj s elektrickým obloukem

Tyto výboje se naopak vyznačují delším trváním výboje ($t_i = 10^{-4} \div 10^{-2}$ s), vysokými hodnotami časového využití periody výboje ($q = 0,2 \div 0,8$) a nižšími frekvencemi. U elektrického oblouku se proudová hustota pohybuje v řádu 10^3 A/mm² a dosahuje se teploty kolem 3600°C. Vzhledem k vyšší hmotnosti iontů je vyšší energie, kterou předají katodě při dopadu. To má za následek i větší úběr materiálu. Výboje s elektrickým obloukem jsou tak vhodné ke hrubování. [3] [24]

4 Základní parametry EDM

Veškeré elektroerozivní obrábění probíhá mezi dvěma mezními stavy. Jedním z mezních stavů je zkrat, při kterém je mezielektrodová vzdálenost rovna 0, stejně tak napětí mezi elektrodami je nulové a protéká maximální proud, roven proudu zdroje. Druhým mezním stavem je takzvaný chod na prázdno, kdy je vzdálenost mezi elektrodami příliš velká, nebo napětí zdroje příliš nízké na to, aby došlo k výboji. Tento druhý mezní stav se vyznačuje maximálním napětím mezi elektrodami a nulovým proudem. Pokud zvolíme takové parametry, abychom se ocitli mezi těmito dvěma stavy bude docházet k elektrické erozi. [3]

Přestože u moderních strojů obsluha přímo nenastavuje všechny tyto základní parametry elektroerozivního obrábění nýbrž vybírá vhodnou obráběcí strategii, která na základě know-how výrobce zvolí optimální hodnoty, chtěl bych věnovat následující část práce popisu nejzákladnějších parametrů EDM a jejich vlivu na samotné obrábění.

4.1 Mezielektroková vzdálenost a , GAP

Vzdálenost mezi elektrodami, respektive mezi obrobkem a nástrojovou elektrodou je závislá především na napětí zdroje a elektrické pevnosti dielektrika. Pokud je mezielektroková vzdálenost, pro dané napětí a pevnost dielektrika, příliš velká nedojde k průrazu dielektrika a elektroerozivní obrábění, tak nemůže probíhat. V opačném případě, kdy je mezielektroková vzdálenost příliš malá dochází ihned po přivedení napětí k průrazu a vzniku oblouku, to je provázeno intenzivní světelnou emisí. Vzdálenost mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem se pohybuje v rozmezí 0,01-0,5 mm, přičemž obecně platí, že menší mezera bude u obrábění na čisto a větší u hrubování. To souvisí především s rozdílnými hodnotami napětí (nižší u dokončování a vyšší u hrubování). [3]

4.2 Napětí U_0 , U_z ,

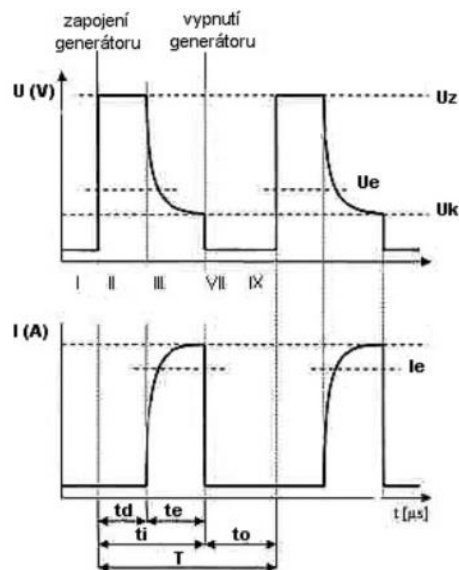
Napětím U_0 je myšleno napětí zdroje elektrických pulsů. U_0 musí být dostatečně vysoké, aby i přes ztráty ve vedení a na elektrodách byla hodnota napětí v mezielektrokové mezeře větší než hodnota Zápalného napětí U_z . Zápalným napětím myslíme velikost napětí, při které dojde k lavinovému průrazu dielektrika a výboji. Velikost zápalného napětí je funkcí mezielektrokové vzdálenosti a elektrické pevnosti dielektrika. [24] [63]

4.3 Proud I

Nastavováním proudu zdroje můžeme regulovat úběr materiálu. Například u hloubičky PENTA 433GS CNC lze proud nastavovat v rozmezí 0,5 – 300 A. Vyšší hodnoty proudu mají za následek vyšší úběry materiálu, ale také horší drsnost povrchu. [25] [26]

4.4 Časový průběh impulsu T , t_a , t_e , t_i , t_0 , q

Dnešní zdroje pro elektroerozivní obrábění již negenerují jednoduché pulsy jako RC, nebo RLC relaxační zdroje, ale využívají plně potenciálu tranzistorů, které umožňují tvarovat výstupní signál pro dosažení nejlepších výsledků, například z hlediska výsledné drsnosti povrchu, nebo minimalizace bílé vrstvy. Nicméně i přes složitý tvar pulsů lze k jejich popisu použít následující časové parametry.



Obr. 6 Časový průběh napětí a proudu u obecného výboje [24]

Doba zpoždění výboje t_d [μs] označuje část pulsu, ve které dochází k tvorbě vodivého kanálu, napětí zůstává konstantní na hodnotě U_z a systémem neprochází žádný proud. Po uplynutí t_d dochází k výboji a začátku takzvané činné doby výboje označované jako t_e [μs]. Během této doby prudce narůstá proud I tekoucí vodivým kanálem a zároveň klesá napětí až na hodnotu U_k , kdy dojde k ukončení výboje. Následuje doba pauzy t_0 [μs] sloužící k odplavení odtaveného materiálu proudem dielektrika a deionizaci dielektrika. Po skončení doby t_0 nastává další impuls. [24]

Za dobu impulsu t_i [μs] označujeme dobu od začátku impulsu do konce výboje. Platí tedy:

$$t_i = t_d + t_e$$

Periodou impulsu T [μs] pak definujeme jako:

$$T = t_d + t_e + t_0 = t_i + t_0$$

Důležitým parametrem pro charakterizaci výboje je časové využití periody impulsu q [-], který vyjadřuje, jakou část periody zaujímá samotný impuls.

$$q = \frac{t_i}{T}$$

Hodnoty pro hrubování jsou v rozmezí 0,2-0,8 a snažíme se o co největší využití periody pro obrábění, bez toho abychom příliš zkrátily dobu pauzy, zatímco u obrábění načisto je časové využití v rozmezí 0,03-0,2. [24]

K jednoduchému popisu výboje se také používají označení t_{ON} a t_{OFF} označující činnou a nečinnou část periody výboje. Kde t_{ON} odpovídá t_i a t_{OFF} je ekvivalentní k t_0 .

4.5 Frekvence f

Frekvencí u elektroerozivního obrábění rozumíme počet pulsů zdroje za sekundu, potažmo počet výbojů za sekundu. Je definována jako převrácená hodnota periody pulsu $f = \frac{1}{T}$, z čeho vyplývá, že při obrábění nahrubo je frekvence nižší a pohybuje se v řádech desítek kHz, zatímco u dokončování může vzrůst až na hodnoty kolem jednotek MHz. [3] [61]

4.6 Eroze materiálu V_0 , V_n , v

Kvůli podstatě elektrické eroze dochází k opotřebení materiálu jak na obrobku, kde je žádoucí a označujeme ho jako úběr V_0 [mm³], tak i na nástrojové elektrodě, kde je naopak nežádoucí a označujeme ho za opal V_n [mm³]. Pro větší názornost a jednodušší srovnání zavádíme i u EDM takzvaný objemový výkon obrábění Q_v [mm³/min]. [24]

$$Q_v = \frac{V_0}{t}; \text{ kde } t \text{ je doba obrábění.}$$

Objemový výkon elektroerozivního obrábění se pohybuje v závislosti na podmínkách v širokém rozmezí od 0,1 do 400 mm³/min. [3]

Vztah mezi úběrem a opalem vyjadřuje relativní objemové opotřebení nástroje v [%].

$$v = \frac{V_n}{V_0} \cdot 100\%$$

Relativní objemové opotřebení se pohybuje v rozmezí 0,1 - 10 %, přičemž vyšších hodnot dosahuje při dokončování, a je závislé především na době impulsu t_i , proudu I , polaritě a kombinaci materiálů elektroda-obrobek. [24]

4.7 Polarita, K_p

Při elektroerozivním obrábění můžeme využít dvě varianty zapojení nástrojové elektrody a obrobku ke zdroji pulsů. První variantou je zapojení s přímou polaritou, kdy se obrobek stává anodou (+ pól zdroje). Tohoto zapojení se někdy využívá u dokončování, kdy díky krátkému trvání výbojů převládá elektronová vodivost a dochází tak k většímu úběru materiálu z anody (obrobku). Alternativou je zapojení s nepřímou polaritou, při kterém je obrobek zapojen jako katoda (- pól). U zapojení s nepřímou polaritou naopak vlivem delších výbojů převládá iontová vodivost. To má za následek silnější erozi katody

a vlivem větší hmotnosti iontů i větší úběr z obrobku v porovnání s přímou polaritou. Pro rozhodování mezi přímou a nepřímou polaritou můžeme použít polární koeficient K_p [-].

$$K_p = \frac{v_{přímá}}{v_{nepřímá}}$$

Kde $v_{přímá}$ označuje relativní objemové opotřebení při zapojení s přímou polaritou a analogicky $v_{nepřímá}$ při zapojení s nepřímou polaritou. Pro $K_p < 1$ je z hlediska relativního objemového opotřebení nástroje výhodnější přímá polarita a pro $K_p > 1$ polarita nepřímá.

5 Obrobitelnost materiálů

Obrobitelnost je komplexní vlastnost materiálu vyjadřující jeho schopnost být obráběn danou technologií. Na rozdíl od konvenčního třískového obrábění, kde obrobitelnost závisí především na mechanických vlastnostech materiálu je u elektroerozivního obrábění závislá na vlastnostech fyzikálních. Elektroerozivně lze primárně obrábět materiály elektricky vodivé, ale objevují se i metody jako například metoda pomocné elektrody (angl. Assisting electrode method) které umožňují elektroerozivně obrábět i keramické izolanty. [8] Zatím však není jasné, zda tato metoda bude dostatečně efektivní pro použití v průmyslu. Protože při EDM nedochází k fyzickému kontaktu mezi nástrojem a obrobkem nemá na obrobitelnost vliv tvrdost materiálu. Díky tomu lze bez větších obtíží obrábět i velmi tvrdé materiály jako karbidy, wolfram, nebo zakalenou ocel, které jsou jen těžko, nebo nejsou vůbec obrobitelné konvenčním třískovým obráběním.

Obrobitelnost materiálů metodou elektrické eroze je nejvíce ovlivněna třemi fyzikálními vlastnostmi materiálu, a to teplotou tavení T_t [°C], měrným elektrickým odporem ρ [$\Omega \cdot m$] a tepelnou vodivostí λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].

Z grafů je patrné, že s rostoucím měrným elektrickým odporem obráběného materiálu roste i objemový výkon obrábění, zatímco s rostoucí teplotou tavení a stejně tak s rostoucí tepelnou vodivostí objemový výkon obrábění klesá.



Obr. 7 Závislosti objemového úběru materiálu na vlastnostech obráběného materiálu

6 Fyzická realizace strojů pro EDM

V následující části budou popsány základní části elektroerozivního obráběcího systému, nezbytné pro jeho funkci a provoz.

6.1 Dielektrikum

Dielektrika jsou látky schopné polarizace. [31] Jejich podmnožinou jsou izolanty a právě tekuté dielektrické izolanty se nejčastěji používají jako médium, ve kterém dochází k elektrické erozi. Dielektrikum plní při elektroerozivním obrábění několik nesmírně důležitých funkcí:

- 1) Elektricky od sebe izoluje nástrojovou elektrodu a obrobek.
- 2) Stabilizuje a koncentruje výboj.
- 3) Odvádí oderodované částice z mezielektrodové mezery.
- 4) Chladí elektrody.

Pro plnění uvedených funkcí máme na dielektrikum následující požadavky:

- 1) Dostatečná dielektrická pevnost a elektrický odpor, aby si udrželo své izolační vlastnosti i při malých mezielektrodových vzdálenostech až do dosažení zápalného napětí.
- 2) Vysoký chladicí účinek pro rychlý odvod tepla.
- 3) Schopnost rychlé deionizace po výboji.
- 4) Adekvátní viskozita zajišťující efektivní výplach částic z prostoru mezi elektrodami.
- 5) Vysoký bod vzplanutí.
- 6) Dobrá oxidační stabilita.
- 7) Rychlá kondenzace par
- 8) Minimální zápach a zdravotní nezávadnost.
- 9) Nízká cena a náklady na likvidaci.

Nejčastěji používaným dielektrikem jsou syntetické petroleje nebo deionizovaná voda, která má nesmírné výhody jako svou cenu, zdravotní nezávadnost a nenáročnou likvidaci, ale přesto ji nelze použít tam, kde je požadovaná vysoká přesnost. [1] [3] [4]

Aby elektroerozivní obrábění probíhalo bez komplikací musí být do prostoru mezi elektrodami stále přiváděno čisté, deionizované a nezahřáté dielektrikum. Toho lze docílit několika způsoby.

1) Ponořeniím

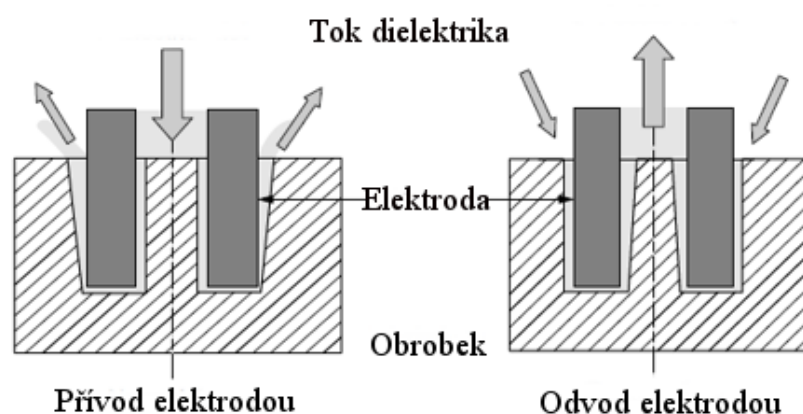
Tento způsob je použitelný pro hloubení mělčích tvarů a spočívá pouze v ponoření obou elektrod pod hladinu dielektrika. Pro efektivnější výplach lze přidat relativní pohyb mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem, kdy se například nástrojová elektroda cyklicky vzdaluje od obrobku a umožňuje tak vlití čerstvého dielektrika do pracovní mezery.

2) Výplach nuceným prouděním

V tomto případě je dielektrikum aktivně přiváděno tryskou mezi elektrody. Určitou nevýhodou je nerovnoměrné znečištění dielektrika v pracovní mezeře. Na straně, kde dielektrikum vystupuje z pracovní mezery je větší koncentrace oderodovaných částic a iontů což vede k větší pravděpodobnosti výskytu výboje a dochází tak k nerovnoměrnému obrábění.

3) Přívod/odvod elektrodou

Dielektrikum také může procházet, jedním či více kanály, přímo elektrodou. Nabízejí se zde dvě varianty. Tou první je vhánění dielektrika skrz nástrojovou elektrodu což opět vede k větší koncentraci vodivých částic na okrajích hloubené dutiny a k tvorbě úkosů. Tento problém eliminuje druhá varianta, kterou je nasávání dielektrika kanálem v nástrojové elektrodě z okolí.



Obr. 8 Vliv směru toku dielektrika [9]

4) Přívod obrobkem

Pokud obrobek obsahuje vhodné díry je možné aplikovat stejné principy pro přívod/odvod dielektrika jako v bodě 3.

5) Kombinací

Výše popsané způsoby výplachu lze samozřejmě kombinovat pro dosažení optimálních výsledků.

Dielektrikum lze také modifikovat přidáním jemných prášků. Prášky mohou být různých zrnitostí a z různých materiálů. Je studován vliv prášků z hliníku, chromu, mědi, křemíku, karbidu křemíku a dalších materiálů. Přidáním prášků do dielektrika lze zlepšit výsledný povrch a zvýšit objemový výkon obrábění. Nejlepší drsnosti povrchu dosahují nejmenší částice o velikosti 70-80 nm a s rostoucí velikostí zrn klesá vliv přidání prášku na výslednou kvalitu povrchu. Na druhou stranu nejjemnější prášky ústí v nejtlustší bílou vrstvu, zatímco větší částice v bílou vrstvu nejtenčí. [10] [11]

6.2 Filtrace

Při procesu elektrické eroze se do dielektrika uvolňuje odebraný materiál ve formě drobných částic. Tyto částice mají negativní dopad na izolační a chladicí vlastnosti dielektrika a mají za následek zhoršení drsnosti výsledného povrchu a rovnoměrnosti obráběcího procesu. Z těchto důvodů je pro elektroerozivní obrábění nezbytná filtrace dielektrika, která umožňuje používat náplň dielektrika delší dobu a zajišťuje stabilní výsledky obrábění. Filtrační systémy také často plní funkci chladiče dielektrika a zajišťují tak konstantní teplotu lázně, která je nutná pro maximální přesnost obrábění. [1] [27]

Nejčastěji používaným filtračním systémem jsou lamelové vložky. Konstrukce těchto filtračních elementů je poměrně jednoduchá. Jedná se o papír složený do tvaru hvězdy, který je umístěn kolem centrální trubky. Dielektrikum je pumpováno dovnitř tohoto filtračního elementu, prochází skrz filtrační papír, kde jsou zachytávány oderodované částičky a poté se vrací zpět do pracovního prostoru. [27]

Filtry jsou charakterizovány svými rozměry a propustností, tj. jak malé částičky již filtrem projdou. Ta se nejčastěji pohybuje kolem 3-5 μm . [28]

Filtrační vložky nelze používat opakovaně a po dosažení filtrační kapacity filtru, kdy již nemůže pojmout více částic dochází k jejich výměně. [27]



Obr. 9 Lamelové filtry pro EDM [36]

6.3 Generátory

Generátory impulsů jsou naprosto zásadní pro funkci každého elektroerozivního zařízení a od počátků elektroerozivního obrábění prodělaly pravděpodobně největší vývoj ze všech částí těchto strojů. Jejich funkcí je přivádět mezi obrobek a nástrojovou elektrodu impulsy o určitém tvaru, napětí, proudu a frekvenci. Generátory lze rozdělit do dvou kategorií podle toho, zda je jejich výstup závislý na poměrech v mezielektrodové mezeře či nikoliv. [24]

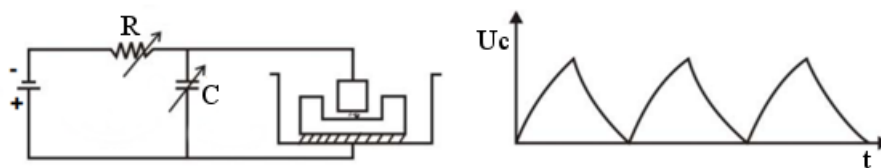
1) Generátory závislé

Do této skupiny patří nejstarší generátory používané pro elektroerozi a to RC a RLC relaxační obvody, které používali již Lazarenkovi při svých experimentech. RC generátor funguje na principu opakovaného nabíjení kondenzátoru C přes odpor R až na hodnotu napětí U_c , které je rovno průraznému napětí dielektrika v pracovní mezeře. Po dosažení této hodnoty napětí dojde k výboji a tím k vybití kondenzátoru. Kondenzátor je opět nabíjen zdrojem stejnosměrného napětí a celý cyklus se opakuje. Protože hodnota průrazného napětí dielektrika není konstantní a je závislá na velikosti mezielektrodové vzdálenosti a koncentraci vodivých částic, není konstantní ani velikost napětí U_c . RC generátory jsou tak závislé na stavu pracovní mezery. [3] [24]

Výhodou relaxačních obvodů je jejich jednoduchá konstrukce a s tím související spolehlivost. Nevýhodou jsou vysoké relativní opotřebení nástrojové elektrody a horší dosahované vlastnosti povrchu v porovnání s moderními tranzistorovými zdroji. [24]

RC relaxační obvody však nacházejí, díky krátkému trvání a relativně nízké energii pulzů, uplatnění i dnes, a to při micro EDM obrábění, kde svými výsledky předčí tranzistorové zdroje. Pro snížení relativního opotřebení nástrojové elektrody v důsledku změny směru toku proudu v plasmovém kanálu, bylo navrženo spojení RC obvodu s tranzistorem. Ten má za úkol zabránit právě této

fluktuaaci směru proudu a snížit relativní opotřebení nástrojové elektrody až o 40%. [40] [41]



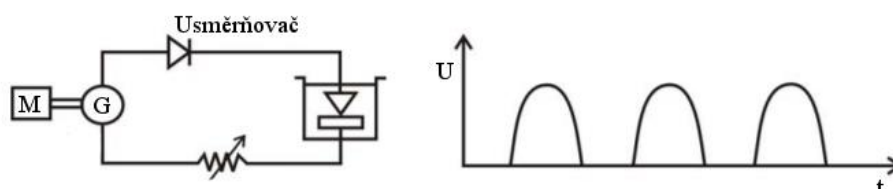
Obr. 10 Schéma a průběh napětí RC generátoru [44]

2) Generátory nezávislé

U těchto generátorů je možné nastavovat elektrické pracovní veličiny nezávisle na stavu v mezielektrodové mezeře.

a) Rotační generátory

U rotačních generátorů je tvorby opakujících se pulzů docíleno rotací motoru spojeného s dynamem. Tím je generováno střídavé napětí, jehož záporné nebo kladné půlvlny jsou odfiltrovány diodou. Tento typ generátorů pulzů dosahuje vysokých úběrů materiálu, ale zanechává velmi špatnou kvalitu povrchu, je proto vhodný pouze k hrubování a musí být doplněn o jiný typ generátoru zajišťující dokončování. Rotační pulzní generátor také neposkytuje žádnou možnost úpravy tvaru pulzu. [24] [42]

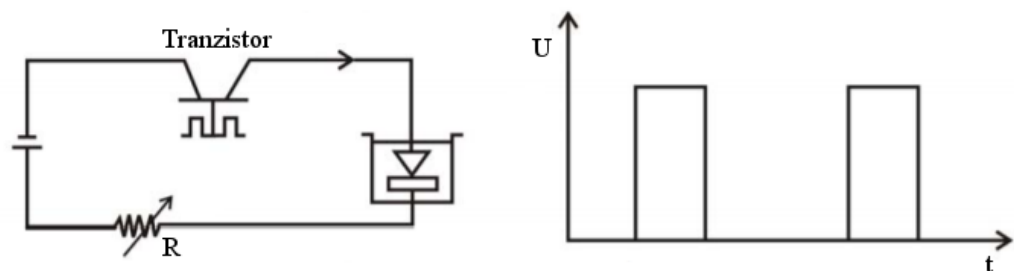


Obr. 11 Schéma a průběh napětí rotačního generátoru [44]

b) Tranzistorové pulzní generátory

Tyto polovodičové generátory umožňují snadné řízení frekvence, napětí, proudu i časového využití periody výboje. V nejjednodušším provedení se jedná o výkonový tranzistor, který spíná a vypíná napětí čímž tvoří hranaté pulzy. V realu je použito více paralelně zapojených tranzistorů a množství těchto tranzistorů, které spínají ovlivňuje velikost proudu dodávaného do pracovní mezeře. Dnešní generátory pulzů již negenerují pouze hranaté pulzy, ale využívají plně potenciálu tranzistorů k modulaci tvaru pulzu pro dosažení co nejlepších výsledků. Mezi tato zlepšení patří eliminace opotřebení

nástrojové elektrody, zmenšení bílé vrstvy a zlepšení kvality povrchu při vysokých úběrech materiálu a dosahované přesnosti. V současné době jsou generátory pulzů řízeny samotným CNC systémem, který vyhodnocuje jednotlivé výboje a na základě těchto dat upravuje výstup generátoru pro co nejlepší výsledky. Zajímavostí je, že například generátory firmy Exeron nevyžívají k tvorbě a tvarování pulzů tradiční mikroprocesory, ale programovatelná hradlová pole FPGA (angl. Field Programmable Gate Array), které díky své rychlosti umožňují tvorbu pulzů s velmi vysokou frekvencí. [42] [43]



Obr. 12 Schéma a průběh napětí tranzistorového generátoru [44]

6.4 Servopohony

Servopohony zajišťují veškeré pohyby stroje. Základními pohyby jsou pozicování po pracovním prostoru a udržování mezielektrodové vzdálenosti. Pohony v elektroerozivních strojích nemusí překonávat žádné síly způsobené obráběním a stačí proto, aby dokázaly efektivně pohybovat s hmotou stroje. Další výhodou EDM oproti konvenčnímu obrábění je jeho neprašnost. Servopohony stroje tak nemusí být tolik chráněny vůči pronikání prachu a dalších částic.

Při konstrukci stroje máme na výběr ze dvou základních variant. První variantou je nepřímý lineární pohon, tj. spojení krokového, s pohybovým šroubem nebo jinou formou transformace. Výhodami tohoto řešení jsou, mimo jiné, nižší cena, odolnost vůči znečištění a větší únosnost díky pohybovému šroubu. Značnou nevýhodou je pomalejší dynamika systému a vůle v pohybovém šroubu. [46]



Obr. 13 Spojení krokového servomotoru a kuličkového šroubu [47]

Druhou variantou je přímý lineární pohyb. Lineární motory se vyznačují skvělou dynamikou (zrychlení až 5G a posuv až 6m/s), díky absenci převodového mechanismu nemají žádný mrtvý chod ani vibrace, jejich implementace je velmi snadná a nevyžadují téměř žádnou údržbu. Nevýhodami lineárních motorů je stále vyšší cena, nižší únosnost a náchylnost na znečištění. [45] [46]



Obr. 14 Lineární motor ICD Ironcore [45]

6.5 Nástrojové elektrody

Jak již bylo několikrát zmíněno, při elektroerozivním obrábění nedochází ke kontaktu nástroje s obrobkem a určující jsou fyzikální, nikoliv mechanické, vlastnosti materiálů účastnících se obráběcího procesu. Tato skutečnost hraje roli i při výběru materiálu nástrojové elektrody. Aby byl materiál vhodný pro výrobu elektrod měl splňovat následující požadavky:

- 1) Vysoká teplota tání T_t
- 2) Vysoká tepelná vodivost λ
- 3) Nízký měrný elektrický odpor ρ_0
- 4) Nízká hmotnost, respektive hustota
- 5) Dostatečná pevnost
- 6) Dobrá obrobiteľnosť
- 7) Nízká cena

Body 1-3 jsou velmi důležité z hlediska minimalizace opalu nástrojové elektrody, zatímco body 4-7 jsou zásadní pro provoz. Vysoká hmotnost nástrojové elektrody vede k nutnosti stavět robustnější a pomalejší stroje, dostatečná pevnost je nezbytná pro to, aby se tenká elektroda nedeformovala pod vlastní vahou nebo při manipulaci. Náklady na elektrodu jsou podstatnou částí ceny elektroerozivního obrábění, a proto je nutné zvolit materiál, který bude nejen levný, ale i snadno obrobitelný do požadovaného tvaru. [9] [64]

Základními materiály používanými pro výrobu nástrojových elektrod jsou Měď (Cu), grafit (C), mosaz (CuZn) a wolfram (W). Dále se můžeme setkat s mědí s příměsí wolframu, nebo grafitem s příměsí mědi. Grafit se pro potřeby elektroerozivního obrábění vyrábí lisováním ve velkém množství typů. Tyto typy se liší hustotou, zrnitostí, pevností, tepelnou i elektrickou vodivostí a dalšími vlastnostmi. Každý typ je vhodný pro trochu jiné použití. Například obecně platí, že čím nižší zrnitost grafitu tím dochází k menšímu opotřebení elektrody a je dosahováno lepšího povrchu. Grafit se nejčastěji používá jako materiál hrubovacích elektrod pro hloubení a elektroerozivní frézování. Měď je vhodná pro obrábění na čisto, ale vykazuje vyšší opal než grafit. Mosaz se nejčastěji používá ve formě trubiček při vrtání a drátu u drátového řezání, tzn. u aplikací, kde nevádí vysoký opal. Wolfram je kvůli své ceně používán pouze k výrobě velmi malých elektrod pro nejnáročnější aplikace. V následující tabulce jsou tyto materiály porovnané na základě vlastností, které očekáváme od nástrojové elektrody. [9] [53]

	T _t [°C]	ρ [Kg/m ³]	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	ρ ₀ [μΩ·m ⁻¹]	Cena [Kč/dm ³]
Měď	1085	8900	400	0,015	1113
Grafit (SGL R8500)	Sublimuje při 3652	1770	80	14	650
Wolfram	3400	19300	190	0,05	12 777
Mosaz (w _{Cu} =70%)	965	8600	110	0,07	

Tab. 1 Porovnání důležitých vlastností materiálů elektrod [53] [54] [56]

Dalšími důležitými parametry nástrojové elektrody jsou tvar a pohyb, který vykonává. Ty se, stejně jako materiál, liší v závislosti na druhu elektroerozivního obrábění, ke kterému slouží a lze je použít jako kritérium pro rozdělení elektroerozivního obrábění na několik základních druhů.

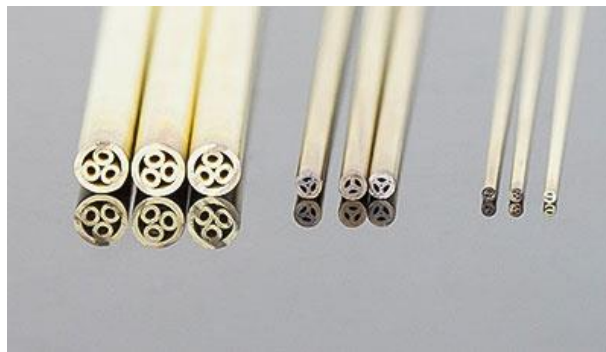
7 Druhy EDM

V této části budou popsány základní metody obrábění využívajících princip elektrické eroze.

7.1 Vrtání (angl. Electrical discharge drilling EDD)

Elektroerozivní vrtání se používá pro tvorbu děr malých průměrů (obvykle 0,5 – 1,5 mm) s přesností $\pm 0,05$ mm, do tvrdých materiálů, které nelze vrtat konvenčně, nebo tam, kde je potřeba velmi tenká a hluboká díra. Protože ani při elektroerozivním vrtání nedochází k fyzickému kontaktu mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem lze vrtat i otvory s poměrem hloubky ku průměru L:D až 300:1. [66]

Při vrtání je nástrojovou elektrodou trubička s jedním či více kanály obvykle o průměru od 0,3 do 3 mm jejímž středem je přiváděno tlakové dielektrikum. Elektroda je uvnitř, v závislosti na průměru, rozdělena na jeden či více kanálů. Toto rozdělení, díky rotaci trubičky, zajišťuje obrábění celé čelní plochy elektrody a zabraňuje tak vzniku trnu, tvořeného neoderozovaným materiálem obrobku, uvnitř trubičky. Tento trn by omezoval průtok dielektrika a následně mohl způsobit ucpání trubičky nebo zkrat. Přísuv elektrody je kolem 0,1mm/min pro vrtání děr o průměru 0,5 – 1 mm [12] [9]



Obr. 15 Vícekanálové mosazné elektrody [37]

Nejčastěji používaným materiálem elektrod pro elektroerozivní vrtání je mosaz. Mosazné elektrody vykazují značný opal, který ovšem při vrtání nehraje takovou roli jako například u hloubení. Alternativním materiálem elektrod je měď, používaná pro vrtání karbidů, nebo měď s příměsí wolframu pro vrtání extrémně malých průměrů. Značnou nevýhodou měděných elektrod je jejich vyšší cena v porovnání s elektrodami mosaznými.

Jako dielektrikum se u elektroerozivního vrtání dá použít deionizovaná voda, nebo syntetický petrolej. Nejčastěji používaným dielektrikem je voda, která je používána při

vrtání děr větších průměrů (0,5 – 3 mm) s přesností kolem $\pm 0,05$ mm. Pro vrtání otvorů menších než 0,5 mm se používá petrolej, se kterým lze dosahovat vyšší kvality povrchu a přesností $\pm 0,005$ mm i lepších. Tyto velmi přesné operace většinou probíhají kompletně pod hladinou dielektrika. [66]

Při vrtání je elektroda upnuta do sklíčidla a pro rovnoměrnější vrtání vykonává kromě posuvu směrem do materiálu i rotační pohyb. Elektroda je také co nejbližší u obrobku kluzně uložena v safírovém vodičku, aby byla zajištěna její přesná poloha.



Obr. 16 Vrtání měděné trysky mosaznou elektrodou 0,2 mm, PENTA EDM

Elektroerozivní vrtání má jednu zásadní nevýhodu oproti konvenčnímu vrtání. Při použití klasického vrtání je průměr výsledné díry roven, v rámci přesnosti, průměru nástroje. To samé se ovšem nedá říct o elektroerozivním vrtání. Protože mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem musí zůstat mezera, elektroda je vždy menší než výsledná díra. Pro dosažení přesného průměru musíme volit nejen průměr elektrody, ale i další parametry jako proud výboje, nebo časové využití periody výboje. Různými kombinacemi parametrů poté lze dosáhnout jednoho průměru díry s více průměry elektrod. Jednotlivé varianty se liší relativním opotřebením elektrody, přesností díry, obráběcím časem atd. Pokud tedy požadujeme přesný průměr díry, musí být průměr elektrod a obráběcí parametry zvoleny na základě experimentu a zkušenosti. [12]

Elektroerozivní vrtání dnes nachází uplatnění například při vrtání chladících kanálů v lopatkách turbín, pro vytváření startovacích otvorů pro drátové řezání, vrtání tenkých děr ve vstřikovačích a všude tam, kde je zapotřebí vrtání děr do tvrdých materiálů, nebo vrtání hlubokých tenkých děr. [66]



Obr. 17 EDM vrtání turbínové lopatky [38]

7.2 Řezání (angl. Electrical discharge sawing EDS)

Elektroerozivní řezání je rychlejší a produktivnější alternativou k drátovému řezání v oblasti dělení materiálu a tvorbě polotovarů z velmi tvrdých materiálů, pro jejichž řezání nelze použít pásovou pilu, nebo je její použití časově velmi náročné. [13]

EDS funguje podobně jako drátové řezání, ale místo mosazného drátu využívá jako elektrodu tenký ocelový pás, který podobně jako u pásové pily obíhá na dvou kladkách rychlostí kolem 16 m/s. Tloušťka pásu je obvykle v rozmezí 0,7-1,2 mm, výška 25 – 40 mm a délka 7420 nebo 9550 mm. Pás lze na rozdíl od drátu použít opakovaně. [14] [15]

Při řezání nepůsobí na nástrojovou elektrodu žádná řezná síla, a proto nedochází k uhýbání pásu, které se může objevit při řezání pásovou pilou, to vede k velmi přesným a rovným řezům. Další výhodou vyplývající z absence řezných sil je velmi nízká síla potřebná pro upnutí obrobku. [13]

Elektroerozivním řezáním se také od drátového řezání liší v parametrech výboje. Zatímco napětí a proud se pohybuje v obdobných hodnotách ($U=30 - 60V$ a $I=15 - 300A$), trvání výboje je u EDS mnohem delší (až 20 000 μs) a doba pauzy je zanedbatelná. [16]

Místo dielektrika se při EDS používá elektrolyt (vodný roztok křemičitanu sodného). Použití elektrolytu spolu s dlouhým trváním výbojů má za následek vznik elektrických oblouků mezi pásem elektrody a řezaným materiálem. Tyto oblouky jsou zodpovědné za větší objemový úběr materiálu než lze dosáhnout diskrétními výboji (jiskrami) u drátového řezání. Zároveň však nelze dosáhnout takové kvality povrchu jako při použití WEDM. [16]

Elektroerozivní řezání je tak vhodné pro řezání tyčoviny větších rozměrů z materiálů jako je rychlořezná ocel nebo slitiny titanu. Plocha řezu sice vykazuje větší drsnost a horší geometrickou přesnost než drátové řezání, to však na rozdíl od rychlosti řezání není do určité míry určující faktor při volbě metody dělení materiálu.



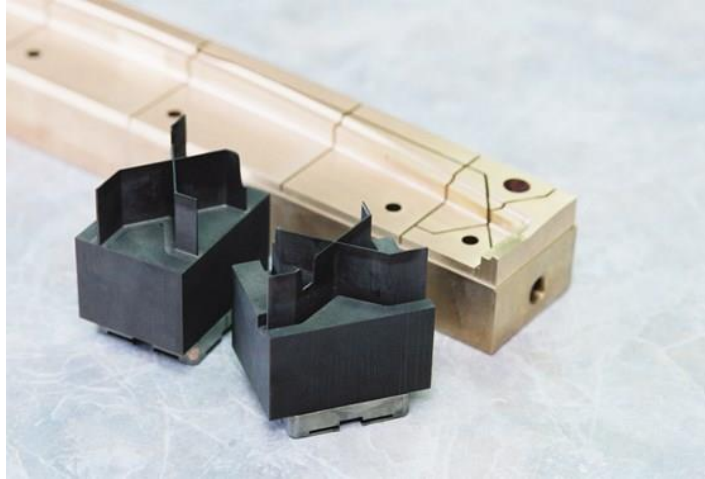
Obr. 18 Elektroerozivní pila [13]

7.3 Hloubení (angl. Sinking electrical discharge machining SEDM)

Hloubení je nejstarším komerčně používaným druhem elektroerozivního obrábění. Principem je použití tvarové elektrody pro tvorbu dutiny, která má tvar negativu elektrody zvětšený o pracovní mezeru. Celý proces probíhá v nádrži pod hladinou dielektrika, nejčastěji na bázi syntetického petroleje. [4]

Elektrody pro elektroerozivní hloubení byly dříve vyráběny především z mědi, dnes je měď nahrazována grafitem, ale stále se používá pro dokončovací operace, kde je potřeba velmi velká kvalita povrchu, nebo s přídavkem wolframu pro obrábění karbidů. Grafit má oproti mědi několik výhod. V první řadě je lehčí, což má obrovský význam u masivních elektrod. Je pevnější, takže ho lze použít i pro výrobu velmi tenkých a dlouhých elektrod. Má nižší tepelnou roztažnost, snáší větší proudovou hustotu a při hrubování vykazuje menší opotřebení než měď. Grafit lze velmi dobře obrábět metodou vysokorychlostního

obrábění HSC (angl. High speed cutting), ale je nutné zajisti kvalitní odsávání pracovního prostoru z důvodu vysoké prašnosti. [18]



Obr. 19 Tenkostěnné grafitové elektrody [48]

Elektroda při nejjednodušší variantě elektroerozivního hloubení vykonává pohyb pouze v jedné ose, tím je nejčastěji pohyb shora dolů. Tento systém však může, hlavně u hlubších dutin, vést k nerovnoměrnému obrábění a rozdílné drsnosti na bocích a čele dutiny. Problémy související s pohybem pouze v jedné ose jsou řešeny použitím takzvaných planetovacích cyklů, kdy elektroda vykonává navíc i excentrický pohyb. Tvar této excentrické dráhy se odvíjí od tvaru dutiny a může být kruhový, spirální, do hvězdy atd. Planetovací cykly zlepšují tvarovou přesnost dutiny, zkracují čas nutný k dosažení požadované přesnosti, podporují výplach pracovní mezery a snižují počet elektrod nutný k obrábění. Často je obrábění složeno z jednoduchého hrubování a dokončování s planetovým cyklem. Použití planetovacích cyklů však není triviální záležitostí a optimalizace cyklu i samotného návrhu elektrody pro dosažení požadované přesnosti je stále předmětem výzkumu. [4] [17] [9]

Dříve bylo elektroerozivní hloubení používáno ke kompletní výrobě zápustek, forem pro vstřikování plastů, nebo tlakové lití. S rozvojem metod pro konvenční obrábění tvrdých materiálů se hloubení začalo používat k dokončování těchto forem a tvorbě složitých, nebo velmi detailních prvků jako jsou žebra v předem vyfrézovaném polotovaru.

7.4 Drátové řezání (angl. Wire electro discharge machining WEDM)

Druhou nejpoužívanější metodou, vedle hloubení, je elektroerozivní drátové řezání. Obrábění je realizováno neustále se odvíjejícím drátem, který je napnut mezi dvěma vodíci hlavami a je posouván po definované trase. Touto metodou nelze obrábět slepé dutiny. [4]

Jak již vyplývá z názvu metody, elektrodou je drát, nejčastěji o průměru 0,25 mm. S rozvojem mikro obrábění se však vyskytují i použití drátů o průměrech až 20 μm . Nejpoužívanějším materiálem elektrody je mosaz, ale velmi tenké dráty se vyrábějí z wolframu, nebo oceli povlakované mosazí. Další speciální variantou jsou měděné, nebo mosazné dráty povlakované zinkem, se kterými se dosahuje rychlejšího obrábění než s dráty nepovlakovanými. [3] [4] [19]

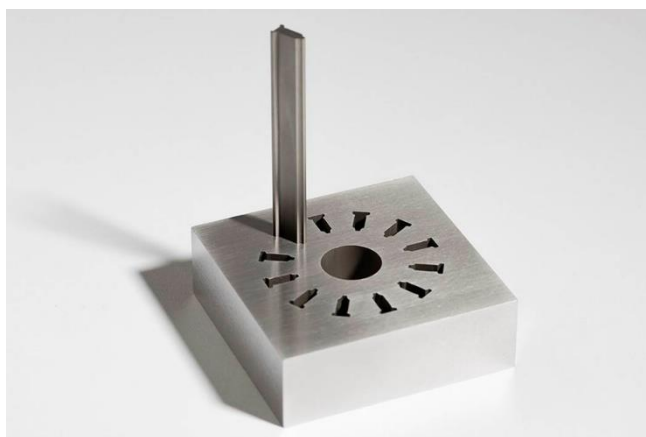
Drát je převážně orientován svisle a je neustále odvíjen shora dolů skrz řezaný materiál rychlostí až 3 m/min [3] Z důvodu vysokého opalu není možné použít drát opakovaně a je proto po průchodu pracovním prostorem odveden do zásobníku a poté odvezen k recyklaci. Aby se zamezilo vibracím, prohýbání a bylo dosaženo co největší tvarové přesnosti je drát napínán, v závislosti na jeho průměru, hmotností v řádu nižších desítek gramů až po několik kilogramů. V počátcích drátového řezání byla poloha drátu stacionární a vyříznutí požadovaného tvaru bylo realizováno pohybem stolu, ke kterému byl upnutý obrobek. Nyní jsou na většině strojů obě vodící hlavy drátu (horní i dolní) schopny, v určitém rozsahu, na sobě nezávislého pohybu a umožňují tak řezat například kónické tvary a přímkové tvarové plochy. Stejně jako u konvenčního CNC obrábění je i u drátového řezání trend zvyšovat počet řízených os, a rozšiřovat tak množství součástí obrobitelných touto metodou. [4] [9]



Obr. 20 Pohled na odvíjecí mechanismus a vodící hlavy, Penta EDM Říčany

Celý proces probíhá, stejně jako u hloubení, v nádrži pod hladinou dielektrika. Nejčastěji používaným dielektrikem u drátového řezání je deionizovaná voda, jejíž vodivost je sledována a v případě potřeby upravována řídicím systémem. Dielektrikum je také vstřikováno do pracovní mezery axiálně s drátem. Tohoto proudu také využívají některé systémy automatického navlékání drátu při začátku a v případě přetržení. [3] [4] [20]

Typickým příkladem obrobků drátového řezání jsou razníky, raznice a protlačovací nástroje. S přidáváním dalších, například rotačních, říditelných os se však pro WEDM otevírají nové možnosti uplatnění ve výrobě tvarově složitějších obrobků.



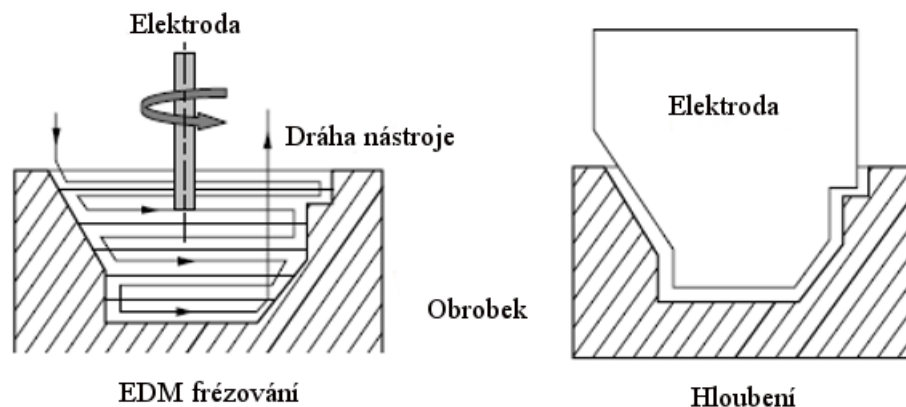
Obr. 21 Razník a raznice [49]



Obr. 22 Nástroj pro vytlačování hliníkových profilů [50]

7.5 Elektroerozivní frézování (angl. Milling EDM)

Elektroerozivní frézování používá rotující válcovou elektrodu, která se pohybuje po numericky řízených drahách a stejně jako konvenční fréza ubírá materiál vrstvu po vrstvě až do dosažení požadovaného tvaru. Jedná se o velmi univerzální metodu, která ovšem má své limity. Kvůli tvaru elektrody nelze dosáhnout ostrých vnitřních rohů a na bocích obráběné dutiny mohou být viditelné jednotlivé vrstvy oderodovaného materiálu, zvláště pokud dutina nemá svislé stěny. [4] [9]

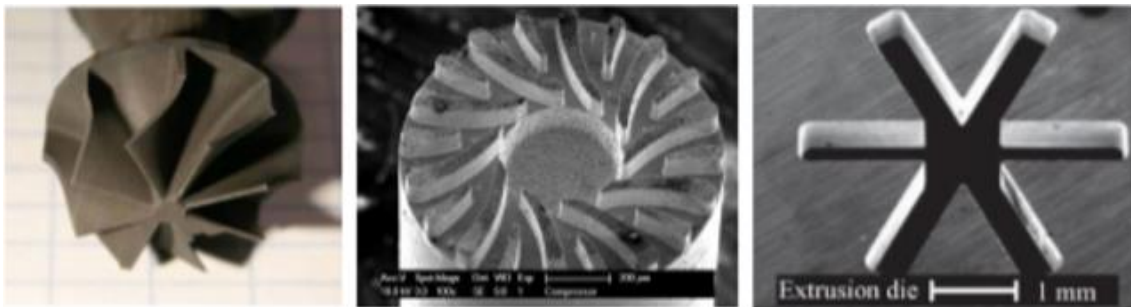


Obr. 23 Porovnání EDM frézování s elektroerozivním hloubením [9]

Rotace elektrody zajišťuje její rovnoměrné opotřebení a zlepšuje výplach pracovní mezery. Obrábění většinou neprobíhá pod hladinou dielektrika, to je dodáváno tryskami zvnějšku, nebo přímo skrze elektrodu. Elektroerozivní frézování také bylo úspěšně provedeno v mlze tvořené dielektrikem a vzduchem. [4] [9] [21]

Pro dosažení přesného tvaru a rozměrů je nutné brát v potaz i opotřebení elektrody. První možností je předpovídání opalu elektrody, které může být buď na základě zkušenosti, nebo matematického modelu. Druhou možností je vyhodnocování opotřebení elektrody v reálném čase na základě sledování změn výbojů. [4] [22]

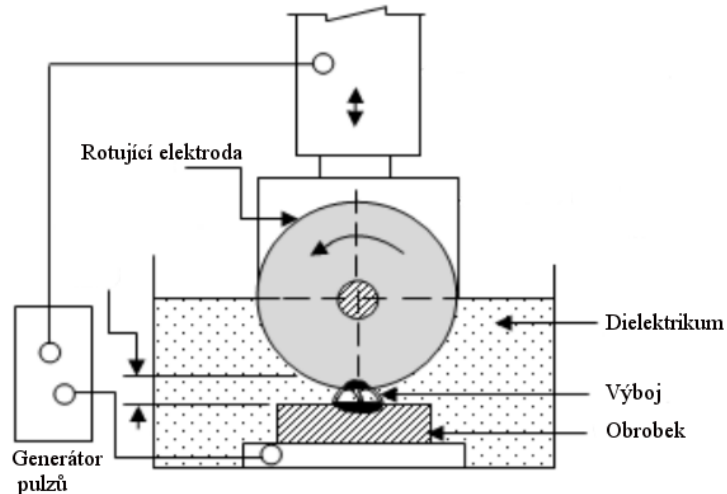
Elektroerozivní frézování zatím nenašlo příliš velké průmyslové využití při výrobě velkých součástí, ale zato je velmi používané při mikro obrábění, kde bylo s elektrodami z karbidu wolframu dosaženo i děr o průměru až 2,8 μm [23]



Obr. 24 Příklady možností mikro EDM frézování (zleva: turbína, disk kompresoru, vytlačovací hlava) [39]

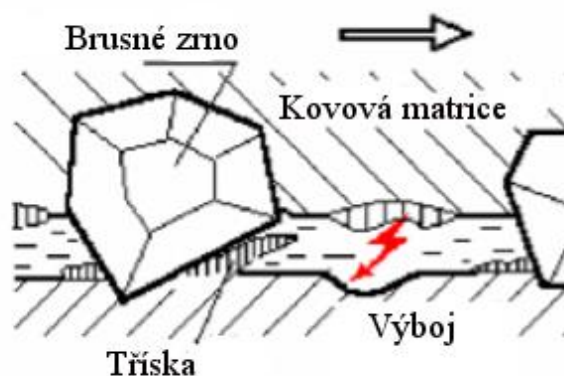
7.6 Elektroerozivní broušení (angl. Electrical discharge grinding EDG)

Elektroerozivní broušení bylo odvozeno od klasického elektroerozivního obrábění nahrazením stacionární nástrojové elektrody, elektrodou rotující. Princip úběru materiálu je u EDG totožný jako u klasického elektroerozivního obrábění. Díky rotaci elektrody dochází však k efektivnějšímu výplachu pracovní mezery, což má za následek větší úběr a lepší kvalitu výsledného povrchu než u klasického EDM. Elektroerozivní broušení vykazuje 2x až 3x větší úběr materiálu při broušení extrémně tvrdých materiálů než konvenční broušení. Navíc při tomto procesu nedochází k fyzickému kontaktu mezi nástrojem a obrobkem, elektroerozivní broušení je tak vhodné k obrábění i velmi tenkých a křehkých dílů. [29]



Obr. 25 Schéma elektroerozivního broušení EDG [29]

EDG však zanechává horší kvalitu povrchu než konvenční broušení. Jednou z možností, jak zlepšit výsledný povrch je provést konvenční broušení poté co je většina materiálu odebrána broušením elektroerozivním. Alternativou je spojení obou technologií v jednu hybridní technologii, která se nazývá elektroerozivní abrazivní broušení (angl. Electrical discharge abrasive grinding EDAG). V této technologii je grafitová nebo kovová elektroda používaná u EDG nahrazena kovem vázaným brusným diskem a k úběru materiálu dochází kombinací elektrické eroze a mechanické abraze zrn v brusném disku. Elektroerozivní abrazivní broušení dále zvyšuje úběr materiálu a zlepšuje kvalitu výsledného povrchu oproti EDG. [29]



Obr. 26 Kombinovaný úběr materiálu metodou EDAG [30]

8 Srovnání elektroerozivního obrábění s ostatními výrobními metodami

V této části budou porovnány nejpoužívanější druhy elektroerozivního obrábění s alternativními metodami, které mohou EDM v některých případech nahradit, nebo doplnit pro efektivnější výrobu.

8.1 Elektroerozivní hloubení a tvrdé frézování

Elektroerozivní hloubení a tvrdé frézování jsou dvě výrobní metody, které se v současnosti uplatňují při výrobě forem a zápusťek z kalených nástrojových ocelí. Tvrdým frézováním rozumíme vysokorychlostní obrábění (angl. HSC high speed cutting) ocelí s tvrdostí přes 56 HRC, nebo pevností nad 2000 N/mm². Oba výrobní procesy mají své výhody a nevýhody, které hrají roli při volbě vhodnější metody pro konkrétní aplikaci. Možností je samozřejmě také využití jak hloubení, tak tvrdého frézování pro výrobu jedné součásti, kdy výhody jedné metody kompenzují nevýhody metody druhé. [50] [52]

Elektroerozivní obrábění je velmi pomalý proces. Zásadní výhodou frézování oproti hloubení je proto vyšší úběr materiálu a tím i kratší strojní časy. [55]

Jedním z hlavních kritérií při volbě obráběcí metody je geometrie výsledného obrobku. Tvrdým frézováním nelze docílit ostrých vnitřních rohů a složitých tvarů, které jsou obtížně dosažitelné frézou. Hloubení je také vhodnější a často i jedinou možností při tvorbě tenkých hlubokých prvků jako jsou žebra jejichž tloušťka je u malých a středně velkých forem 0,8 – 3 mm a jejich délka je pěti až desetinásobkem jejich šířky. Elektroerozivní obrábění se zpravidla volí pro tvarově složitější obrobky s množstvím drobných prvků a detailů. Jak již bylo zmíněno lze proces obrábění optimalizovat zapojením obou metod. Velké kapsy a tvarově jednodušší části mohou být frézovány a detaily následně přidány elektroerozivním hloubením. [51] [52] [55]

Dalšími kritérii, které mohou mít vliv na volbu vhodné obráběcí metody je kvalita povrchu a výsledná přesnost. Po tvrdém frézování většinou následuje leštění, pokud je požadován leštěný povrch, zatímco pomocí EDM je možné dosáhnout povrchu odpovídajícímu leštění přímo, například při použití suspenzí místo čistého dielektrika. Na druhou stranu po hloubení na povrchu zůstává tepelně ovlivněná oblast a bílá vrstva, které mohou být nepřijatelné pro některé aplikace. U frézování je snadnější dodržovat předepsané

tolerance než u hloubení, kde dochází ke sčítání nepřesností od obrábění elektrody a od samotného hloubení, u kterého musíme počítat s mezielektrodovou vzdáleností. Při hloubení také klesá přesnost se zvyšující se kvalitou povrchu a musíme proto vyvážit výsledný povrch s požadovanou přesností. [21] [50] [51]

Obecně řečeno, pro součástky, které lze vyrobit v požadovaných parametrech oběma metodami bude zvolena ta, které je v konkrétním případě dostupnější a levnější.

8.2 Drátové řezání, laser, vodní paprsek, plasma

Všechny tyto metody jsou primárně určeny pro řezání tvarů z plochých materiálů i když metoda WEDM je díky nezávisle ovládaným vodičím hlavám, schopna vytvářet i tvarově složitější díly.

Prvním kritériem, podle kterého můžeme výše zmíněné metody porovnávat je rozsah materiálů, které lze danou metodou řezat. Drátovým řezáním lze řezat pouze elektricky vodivé materiály, zatímco laser, plasma a vodní paprsek mohou řezat i materiály nevodivé. Laser je však limitován na ploché, rovnoměrné, nelesklé materiály, které mají schopnost tavit se, nebo odpařovat. [58]

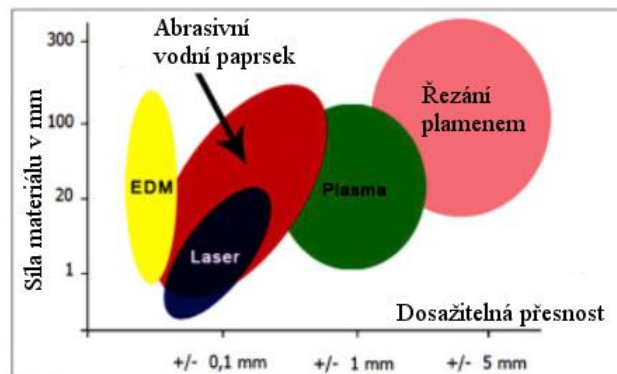
Dalším důležitým aspektem při volbě nejvhodnější metody je tloušťka materiálu, který lze jednotlivými metodami řezat v požadované přesnosti. Drátové řezání je asi nejuniverzálnější metodou v tomto kritériu. Pomocí WEDM lze řezat s vysokou přesností a kvalitou povrchu (běžně $\pm 0,005\text{mm}$, Ra0,2) materiál od tloušťky menší než 1 mm až po více než 400 mm. Tato vysoká přesnost je však vykoupena velmi nízkou rychlostí elektroerozivního procesu. [58] [61] [62]

Velmi rychlou metodou je však řezání/obrábění laserem (angl. Laser beam machining LBM), kterým lze běžně řezat materiál do 20 mm. Výkonnější lasery mohou řezat i silnější plechy, ale za cenu nižší přesnosti. Ta se u laseru pohybuje od $\pm 0,025$ do $\pm 0,1\text{mm}$ v závislosti na tloušťce řezaného materiálu. [58] [59]

Další velmi efektivní volbou je řezání vodním paprskem s přidaným abrazivním médiem (angl. Abrasive water jet AWJ). Touto metodou jsou nejčastěji řezány materiály do 100 mm s přesností pohybující se kolem $\pm 0,1\text{mm}$. Se sníženou přesností a rychlostí lze však řezat i materiál o tloušťce 250 mm i více. Existují i přesnější metody využívající

vodní paprsek jako například Micro Waterjet od firmy MEYER, která podle výrobce dosahuje přesnosti až $\pm 0,01\text{mm}$, drsnosti Ra1,6. [58] [59] [60]

Poslední metodou, kterou jsme nezmínili v kontextu kapacity a přesnosti je řezání plasmou. V této metodě je materiál taven vysokoenergetickým proudem iontů a natavený materiál je vyháněn z řezu tlakovým plynem, kterým může být, v závislosti na řezaném materiálu, vzduch, kyslík, nebo směs vodíku s argonem. Plasmou se nejčastěji řezají ocelové plechy do tloušťky 30 mm s přesností kolem $\pm 1\text{ mm}$. Po dokončení řezu zůstává na spodní straně často struska tvořená odtaveným a zoxidovaným materiálem. Řezání plasmou se svou přesností nemůže srovnávat s předchozími metodami, nicméně se jedná o velmi rychlou a používanou metodu řezání plechů. [58] [59]



Obr. 27 Porovnání metod řezání z hlediska přesnosti a síly řezaného materiálu [57]

Posledním kritériem, podle kterého budou tyto metody porovnávány je, zda ovlivňují strukturu materiálu v místě řezu a bezprostředním okolí. Drátové řezání, laser i plasma jsou tepelné procesy, které v průběhu řezání vnášejí do řezaného materiálu teplo a tím mohou měnit jeho mikrostrukturu. Tento efekt je nejsilnější u řezání plasmou, kde se na povrchu mohou objevovat mikrotrhliny a dochází ke zvětšení zrn. Mírnější vliv na řezaný materiál má řezání laserem a nejpříznivější metodou z těchto tří tepelných procesů je drátové řezání, u kterého dochází ke tvorbě bílé vrstvy o tloušťce do $30\mu\text{m}$. U řezání vodním paprskem nebyly pozorovány žádné změny struktury řezaného materiálu. [57]

U volby nejvhodnější metody pro řezání plochých materiálů platí, že pokud lze dosáhnout analogického výsledku více technologiemi je volena ta, která je levnější, nebo ta, která se jeví jako lepší investice do budoucna.

8.3 Elektroerozivní vrtání a vrtání laserem

Vrtání laserem funguje na principu tavení a odpařování materiálu v místě požadovaného otvoru vysoce koncentrovaným paprskem laseru. Funkční princip elektroerozivního vrtání již byl popsán v předchozí části této práce. Obě tyto metody jsou hojně využívány k vrtání chladících děr v komponentech turbín, jako jsou lopatky, nejen v leteckém průmyslu. Množství těchto děr nejčastěji o průměrech 0,3 – 0,9 mm se u moderních proudových motorů může pohybovat v desítkách tisíc. Jak EDD, tak vrtání laserem mají značné výhody oproti konvenčnímu vrtání při obrábění těchto malých otvorů s vyšším poměrem L:D ve velmi tvrdých a odolných slitinách. [67] [69]

Jako kritéria pro porovnání těchto metod můžeme použít geometrickou přesnost a povrch výsledného otvoru spolu s rychlostí vrtání. Elektroerozivní vrtání dosahuje cca 6x vyšší přesnosti (nižšího zužování) otvoru než laser. Tento rozdíl byl naměřen u vrtání 0,8 mm díry do vzorků o tloušťce 5 a 10 mm. Při stejné studii bylo změřeno, že elektroerozivní vrtání zanechává na povrchu díry menší přetavenou bílou vrstvu než laser. U EDD se síla bílé vrstvy pohybovala v rozmezí 7 - 15 μm zatímco u vrtání laserem se pohybovala v rozmezí 14 - 28 μm pro 5 mm vzorky a dosáhla až tloušťky 80 μm u vzorků 10 mm. Je však nutné podotknout, že čas vrtání byl u laseru mnohonásobně kratší. Konkrétně vrtání 10 mm vzorku laser zvládl za méně než tři sekundy, zatímco nejrychlejší čas zaznamenaný pro EDM byl 48s. Efektivitu elektroerozivního vrtání lze zvyšovat například použitím více vrtacích hlav zároveň. [67]

Vrtání laserem je vhodné především pro tenčí díly (cca do 5 mm), kde lze využít rychlosti této metody s minimem jejích negativ (zhoršení přesnosti a silnější bílé vrstvy), která jsou závislá především na tloušťce vrtaného materiálu. Elektroerozivní vrtání je i přes svou nižší rychlost vhodnější pro vrtání silnějších dílů a tam, kde je potřeba minimalizovat ovlivnění materiálu, které může mít u tak namáhaných dílů jako jsou lopatky turbín velký vliv na výslednou pevnost a integritu součástky. EDD má ještě jednu nevýhodu oproti laserovému vrtání a to, že jím lze obrábět pouze vodivé materiály což představuje problém například u součástek s keramickými tepelně izolačními povlaky (angl. Thermal barrier coating). Ty jsou elektricky nevodivé a síla povlaků se pohybuje od 100 μm do 2 mm. [67] [70]

Obě metody vrtání se stále zdokonalují a objevují se i hybridní metody jako laser microjet od společnosti Synova, která spojuje vodní paprsek s laserem nebo propojení EDD a laseru v jeden automatizovaný celek, což umožňuje využití výhod obou procesů. [68]

9 Závěr

Elektrická eroze je jedním z nejuniverzálnějších principů obrábění spadajících do kategorie nekonvenčních výrobních procesů. Tento fakt je dobře pozorovatelný na množství a rozmanitosti aplikací tohoto jevu pro účely obrábění, které se na trhu objevily od začátku EDM po druhé světové válce. Pomocí elektrické eroze můžeme řezat, vrtat, brousit i obrábět složité tvarové plochy. Tato diverzita se však neprojevuje jen množstvím úkonů, které elektrická eroze umožňuje, ale i škálou rozměrů a materiálů obrobků na kterou je lze použít.

V závěru této práce jsme porovnali elektroerozivní hloubení s tvrdým frézováním, drátové řezání s řezáním laserem, vodním paprskem a plasmou a elektroerozivní vrtání s vrtáním laserem. Z porovnání vyplývá, že přestože se ostatní výrobní metody stále zdokonalují a zpřesňují, elektroerozivní obrábění je i nadále metodou dosahující nejvyšší přesnosti a kvality povrchu. Tato přesnost je však vykoupena malou rychlostí. Pro díly, které lze v požadovaných tolerancích a kvalitě povrchu vyrobit více metodami musíme při volbě zvážit i ekonomická a logistická hlediska.

Ve všech oblastech elektroerozivního obrábění, ať se jedná o generátory pulsů, materiály elektrod, nebo řídicí systémy, stále probíhá aktivní výzkum a věřím, že všechny typy EDM budou dále zdokonalovány a rozvíjeny směrem k dosažení jejich plného potenciálu.

10 Seznam použité literatury

- [1] JAMESON, Elman C. *Electrical discharge machining*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, Machining Technology Association, c2001. ISBN 978-0-87263-521-0.
- [2] KRAR, Stephen F. a Arthur GILL. *Exploring advanced manufacturing technologies*. New York: Industrial Press, c2003. ISBN 0831131500.
- [3] MCGEOUGH, J. A. *Advanced methods of machining*. New York: Chapman and Hall, 1988. ISBN 0412319705.
- [4] VANDERAUWERA, Wouter. *Development of proces planning tools for EDM operations*. Gent, 2017. Katholieke Universiteit Leuven.
- [5] ANDERS, A. “Tracking down the origin of arc plasma science I. Early pulsed and oscillating discharges,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 31, no. 5, pp. 1052–1059, 2003.
- [6] *Pieter (Petrus) van Musschenbroek* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20090326073456/http://chem.ch.huji.ac.il/history/musschenbroek.htm>
- [7] SCHUMACHER, B.M., R. KRAMPITZ a J.P. KRUTH. Historical Phases of EDM Development Driven by the Dual Influence of “Market Pull” and “Science Push”. *Procedia CIRP*. 2013 (Volume 6), 5-12.
- [8] GOTOH, Hiromitsu, Takayuki TANI a Naotake MOHRI. EDM of Insulating Ceramics by Electrical Conductive Surface Layer Control. *Procedia CIRP*. 2016 (Volume 42), 201-205.
- [9] EL-HOFY, Hassan. *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. New York: McGraw-Hill Professional, 2005. ISBN 0071453342.
- [10] CHEN, F.C. a Yih-Fong TZENG, *Investigation into some surface characteristics of electrical discharge machined SKD-11 using powder-suspension dielectric oil*, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 170, Issues 1–2, 2005, Pages 385-391, ISSN 0924-0136,

- [11] MING, Quan Yan a Liu You HE. *Powder-suspension dielectric fluid for EDM. Journal of Materials Processing Technology*. 1995 (Volume 52), 44-54., ISSN 0924-0136,
- [12] RISTO, M., R. HAAS a M. MUNZ. Optimization of the EDM Drilling Process to Increase the Productivity and Geometrical Accuracy. *Procedia CIRP*. 2016 (Volume 42), 537-542.
- [13] KORN, Derek. Electrical Discharge Saw Slices Through Hard Alloys. *Modern Machine Shop* [online]. 20. 08. 2018 [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/electrical-discharge-saw-slices-through-hard-alloys>
- [14] Electrical Discharge Sawing Machines. *Tech EDM: Solution for EDM Machines* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: http://techedm.com/P_view.asp?pid=47
- [15] RAVINDER, Kumar a Singh INDERDEEP. Electric discharge sawing of hybrid metal matrix composites. *Journal of Engineering Manufacture: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B*. 2015. DOI: 10.1177/0954405415611360.
- [16] NAGABHUSHANA, Ramesh N., Kalley HARINARAYANA a Naik B. BALU. Machining Characteristics of H.S.S. & Titanium Using Electro Discharge Sawing and Wire – Electrodischarge Machining. *Procedia Materials Science*. 2014, (Volume 6), 1253-1259.
- [17] SANCHEZ, J.A., L.N. LOPEZ DE LACALLE, A. LAMIKIZ a U. BRAVO. Dimensional accuracy optimisation of multi-stage planetary EDM. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002, (Volume 42), 1643-1648.
- [18] KLOCKE, F., M. SCHWADE, A. KLINK a D. VASELOVAC. Analysis of Material Removal Rate and Electrode Wear in Sinking EDM Roughing Strategies using Different Graphite Grades. *Procedia CIRP*. 2013, (Volume 6), 163-167.
- [19] KLOCKE, F., D. LUNG, D. THOMAIDIS a G. ANTONOGLU. Using ultra thin electrodes to produce micro-parts with wire-EDM. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, (Volume 149), 579-584.

- [20] ULLMANN, Werner, B. SCHUMACHER, A. SIEG, Silvano MATTEI, H-U FENNER, G. WETTSTEIN a Herbert RUH. *Automatic set-up electroerosion machining method*. US3891819A. Zapsáno 24.06.1975.
- [21] TAO, Jia, Albert J. SHIH a Jun NI. Near-Dry EDM Milling of Mirror-Like Surface Finish. *International Journal of Electrical Machining*. 2008, (No. 13).
- [22] BLEYS, P., J.P. KRUTH a B. LAUWERS. Sensing and compensation of tool wear in milling EDM. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004, (Volume 149), 139-146.
- [23] HAN, Fuzhu, Yuji YAMADA, Taichi KAWAKAMI a Masanori KUNIEDA. Experimental attempts of sub-micrometer order size machining using micro-EDM. *Precision Engineering*. 2006, (Volume 30), 123-131.
- [24] BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění: Skripta FS ČVUT*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989.
- [25] Hloubička PENTA 433GS CNC. *PENTA Trading* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <http://www.penta-edm.cz/hloubicka-penta-433gs-cnc/>
- [26] KHAN, Ahsan Ali, Ali MUNIRA a Shaffiar NORHASHIMAH. Relationship of Surface Roughness with Current and Voltage During Wire EDM. *Journal of Applied Sciences*. 2006, (6), 2317-2320. DOI: 10.3923/jas.2006.2317.2320.
- [27] Filtering the Dielectric. *Oelheld: Inovative Fluid Technology* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <http://www.oelheld.com/innovation/important-facts-about-spark-erosion/filtering-the-dielectric.html>
- [28] MANN+HUMMEL *EDM filters: High performance filtration* [online]. [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: https://oe-products.mann-hummel.com/fileadmin/user_upload/kataloge/kataloge-wartungsanleitungen-mann%2Bhummel/erodierfilter-edm/MH_EDM_TopSeller_EN_V2.pdf
- [29] YADAV, Ravindra Nath a Vinod YADAVA. *ELECTRICAL DISCHARGE GRINDING (EDG): A REVIEW*. Allahabad, India: YMCA University of Science & Technology, 2012.
- [30] KOZAK, Jerzy. Abrasive electrodischarge grinding (AEDG) of advanced materials. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2002, 83-101.

- [31] Kolektiv autorů. *Malý encyklopedický slovník*. 1. Praha: Academia, 1972.
- [32] HOUSTOUN, Robert Alexander. *Elements of Physics*. New York: Longmans, Green and Co., 1919.
- [33] PRIESTLEY, Joseph. *The History and Present State of Electricity*. London, 1767.
- [34] History of GF Machining Solutions. +GF+ AgieCharmilles [online]. [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: <https://gfms.ru/history-of-gfms/>
- [35] ZEILMANN, Rodrigo P., Thiago VACARO, Fernando MOREIRA ZANOTTO a Mariana CZARNOBAY. Metallurgical alterations in the surface of steel cavities machined by EDM. *Matéria (Rio de Janeiro)*. 2013, (Vol. 8). ISSN 1517-7076.
- [36] *PENTA Trading: Spotřební materiál* [online]. [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: <http://www.penta-edm.cz/text-spotrebni-material/>
- [37] *Holepop: EDM Supplies for Small Hole Drilling* [online]. [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: <https://www.holepop.com/>
- [38] *Winbro Group Technologies: High Pressure Turbine Blades* [online]. [cit. 2018-07-19]. Dostupné z: <http://www.winbrogroup.com/applications/turbineblades/>
- [39] LIU, Kun, Bert LAUWERS a Dominiek REYNAERTS. Process capabilities of Micro-EDM and its applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010, (Volume 47), 11-19.
- [40] HYEONG-GYUN, Cheong, Kim YOO-SEOK a Chu CHONG-NAM. Machining Characteristics of an RC-type Generator Circuit With an N-channel MOSFET in Micro EDM. *Procedia CIRP*. 2018, (68), 631-636.
- [41] JAHAN, Muhammad Pervej, Yoke San WONG a Mustafizur RAHMAN. A Comparative Study of Transistor and RC Pulse Generators for Micro-EDM of Tungsten Carbide. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2008, (Vol.9 No.4), 3-10.
- [42] SHAH, Aditya, Vishal PRAJAPATI, Pavan PATEL a Akash PANDEY. *Development of pulsed power supply for micro EDM*. 2007.
- [43] Nové generátory v hloubičkách Exeron, *MSV Brno*. 2009. Dostupné z: http://www.penta-edm.cz/dokumenty/aktuality/technicky_tydenik_generatory_exeron_exopuls.pdf
- [44] *Lesson 39: Electro Discharge Machining* [online]. [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <http://nptel.ac.in/courses/112105127/pdf/LM-39.pdf>
- [45] Lineární motory. *Raveo: World of motion* [online]. [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/linearni-motory>

- [46] Linear motors. *Aerotech: Dedicated to the Science of Motion* [online]. [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <https://www.aerotech.com/product-catalog/motors/linear-motor.aspx>
- [47] MAC Integrated Servo Motors. *JVL: Integration in motion* [online]. [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <http://www.jvl.dk/1007/stepper-motor-photo>
- [48] EDM Electrodes Produce Faster Cuts in Copper Alloy Cores and Inserts. *MoldMaking Technology* [online]. [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/products/edm-electrodes-produce-faster-cuts-in-copper-alloy-cores-and-inserts>
- [49] Wire cut EDM. *GF Machining Solutions* [online]. [cit. 2018-07-21]. Dostupné z: http://www.gfms.com/country_CH/en/Products/EDM/wire-cut-edm/general-purpose/applications.html
- [50] OETTLE, Matthias. Tvrdé frézování v oblasti nástrojů a forem. *MM: Průmyslové spektrum*. 2005, str. 30.
- [51] ZELINSKI, Peter. EDM vs. Milling In Die/Mold Machining. *Modern Machine Shop* [online]. 2000 [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/edm-vs-milling-in-diemold-machining>
- [52] *The GF AgieCharmilles Customer Newspaper*. GF AgieCharmilles, 2008, (No.3).
- [53] Grafit. *PENTA Trading* [online]. [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: <http://www.penta-edm.cz/text-grafit/>
- [54] Metal prices. *Metalary* [online]. [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: <https://www.metalary.com/>
- [55] ALAM, M.R., K.S. LEE, M. RAHMAN, Y.F. ZHANG, Y.D. LI a K.S. SANKARAN. COMPARATIVE STUDY OF HSM AND EDM IN INJECTION MOULD MANUFACTURING. *Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium*. Boston: Springer, 324-328. DOI: https://doi.org/10.1007/0-306-47000-4_63. ISSN 978-0-306-47000-4.
- [56] MIKULČÁK CSc., RNDr. Jiří, RNDr. Jura CHARVÁT CSc., RNDr. Martin MACHÁČEK CSc., a RNDr. František ZEMÁNEK CSc., *Matematické, fyzikální a chemické TABULKY a VZORCE pro střední školy*. Praha: Prometheus, 2014. ISBN 978-80-7196-264-9.
- [57] AKKURT, Adnan. The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2015, (Volume 18 Issue3), 303-308.

- [58] RUPPENTHAL, Michael a Chip BURNHAM. Exploring complementary cutting methods: Comparing capabilities of laser, plasma, EDM to waterjet technology. *Thefabricator.com: A publication of the Fabricators & Manufacturers Association, Intl.* [online]. 4.9.2001 [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/exploring-complementary-cutting-methods>
- [59] Comparison of waterjet, EDM, Laser and Plasma. *IWM: Internation Waterjet Machines* [online]. [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: http://www.iwmwaterjet.com/waterjet_EDM_laser_plasma.html
- [60] OVERCOMING QUALITY & PRECISION CHALLENGES IN CUTTING APPLICATIONS: A review of available cutting methods and solutions. *MEYER Micro waterjet* [online]. [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: <http://www.microwaterjet.com/wp-content/uploads/2016/01/MicroWaterjet-Whitepaper-Complicated-Parts.pdf>
- [61] AGIE AgieCut drátové řezačky: technické informace. *EDMEX* [online]. [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: <http://www.agiecharmilles.cz/agiewedm.html#accl2>
- [62] Elektroerozivní drátové řezání obrobků ve vodní lázni. *MM Průmyslové spektrum*. 2002, str. 22. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-dratove-rezani-obrobku-ve-vodni-lazni.html>
- [63] YAN, Mu-Tian a Yi-Ting LIU. Design and experimental study of a high-frequency fine-finish power supply for wire-EDM. *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 2009. DOI: 10.1109/AIM.2009.5229999.
- [64] RANGANATH, B.J. *Thermal Metal Cutting Processes*. I.K. International Publishing House Pvt., 2008. ISBN 9788189866907.
- [65] DICKINSON, Alex. Breaking Down Dielectric Breakdown. *Holepop: EDM Supplies for Small Hole Drilling* [online]. 2016 [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: <https://www.holepop.com/breaking-dielectric-breakdown/>
- [66] PFLUGER, Brian. SELECTING THE APPROPRIATE EDM TECHNOLOGY FOR HOLE-DRILLING APPLICATIONS. *Metaalmagazine* [online]. 2014 [cit. 2018-07-28]. Dostupné z: https://www.metaalmagazine.nl/wp-content/uploads/2015/02/Makino_EDM_White_Paper_Final-1.pdf
- [67] ANTAR, Mohammad, Dimitrios CHANTZIS, Sundar MARIMUTHU a Philip HAYWARD. High Speed EDM and Laser Drilling of Aerospace Alloys. *Procedia CIRP*. 2016, (42), 526-531.
- [68] PFLUGER, Brian. When hole drilling precision matters, deliver it with advanced laser-EDM combo. *Radical Departures: Advanced techniques in aerospace manufacturing from Makino* [online]. [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.radical-departures.net/articles/laser-edm-hole-drilling/>

- [69] Why a laser is better than EDM for drilling. *Production Engineer*. 1983, (Volume 62 12), 13-14. DOI: 10.1049/tpe.1983.0245. ISSN 0032-9851.
- [70] CLARKE, David R. a Simon R. PHILLPOT. Thermal barrier coating materials. *Materielstoday*. 2005, (Vol. 8, 6), 22-29. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(05\)70934-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)70934-2).

11 Seznam obrázků

Obr. 1 Leidenská láhev [32].....	1
Obr. 2 Priestlyho kruhy [33]	2
Obr. 3 Charmilles' Eleroda D1 [34].....	3
Obr. 4 Povrch materiálu po EDM [35].....	4
Obr. 5 Fáze výboje [24]	5
Obr. 6 Časový průběh napětí a proudu u obecného výboje [24].....	8
Obr. 7 Závislosti objemového úběru materiálu na vlastnostech obráběného materiálu.....	10
Obr. 8 Vliv směru toku dielektrika [9].....	12
Obr. 9 Lamelové filtry pro EDM [36].....	14
Obr. 10 Schéma a průběh napětí RC generátoru [44]	15
Obr. 11 Schéma a průběh napětí rotačního generátoru [44]	15
Obr. 12 Schéma a průběh napětí tranzistorového generátoru [44].....	16
Obr. 13 Spojení krokového servomotoru a kuličkového šroubu [47]	17
Obr. 14 Lineární motor ICD Ironcore [45]	17
Obr. 15 Vícekanálové mosazné elektrody [37].....	19
Obr. 16 Vrtání měděné trysky mosaznou elektrodou 0,2 mm, PENTA EDM.....	20
Obr. 17 EDM vrtání turbínové lopatky [38]	21
Obr. 18 Elektroerozivní pila [13]	22
Obr. 19 Tenkostěnné grafitové elektrody [48].....	23
Obr. 20 Pohled na odvíjecí mechanismus a vodící hlavy, Penta EDM Říčany	25
Obr. 21 Razník a raznice [49]	25
Obr. 22 Nástroj pro vytlačování hliníkových profilů [50]	26
Obr. 23 Porovnání EDM frézování s elektroerozivním hloubením [9].....	26
Obr. 24 Příklady možností mikro EDM frézování (z leva: turbína, disk kompresoru, vytlačovací hlava) [39].....	27
Obr. 25 Schéma elektroerozivního broušení EDG [29]	28
Obr. 26 Kombinovaný úběr materiálu metodou EDAG [30].....	28
Obr. 27 Porovnání metod řezání z hlediska přesnosti a síly řezaného materiálu [57]	31

12 Seznam tabulek

Tab. 1 Porovnání důležitých vlastností materiálů elektrod [53] [54] [56].....	18
---	----

13 Seznam použitých zkratek a symbolů

AWJ	Abrasive water jet (vodní paprsek s přidaným abrasivem)
C	Uhlík (grafit)
CAD	Computer aided design
CAM	Computer aided manufacturing
CNC	Computer numeric control
Cu	Měď
CuZn	Mosaz
EDAG	Electrical discharge abrasive grinding
EDD	Electrical discharge drilling
EDG	Electrical discharge grinding
EDM	Electrical discharge machining
EDS	Electrical discharge sawing
FPGA	Field Programmable Gate Array
HRC	Tvrдость podle Rockwella typu C
HSC	High speed cutting
LBM	Laser beam machining
NC	Numerical control
RC	Obvod složený z odporu R a kondenzátoru C
RLC	Obvod složený z odporu R, cívky L a kondenzátoru C
SEDM	Sinking electrical discharge machining
W	Wolfram
WEDM	Wire electrical discharge machining
a, GAP	Mezielektroodová vzdálenost
f	Frekvence
I	Proud
K_p	Polární koeficient
q	Časové využití periody impulsu
Q_v	Objemový úběr materiálu
T	Perioda výboje
t_0, t_{OFF}	Doba pauzy
t_d	Doba zpoždění výboje
t_e	Činná doba výboje
t_i, t_{ON}	Doba impulsu
T_t	Teplota tání
U_0	Napětí zdroje
U_k	Zhášecí napětí
U_z	Zápalné napětí
V_0	Úběr
V_n	Opal
λ	Tepelná vodivost
v	Relativní objemové opotřebení nástroje
ρ	Hustota
ρ_0	Měrný elektrický odpor