

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ**

Ú12134 – ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ
A METROLOGIE



Bakalářská práce

Elektroerozivní obrábění

Autor: **Jan Novotný**

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

Praha, 2021



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **484107**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Elektroerozivní obrábění

Název bakalářské práce anglicky:

Electric Discharge Machining

Pokyny pro vypracování:

1. Charakteristika a typy metody
2. Oblasti využití technologie
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: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci pod názvem „Elektroerozivní obrábění“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a dalších zdrojů, které jsou uvedeny na konci práce.

V Praze dne:

.....

Jan Novotný

Poděkování

Rád bych tímto skromným způsobem poděkoval především Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D. za jeho rady a připomínky při tvorbě mé bakalářské práce.

Anotační list

Jméno autora:	Jan Novotný
Název práce:	Elektroerozivní obrábění
Název práce anglicky:	Electric Discharge Machining
Akademický rok:	2020/2021
Studijní program:	Výroba a ekonomika ve strojírenství
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Novák, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran: 60
	počet obrázků: 26
	počet tabulek: 5

Klíčová slova

Elektroerozivní obrábění, EDM, nekonvenční technologie obrábění, elektroerozivní drátové řezání, elektroerozivní hloubení, elektroerozivní vrtání

Keywords

Electric Discharge Machining, EDM, Non-Convencional machining, wire electrodischarge machining, sinking electrical discharge machining, electrodischarge drilling

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou elektroerozivního obrábění. Práce je koncipována do dvou větších celků. V první části je podrobně popsán princip dané technologie počínaje historií vzniku až po nejnovější trendy. V druhé části jsou vybrány tři nejpoužívanější typy elektroerozivního obrábění a jsou porovnány s příslušnými konkurenty. Součástí závěru práce jsou porovnávací tabulky pro usnadnění volby vhodné technologie.

Abstract

This thesis is aimed at describing electric discharge machining method. Thesis is divided into two major parts. First part describes the principles of electric discharge machining and its history and current trends. In the second part, three most used types of electric discharge machining are chosen and further described with an in-depth comparison between the given types. The thesis conclusion includes comparison tables between the given types which are designed to provide all needed information regarding choice between the given types of electric discharge machining method.

Obsah

Úvod	9
1 Historie EDM.....	10
2 Princip elektroerozivního obrábění	12
2.1 Charakteristika a časový průběh výboje.....	14
2.1.1 Elektrický výboj jiskrou.....	14
2.1.2 Elektrický výboj obloukem	14
2.2 Mezelektrodová vzdálenost.....	15
3 Charakteristika strojů pro elektroerozivní obrábění.....	16
3.1 Nástrojové elektrody.....	16
3.2 Generátory.....	17
3.2.1 Charakter impulsů	17
3.2.2 Generátory závislé (RC a RLC)	18
3.2.3 Nezávislé generátory (pulsní)	19
3.3 Pohon stroje	21
3.4 Příslušenství EDM strojů.....	21
3.5 Ostatní technologie EDM strojů.....	22
3.5.1 Systém automatického navlékání drátu.....	22
3.5.2 Teplotní stabilizace a systém vyplachování	23
3.5.3 Inteligentní pulzní řízení	23
3.5.4 Řezání dvěma průměry drátu	23
4 Dielektrikum	24
4.1 Dry EDM	26
5 Dosahované parametry po obrábění.....	27
5.1 Drsnost povrchu	27
5.2 Stav povrchové vrstvy.....	29
6 Typy elektroerozivního obrábění.....	30
6.1 Elektroerozivní hloubení.....	30
6.2 Elektroerozivní drátové řezání	31

6.3	<i>Elektroerozivní vrtání</i>	33
6.4	<i>Elektroerozivní frézování</i>	35
6.5	<i>Elektroerozivní broušení</i>	35
6.6	<i>Elektroerozivní leštění</i>	36
6.7	<i>Elektrokontaktní obrábění</i>	36
7	Oblasti využití elektroerozivního obrábění	38
7.1	<i>Výhody EDM</i>	38
7.2	<i>Nevýhody EDM</i>	38
7.3	<i>Aplikace EDM</i>	40
8	Srovnání s ostatními výrobními metodami	41
8.1	<i>Technologie řezání EDM, plazmou, laserem a vodním paprskem</i>	41
8.1.1	<i>Řezání plazmou</i>	41
8.1.2	<i>Řezání laserem</i>	42
8.1.3	<i>Řezání vodním paprskem</i>	43
8.1.4	<i>Srovnání na konkrétní součásti</i>	44
8.2	<i>Technologie tvrdého HSC obrábění a EDM hloubení</i>	47
8.3	<i>Technologie EDM vrtání, suché laserové vrtání a jeho hybridní modifikací Laser MicroJet a vrtání elektronovým paprskem</i>	49
9	Závěr	54
10	Bibliografie	58
11	Seznam obrázků	65
12	Seznam tabulek	66
13	Seznam použitých zkratk a symbolů	67

Úvod

Technologii elektroerozivního obrábění jsem si vybral, jelikož jsem se touto problematikou zabýval již na střední škole. Konkrétně jsem se zabýval automatizací výroby elektroerozivních strojů, kdy jsem na téma „Automatizace výroby na elektroerozivní drátové řezačce“ vytvářel svou maturitní práci. Ve zkratce se jednalo o vytvoření programu, který umožňoval na jedno upnutí obsluhy obrobit 3 obrobky. Stroj si sám určil přesnou polohu všech polotovarů, a následně je obrobit do požadovaného tvaru. Tímto se aktivní čas obsluhy u stroje zkrátil zhruba na třetinu.

Jedná se o nekonvenční technologii obrábění, a proto může být pro mnoho lidí neznámá. V této práci se budu podrobněji zabývat principem této výrobní technologie, charakteristikou různých metod založených na principu elektrické eroze a jejich využitím v praxi. Na závěr uvedu několik srovnání těchto metod s ostatními typy výrobních technologií.

Využití této technologie je velice prosté. Využívá se tam, kde tradiční konvenční metody selhávají. Zejména při obrábění velice složitých tvarů o velice přesných rozměrech nebo také při obrábění specifických materiálů. Dokážeme dosáhnout opravdu vysoké přesnosti obrábění a také vysoké kvality obrobené plochy, což mnohdy může nahradit i proces broušení. Ovšem podmínkou použití EDM je, jak už z názvu vyplývá, dostatečná elektrická vodivost materiálu. [1]

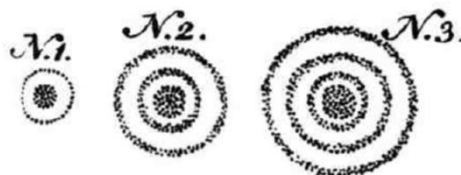
1 Historie EDM

První poznatky a výzkumy elektrického výboje sahají překvapivě relativně daleko do naší historie. Například již v 17. století byl sestrojen první surový elektrostatický generátor. To později napomohlo k vývoji a studii různých třecích strojů. První krok k objevení elektrické eroze přišel kolem roku 1745 s vynalezením tzv. Leydenské nádoby. Jednalo se o takovou první formu kondenzátoru. Tato skleněná nádoba je schopna mezi vodiči na vnitřní a vnější straně uchovat vysokonapěťový elektrický náboj. S tímto objevem přišly nezávisle na sobě dvě strany, a to německý jáhen Ewald Georg von Kleist a nizozemští vědci Pieter van Musschenbroek a Andreas Cunaeus. Nakonec byl vynález připsán profesorovi Musschenbroekovi, který působil na univerzitě v Leidenu jako fyzik. Také odtud je název „Leydenská“ nádoba. Později bylo zjištěno, že po paralelním spojení více těchto nádob dochází ke zvětšení náboje, a hlavně díky tomu vznikla první baterie. [2; 3; 4; 5]



Obrázek 1: Leydenská nádoba [6]

Další významný objev nastal v roce 1766, kdy si anglický vědec, chemik Joseph Priestley všiml drobných kráterů ve tvaru kruhů na povrchu katody Leydenské nádoby po zásahu elektrickým výbojem. [2; 5]



Obrázek 2: Priestleyho kruhy [5]

Největší průlom ovšem nastal až v roce 1943, kdy dva ruští vědci, manželé Lazarenkovi, měli za úkol zabránit opotřebení wolframových kontaktů elektrických výkonových spínačů, ke kterému docházelo v důsledku jiskření. To se jim sice nepovedlo, ale zjistili, že pokud jsou elektrody ponořeny do dielektrika, tak se eroze stává přesněji řízenou. Na základě toho vynalezli první EDM stroj, který zvládl opracovat velice tvrdé a za normálních podmínek špatně obrobitelné materiály, jako je například již zmíněný wolfram. K nabíjení elektrod byl použit RC relaxační obvod, který je napájen stejnosměrným napětím. Kondenzátor se nabije na napětí vyšší, než je průrazné napětí dielektrika, aby došlo k přeskocení jiskry. Výbojem se kondenzátor vybije a celý proces se opakuje. [3; 4; 7]

V tu samou dobu americký tým vědců H. Stark, V. Harding a J. Beaver sestrojili podobný EDM stroj na odstraňování zlomených vrtáků nebo závitníků z obrobku. Jejich stroj fungoval na principu produkce co nejvíce jisker za jednu sekundu a dostatečným obměňováním kapaliny. Jejich stroje dokázaly vytvořit zhruba 60 jisker za sekundu, což odpovídá frekvenci sítě ve Spojených Státech. Později vznikaly stroje založené na jejich principu, které dokázaly až tisíce jisker za sekundu, což výrazně zvýšilo rychlost obrábění. [8]

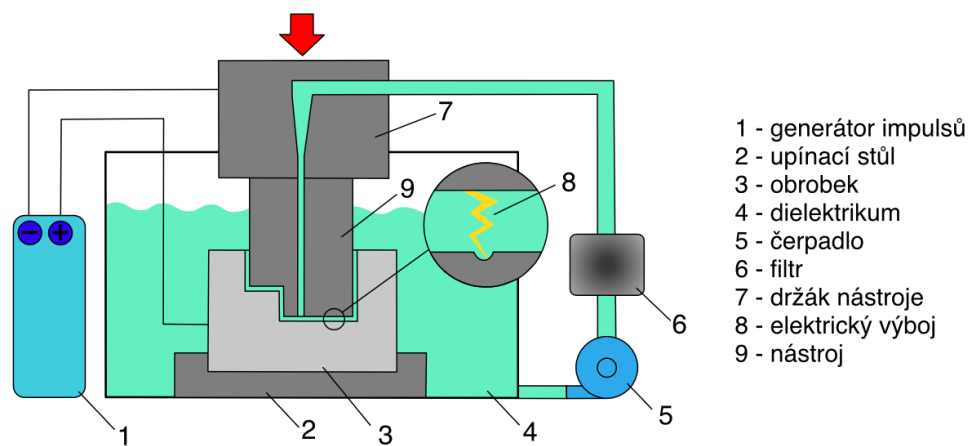
Další vývoj nastal v 60. letech 20. století, kdy vznikl první typ drátového stroje. Do té doby tyto stroje fungovaly spíše na principu hloubení. Zásadní rozdíl byl, že zde jako elektroda byl odvíjející se drát, který „doslova řezal“ materiál. První komerční EDM drátová řezačka pochází z tehdejšího SSSR z roku 1967. Později došlo, jako u většiny strojů, k modernizaci a staly se z nich dnešní CNC stroje. [8]

Dnes používané EDM stroje jsou vesměs zautomatizované a došlo i k výraznému zvýšení rezné rychlosti oproti původním strojům. V neposlední řadě lze i dobře regulovat kvalitu obrobeného povrchu. [8]

2 Princip elektroerozivního obrábění

Metoda elektroerozivního obrábění (dále jen „EDM“ z anglického výrazu „Electrical discharge machining“) nebo jinak známá pod pojmem elektrojiskrové obrábění, se řadí mezi nekonvenční technologie úběru materiálu. Jinými slovy to znamená, že k úběru materiálu nedochází za pomoci mechanické práce nástroje, ale jsou založeny na využití fyzikálních nebo chemických jevů. Tyto technologie jsou sice ekonomicky a mnohdy i časově náročnější, ale dnes se již bez nich nedokážeme obejít. [9]

Jedná se o úběr materiálu za pomoci elektrického výboje, který nastává mezi elektrodou (zapojena jako anoda) a obráběným materiálem (zapojen jako katoda). Aby proces fungoval, musí být anoda i katoda zaplavena v dielektriku, což je kapalina s vysokým elektrickým odporem (dielektriku se budu více věnovat později v práci). [9]

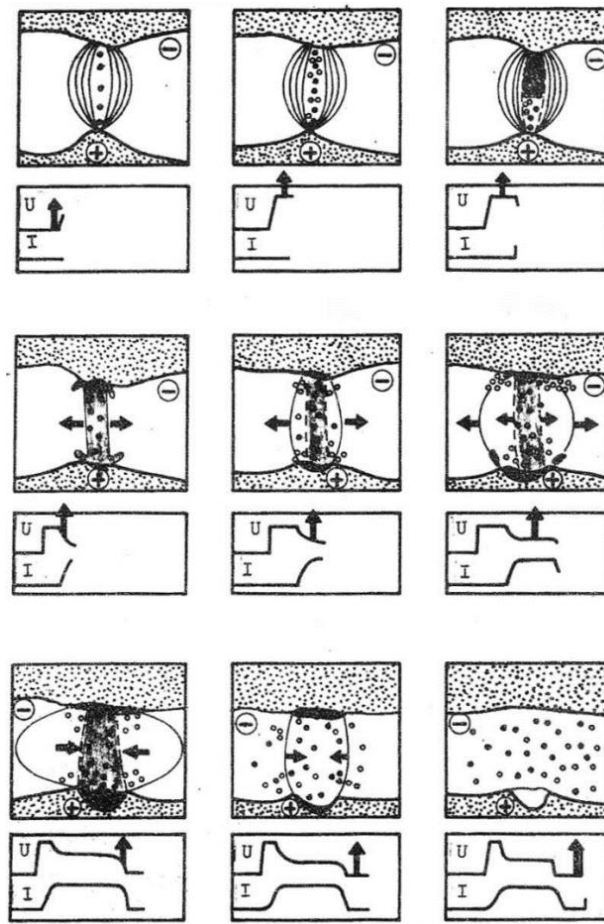


Obrázek 3: Základní princip EDM – vlastní, dle [10]

Elektroda se přiblíží k obrobku na velmi malou vzdálenost, řádově 5–100 μm . Taková vzdálenost je zapotřebí ke vzniku elektrického výboje. Do místa úběru je přivedeno napětí a v důsledku toho vzniká mezi katodou a anodou elektrické pole. V tuto chvíli je přivedené napětí maximální a z elektrody (anody) se postupně uvolňují elektrony, které se ve vzniklém poli srážejí s neutrálními částicemi a dochází ke vzniku kladně i záporně nabitých iontů. Ty se dále urychlují až do stavu, kdy tenká vrstva dielektrika zionizuje a vzniká tzv. plazmový kanál. Teplota povrchu a přiváděný proud roste, naopak hodnota napětí klesá. V závislosti na nastavených parametrech obrábění dosahuje teplota výboje až 10 000 °C. Při této teplotě dochází k intenzivnímu tavení povrchu obráběného

materiálu a zároveň se v místě výboje odpaří vrstva dielektrika a pod velkým tlakem vznikne jakási plynová bublina. [5; 9]

V momentě, kdy se přeruší přívod proudu, dojde k vyplavení nataveného materiálu, a to v důsledku imploze neboli zhroucením plynové bubliny do sebe, která je vyvolána prudkým poklesem teploty. Vtékající dielektrikum odplaví natavený materiál. Jelikož je jeho teplota mnohem nižší, materiál tuhne ve formě miniaturních kuliček a v místě náboje zůstávají drobné krátery. [5]



Obrázek 4: Jednotlivé fáze výboje [3]

Celý tento proces se neustále opakuje a tím dochází k rozsáhlejšímu obrábění. Bohužel díky opakovaným elektrickým výbojům úběr materiálu nenastává pouze na obrobku, ale i na elektrodě. Cílem je dosáhnout maximálního úběru materiálu na obrobku s minimálním opotřebením nástroje. Jinak by rychle došlo k tvarovým nepřesnostem na

obrobku a výrazně by se snížila produktivita výroby. Lze toto ovlivnit několika parametry: [11]

- užití vhodného typu dielektrika,
- užití vhodného materiálu elektrody,
- správné zapojení napájecího obvodu – polarita,
- správné elektrické parametry (velikost proudu, počet výbojů, ...).

2.1 Charakteristika a časový průběh výboje

Celková energie a doba trvání výboje ovlivňují množství nataveného materiálu, tedy velikost a tvar vzniklého kráteru. Od toho se odvíjí celková kvalita obrábění, jako například jakost povrchu nebo rozměrová přesnost. [11]

K popisu časového průběhu a typu výboje je důležité zavést jednu veličinu, a to časové využití periody impulsu. Je definována poměrem celkové doby impulsu t_i a jeho periody T , tedy vyjadřuje, jak dlouho v celé periodě bude trvat samotný impuls. [3; 5]

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

V závislosti na časovém průběhu dodávané energie do místa výboje se rozlišují dva typy elektrického výboje, a to buď výboj jiskrou nebo obloukem. [3; 5]

2.1.1 Elektrický výboj jiskrou

Pro výboj jiskrou jsou typické krátké doby impulsu, kolem 10^{-4} – 10^{-6} sekundy a relativně nízkým časovým využitím periody impulsu $q = 0,03$ – $0,2$. Ale naopak probíhá při vysokých frekvencích. V místě výboje převládá elektronová vodivost, díky které dochází k vyššímu úbytku materiálu na anodě vůči katodě. Je zde také vysoká proudová hustota cca $10^6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ a teplota sahá až k $10\,000 \text{ }^\circ\text{C}$. Použitím tohoto typu výboje se dosahuje menšího úběru materiálu. Jeho využití je převážně u dokončovacích operací a u elektroerozivního drátového řezání. [3; 5]

2.1.2 Elektrický výboj obloukem

Výboj elektrickým obloukem je víceméně opakem výboje jiskrou. Jsou pro ně typické delší doby impulsu $>10^{-4}$ sekundy a vyšší časové využití periody impulsu $q = 0,2$ – 1 .

A samozřejmě probíhá při nižších frekvencích. V místě výboje převládá iontová vodivost, díky které se uvolňuje větší počet kladných částic a tím zvětšuje množství odebraného materiálu z katody, tedy vznikají větší krátery. Proudová hustota je zde o hodně nižší $100\text{--}1\,000\text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ a teploty dosahují cca $3\,600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro větší úběr materiálu se používá převážně u hrubovacích operací. [3; 5]

2.2 Mezielektrodová vzdálenost

Jak již bylo zmíněno, elektroda se přibližuje k obrobku na velmi malou vzdálenost, aby došlo k ionizaci dielektrika a následně ke vzniku elektrického výboje. Toto místo nazýváme jiskřiště nebo anglickým názvem „GAP“. Je to fyzická vzdálenost, kterou musí proud překonat, aby vznikl výboj a je třeba tuto vzdálenost mít pod kontrolou, aby proces obrábění probíhal dle našich požadavků. Faktory, které ovlivňují jiskřiště mohou být například materiál obrobku nebo u drátového řezání i jeho tloušťka a následně i průměr a typ drátu. Dále lze zahrnout i požadavky na tolerance a povrchovou úpravu dílu. [12]

V praxi to znamená, že pokud by byla tato vzdálenost příliš velká, proud by nedokázal dosáhnout průrazné hodnoty a nedošlo by ke vzniku výboje tedy ani k obrábění. Ovšem pokud bychom přiblížili elektrodu k obrobku na velmi malou vzdálenost, k výboji dojde okamžitě po přivedení pracovního proudu a mohlo by například u drátové řezání dojít ke zkratu a přetržení drátu. [12]

Pro každý typ obrábění se tedy musí udržovat optimální vzdálenost. Obecně platí, že pro hrubování používáme větší mezery, kdy sice frekvence jisker v jiskřišti je menší, ale každý oblouk obsahuje vysoké množství energie. To má za následek vyšší rychlosti úběru materiálu, ale vzniká horší povrchová úprava obrobku a nižší přesnost. Typicky se drsnost povrchu po hrubování pohybuje $R_a = (1,6 - 3,2)$. V opačném případě, když požadujeme obrábění načisto, použijeme menší jiskřiště. V tomto případě je frekvence jisker vyšší, ale každá má menší výkon. Dostáváme tedy lepší povrchovou úpravu. [12]

3 Charakteristika strojů pro elektroerozivní obrábění

V této kapitole bych rád zmínil několik charakteristických částí strojů pro elektroerozivní obrábění.

3.1 Nástrojové elektrody

Jako nástroje u těchto strojů slouží speciální nástrojové elektrody. U každého typu EDM technologie je použita trochu jiná elektroda. Například u elektroerozivního drátového řezání je podle názvu patrné, že elektrodou je zde drát. Nebo jako další příklad lze uvést elektroerozivní hloubení, kde jako elektroda slouží přesný tvar, který chceme vyhloubit, nejčastěji vyrobený z grafitu. [9]

Jak již bylo zmíněno, u tohoto druhu obrábění není zapotřebí žádných mechanických sil čili při výběru správného materiálu elektrody není třeba hledět na mechanické vlastnosti, nýbrž na fyzikální vlastnosti, jako je teplota tavení, elektrická a tepelná vodivost nebo hodnota měrného tepla. Vlivem působení výboje dochází k úběru materiálu, který se rozdělí mezi katodu a anodu čili stejně jako u klasických konvenčních nástrojů i zde dochází k jistému opotřebení nástroje. Správnou volbou materiálu nástroje se snažíme minimalizovat právě úběr na nástroji. [13]

Byla zavedena poměrná veličina, která usnadňuje volbu materiálu nástrojové elektrody. Jedná se relativní objemové opotřebení γ , kde V_n je objemové opotřebení nástroje a V_0 je odebraný objem materiálu obrobku. [5; 13]

$$\gamma = \frac{V_n}{V_0}$$

Hodnotu relativního objemového opotřebení ovlivňuje například kombinace materiálu obrobku a elektrod, polarita, pracovní proud, doba trvání impulsu a již zmíněné fyzikální vlastnosti materiálu. Relativní opotřebení nástroje se pohybuje od desetin procent až po desítky. [5; 13]

Co se týče pojmu polarita, zde představuje převyšující erozi jedné elektrody nad druhou. Rozdělujeme ji na kladnou (přímou) a zápornou (nepřímou). O přímou polaritu se jedná

v případě zapojení, kdy převládá eroze na anodě a naopak. Celkově je určena zdrojem výbojů a je závislá na fyzikálních veličinách materiálu elektrod. [13]

V neposlední řadě je důležité pohlížet na volbu materiálu elektrod i z ekonomického hlediska, jelikož náklady na výrobu elektrody pro elektroerozivní hloubení tvoří 40–50 % z celkových nákladů. [5; 13]

Mezi nejpoužívanější materiály elektrod patří elektrolytická měď, mosaz, wolfram, tzv. wolframová měď (jedná se o slitinu mědi a wolframu), ocel, ale hlavně grafit, který se v dnešní době používá úplně nejvíce, a to hlavně u hloubení. Používá se z důvodu nízké hodnoty objemového opotřebení i při velkých úběrech, má malou hustotu a vyšší teplotu tavení. Na druhou stranu má poměrně nízkou pevnost a při obrábění je třeba z bezpečnostního hlediska dbát na zajištění kvalitního odsávání, jelikož vzniká velké množství prachu. [5; 13]

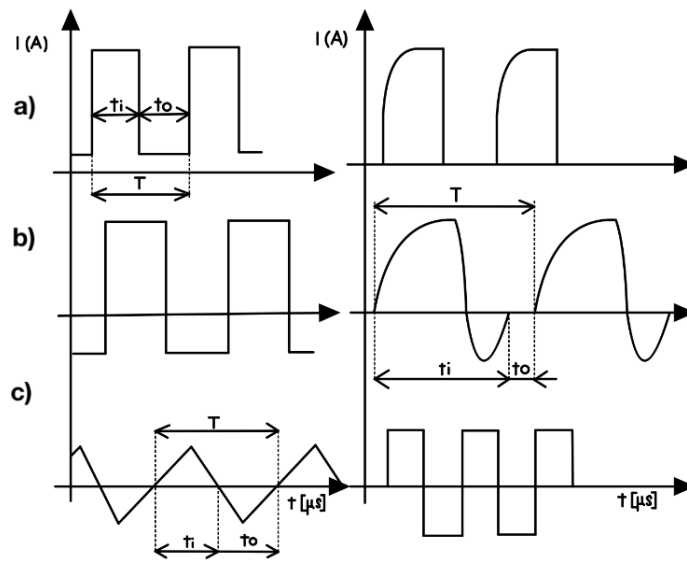
3.2 Generátory

3.2.1 Charakter impulsů

Jednotlivé impulsy jsou nedílnou součástí obráběcího procesu, protože jejich charakter určuje technologické ukazatele obrábění. Pomocí generátorů se vytvářejí různé druhy impulsů a ty se následně o různé frekvenci přivádějí na nástrojovou elektrodu, přičemž každý druh impulsu se používá pro jinou technologickou aplikaci. [5; 14]

Samotné impulsy jsou charakterizovány napětím, proudem, ale také různými tvary (viz obrázek 5), dle kterých se dělí do tří skupin: [5; 14]

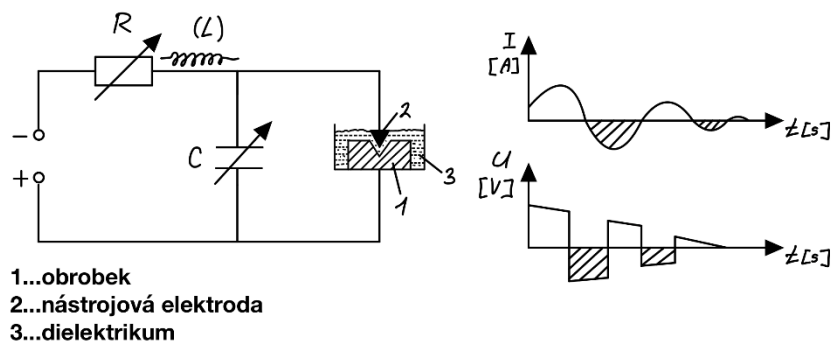
1. **Jednopolové impulsy** (obrázek 5a),
2. **Střídavé impulsy nesymetrické** (obrázek 5b),
3. **Dvupolové impulsy symetrické** (obrázek 5c).



Obrázek 5: Jednotlivé druhy impulsů – vlastní, dle [5]

3.2.2 Generátory závislé (RC a RLC)

Závislé generátory fungují na principu opakovaného nabíjení a vybíjení paralelně zapojeného kondenzátoru ze zdroje stejnosměrného napětí. Obvod tohoto zapojení lze vidět na obrázku 6. Kondenzátor se vybíjí v momentě, kdy velikost napětí dosáhne průrazné hodnoty, které je závislé na mezielektrodové vzdálenosti, anebo také i znečištění dielektrika. Existuje závislost mezi změnou poměrů v jiskřišti, frekvencí a energií jednotlivých výbojů. Proto se tyto generátory nazývají závislé. U těchto generátorů se vyžaduje převážně zapojení obrobku jako anody a nástroje jako katody, a to z důvodů vysoké elektronové vodivosti. Kdyby bylo zapojení opačné, docházelo by ke zbytečně velkým úbytkům na nástroji. [13; 15]



Obrázek 6: Zapojení závislého generátoru – vlastní, dle [15]

Jako výhody lze uvést jednoduchost zapojení a relativní spolehlivost. Ovšem je nutné podotknout, že je zde velice omezená možnost regulace tvaru a frekvence výbojů, a tedy

i malé obráběcí rychlosti. Například u obrábění slinutých karbidů se množství odebraného materiálu pohybuje kolem 1 000 mm³/min. Jako další nevýhody lze uvést, a to i přes vhodné zapojení, velké úbytky materiálu na nástroji, proto se tyto generátory používají převážně pro obrábění načisto. Lze definovat vztah, dle kterého se dá vypočítat přibližná produktivita obráběcího procesu: [13; 15]

$$Q_V = K \cdot \eta \cdot f \cdot W_k = K \cdot \eta \cdot f \cdot \frac{C \cdot U_c^2}{2} \quad [mm^3 \cdot s^{-1}]$$

kde:

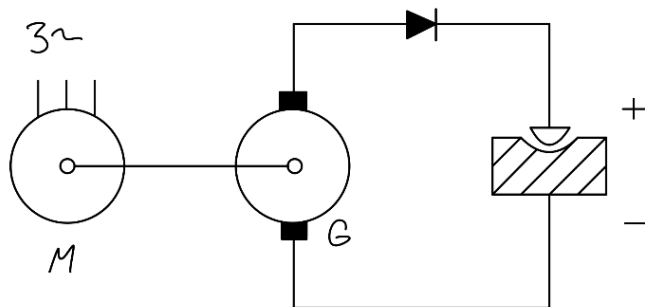
- K = konstanta úměrnosti,
- η = účinnost výboje,
- f = frekvence výbojů, lze definovat jako $\frac{1}{2RC}$,
- C = kapacita kondenzátoru,
- U_c = průrazné napětí, lze definovat jako 0,8U₀.

Výše uvedený vztah platí pouze pro obvod zapojený bez indukčnosti, tedy zdroj RC. Pokud bychom chtěli zvýšit rozsah frekvence a výkonu, lze připojit ještě indukčnost, dostaneme tak zdroj RLC. Lze poté dosáhnout vyšší produktivity, například u obrábění oceli až 2 000 mm³/min. [13; 15]

3.2.3 Nezávislé generátory (pulsní)

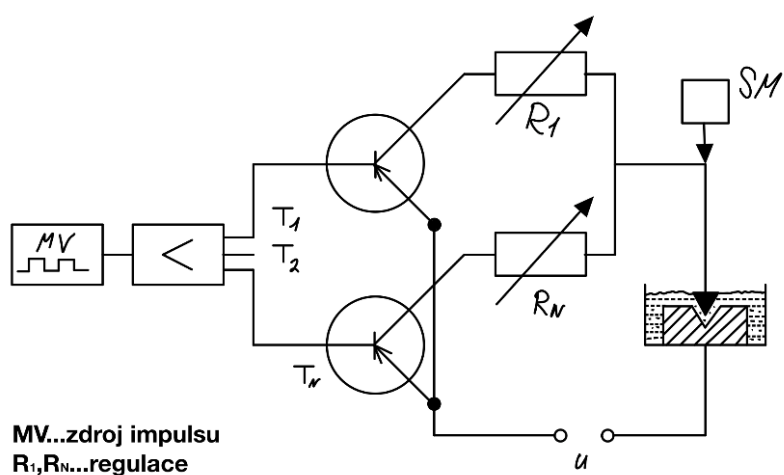
Nezávislé generátory se liší od těch závislých především vyšší produktivitou, větší variabilitou pracovních podmínek, a to bez ohledu na poměry v jiskřišti. Charakteristické jsou pro tyto generátory delší doby impulsů, nižší pracovní napětí a opačná polarita, tedy obrobek je zapojen jako katoda a nástroj jako anoda. V zásadě se nezávislé generátory dělí na dvě skupiny. [13]

První skupinou jsou mechanické generátory kolektorové a bezkolektorové, nebo jiným názvem rotační. V podstatě se jedná o dynamo, které je roztočené asynchronním motorem a tím vznikají impulsy. Tyto zdroje umožňují značně vyšší úběry materiálů (až 5 000 mm³/min u obrábění oceli). Nevýhodou je vyšší hlučnost a obtížná regulovatelnost frekvence impulsů. [13; 15]



Obrázek 7: Zapojení rotačního generátoru – vlastní, dle [13]

Druhou skupinou jsou generátory polovodičové (tranzistorové). Tyto generátory mají široké pásmo nastavitelných parametrů impulsů, například frekvence je možno nastavovat až na hodnotu 500 kHz. Princip funkce je založený na spínání sériově zapojeného tranzistoru, díky němuž se objevuje na elektrodách napětí. Budeme-li předpokládat, že mezielektrodová vzdálenost je ideální, tak po dobu sepnutí tranzistoru protéká obvodem i pracovní proud a dochází k výboji. Spínání tranzistoru má za úkol speciální multivibrátor, který generuje impulsy a zesiluje je v pulzním zesilovači. Velikost pracovního proudu závisí na počtu použitých tranzistorů a při správném zapojení lze i obrábět více elektrodami najednou. Charakteristická je zde i vysoká produktivita, která se pro ocel běžně pohybuje kolem 7 000 mm³/min, ale lze dosáhnout u větších center až 25 000 mm³/min. Zapojením obrobku jako katodu umožňujeme delší trvání impulsu s převahou iontové vodivosti, a tedy nevzniká skoro žádné opotřebení nástroje (relativní úbytek se pohybuje kolem 1 %). [14; 16]



MV...zdroj impulsu
R₁, R_n...regulace

Obrázek 8: Zapojení tranzistorového generátoru – vlastní, dle [13]

3.3 Pohon stroje

Veškerý strojní pohyb, ať už se jedná o pohyb os nebo již zmíněné udržování mezielektroodové vzdálenosti, zajišťuje několik servomotorů. U elektroerozivních strojů nejsou tak vysoké požadavky na pohony jako u klasických konvenčních strojů, jelikož při obrábění nevznikají žádné síly, které by stroj musel překonávat. Stačí tedy pouze, aby motor dokázal přesně pohybovat s nástrojem. Další výhodou je, že při obrábění nehrozí vniknutí prachu nebo jiných nečistot do pohonného systému, jelikož veškeré nečistoty zůstávají v dielektriku, které se pak čistí přes filtrační systém. [3]

Dnes se nejčastěji pro pohon EDM strojů využívají přímé lineární motory. Jedná se o pohon generující lineární sílu s velice dobrou dynamikou, přesným polohováním, jednoduchou regulací a energetickou efektivitou. Tyto motory mají velice jednoduchou konstrukci, kde není třeba žádných převodových mechanismů pro převod rotačního pohybu na lineární. Dále dokážou vyvinout vysokou rychlost pohybu a zachovat opakovatelnost. Celkově jsou kompaktnější, takže dochází i k úspoře rozměrů stroje. Obrovskou výhodou je prakticky bezúdržbový a tichý chod, na druhou stranu jsou stále relativně vyšší pořizovací náklady. [17]

3.4 Příslušenství EDM strojů

Existují různé modifikace a příslušenství na jednotlivé typy EDM strojů. Tyto modifikace poté značně usnadňují okolní činnosti, týkající se, jak samotného obrábění, tak i procesu před a po obrábění. Převážně se jedná o modifikace elektroerozivní drátové řezačky. Patří mezi ně například: [18]

Přístroj pro měření napnutí drátu, který zajišťuje rychlou kontrolu, zda je drát dostatečně napnutý. Pokud by byl například povoleno, mohlo by docházet k vibracím a následným nepřesnostem během řezání. [18]

Další modifikací EDM drátové řezačky může být přídavná otočná osa. Tato osa se umísťuje na pracovní stůl a lze poté vyrábět různé tvarové součásti bez nutnosti přeupínání. [18]

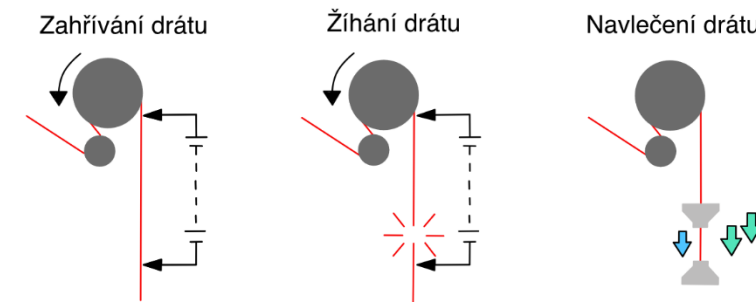
V rámci minimalizování velikosti odpadu lze pořídit k drátové řezačce speciální systém na stříhání drátu. Za normálních okolností je použitý drát vyveden ven ze zadní části stroje do odpadového boxu. Pokud je drát vcelku, rychle se tento box zaplní. Tento systém průběžně zastřihává drát a díky tomu se ho do odpadového boxu vejde mnohem více. Dále lze pořídit i speciální odvíječící zařízení určené pro nestandardní cívky. Jedná se o cívky větších rozměrů, které prodlužují bezobslužný provoz. [18]

Mezi příslušenství určené pro všechny stroje patří například dotyková sonda, která slouží k rychlému odměřování součásti nebo i průběžné kontrole. Dále lze využít signální světlo, jež na dálku upozorní obsluhu na konec obráběcího cyklu nebo na případné potíže. [18]

3.5 Ostatní technologie EDM strojů

3.5.1 Systém automatického navlékání drátu

Tento systém souvisí s automatizací dnešních elektroerozivních strojů. Pro rychlejší průběh řezání se v odpadové části polotovaru vytvářejí speciální otvory, tzv. startovací díry, kterými se provléká drát a začíná zde proces řezání. Nejčastěji se používají dva systémy navlékání drátu. První funguje na principu vedení pomocí vodního paprsku. Druhý systém funguje na principu žhání a následném přetržení drátu. Drát se nejprve nahřeje pomocí elektrického proudu, následně je žhán, vyrovnán a přetržen. Díky tomu se vytvoří hladké zúžení na konci a drát se poté snadněji navléká do vodička. Žhací princip lze sledovat na obrázku 9. Tyto systémy jsou mnohdy doplněny o funkci zvanou „inteligentní návlek“. Tato funkce dokáže pomocí softwarového programu najít příslušný startovací bod. Pokud z nějakého důvodu stroj není schopen do tohoto bodu navléknout drát, software automaticky najde nejbližší možný další startovací bod, který se také



Celkový čas navlékání - cca 12 sekund

Obrázek 9: Žhací princip navlékání drátu – vlastní, dle [19]

nachází v odpadové části polotovaru. Z tohoto bodu se stroj automaticky vrací do definovaného startovacího bodu a poté se zahajuje naprogramovaný proces řezání. [19; 20]

3.5.2 Teplotní stabilizace a systém vyplachování

Aby proces obrábění fungoval správně, je zapotřebí udržovat konstantní teplotu procesní kapaliny i celého stroje. Teplotní dilatace je nepříznivý jev pro obrábění. Z tohoto důvodu jsou stroje vybaveny teplotními čidly hlídající teplotu dielektrika i rámu stroje. Je také důležité udržovat neustálý přívod neznečištěného dielektrika do místa řezu. K tomu slouží několik druhů systému vyplachování a následné filtrace, o kterých hovořím více v následující kapitole. [18]

3.5.3 Inteligentní pulzní řízení

Dnešní stroje jsou vybaveny tímto speciálním řídicím systémem, který dokáže rozpoznat a vypočítat efektivní impulsy. Na základě těchto dat upravuje optimální řeznou rychlost. Díky tomu je hustota energie a jiskrová mezera stejná a jsme schopni dosáhnout vyšších řezných rychlostí. [21]

3.5.4 Řezání dvěma průměry drátu

Opět v důsledku automatizace jsou dnešní drátové řezačky vybaveny tímto systémem, který umožňuje bez zásahu obsluhy provést hrubovací operaci s jedním průměrem drátu a následně operaci dokončovací s jiným průměrem drátu. V praxi to znamená, že hrubovací operace je provedena silnějším drátem (například o průměru 0,3 mm), jelikož silnější dráty řezou rychleji a následné dokončování je provedeno drátem slabším (například o průměru 0,1 mm), kterým dosahujeme menších úběrů, ale lepší kvality povrchu. Zjednodušeně řečeno, tento systém funguje na principu dvou vodiček. Jedno je pevné, kruhové a druhé je pohyblivé, tvaru „V“. Po dokončení hrubovací operace je drát přestřižen a zpětným chodem navinut zpět na cívku. Poté je přisunut pohyblivým vodičkem slabší drát na dokončení, který je automaticky navlečen a proces pokračuje. [20]

4 Dielektrikum

Dielektrikum není vysloveně jedna z částí stroje pro elektroerozivní obrábění, ale je to pracovní médium, bez kterého by celý proces jen špatně fungoval. Jedná se o kapalinu s vysokou hodnotou elektrického odporu, který zajišťuje bezproblémový průběh elektrické eroze. Vesměs působí jako ionizátor mezi elektrodami, aby vznikl elektrický výboj. Dále zastává funkci výplachu odebraných částí z místa výboje a zabraňuje tak usazování miniaturních části materiálu na povrchu nástrojových elektrod. [5; 13]

Stejně jako u volby elektrod je i zde u volby vhodného pracovního média potřeba dbát na několik základních vlastností, aby proces obrábění byl co nejefektivnější. Mezi tyto vlastnosti patří zejména: [13; 22]

- Dostatečná dielektrická vodivost, jinými slovy dostatečný elektrický odpor. A to z důvodu, aby proud při snaze projít přes vrstvu dielektrika mezi anodou a katodou vyústil v elektrický výboj. Daná vrstva dielektrika může být i tenčí než 0,01 mm. Výbojové napětí je variabilní v závislosti na typu obvodu. Může se pohybovat mezi 60-300 V.
- Nízká viskozita a dobrá smáčivost z důvodu rychlého obnovení vrstvy po výboji.
- Chemicky neutrální, aby nedocházelo ke korozi materiálu.
- Jelikož jsou teploty výboje opravdu vysoké, nesmějí vznikat škodlivé a zapáchající plyny. A v druhé řadě musí mít vysokou zápalnou teplotu, aby při obrábění nedošlo ke vzplanutí.
- Samozřejmě z ekonomického hlediska by mělo být snadno vyrobitelné, s nízkými pořizovacími náklady a případně i s náklady na likvidaci.

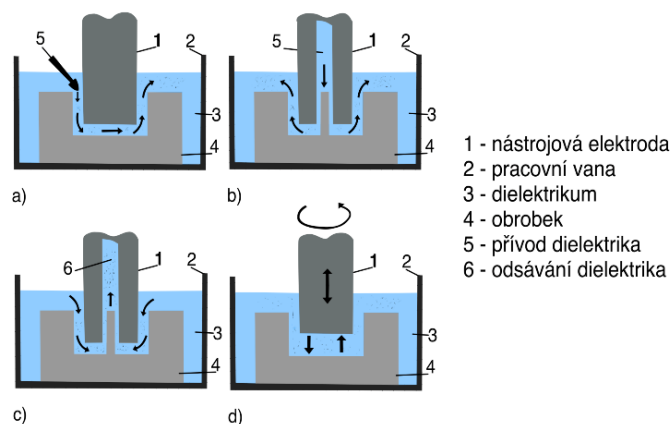
Jako dielektrika se používají nejčastěji různé lehké strojní nebo transformátorové oleje, petroleje, destilovaná nebo deionizovaná voda a speciální upravená dielektrika dodávaná přímo od výrobců daného stroje. [9]

Každý stroj je vybaven systémem pro přívod, chlazení a následné čištění dielektrika od vzniklých spalin. Systém hlídá hladinu dielektrika, aby po celou dobu procesu výboj probíhal pod hladinou. Zároveň udržuje jeho stálou teplotu. Pro čištění dielektrika se používají nejrůznější filtrační systémy, jako například průtočné papírové filtry, usazovací

filtry, odstředivé filtrační zařízení apod. Dnešní stroje jsou i vybaveny deionizační jednotkou pro zlepšení vlastností dielektrika. [13]

Co se týče samotného vyplachování opět existuje několik konstrukčních řešení. [13]

- **Vnější vyplachování** (obrázek 10a). Je to nejobecnější způsob vyplachování. Používá se například při obrábění hlubších dutin, kde se doporučuje kombinovat s pulzním vyplachováním.
- **Tlakové vnitřní vyplachování** (obrázek 10b). Jedná se o způsob vyplachování, kdy je dielektrikum pod tlakem přiváděno otvorem v nástroji. Bohužel zhoršuje tvarovou přesnost na bočních plochách, jelikož zde odváděné částice způsobují další výboje. Z tohoto důvodu se používá zejména u navrtávání startovacích děr pro drátové řezání, kde není třeba žádná přesnost, nýbrž jde pouze o vytvoření díry na prostrčení drátu. Tomuto problému se dá zamezit, pokud se použije v kombinaci s odsáváním. V tomto případě se dají již přesně hloubit složité tvarové dutiny
- **Vyplachování odsáváním** (obrázek 10c). Dielektrikum je odsáváno spodem nebo vnitřní částí nástroje. Je zde dosaženo vysoké tvarové přesnosti.
- **Pulsní vyplachování** (obrázek 10d). Zde k vyplachování dochází neustálým axiálním pohybem. V momentě oddalování je přerušen pracovní proud a v místě řezu dochází k obměně dielektrika a tím i odvodu nečistot. Proud je opět spuštěn v momentě, kdy se nástroj přiblíží na pracovní vzdálenost. Tento pohyb může být i v některých případech doprovázen rotací elektrody.



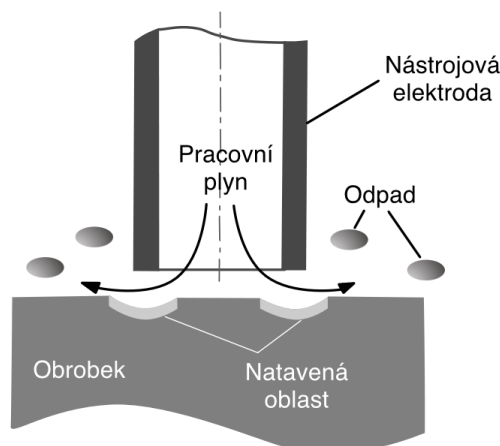
Obrázek 10: Metody vyplachování – vlastní, dle [13; 23]

4.1 Dry EDM

„Dielektrikum“ nemusí být nutně pouze kapalně. Existuje experimentální metoda zvaná „Dry EDM“, v překladu „suché elektroerozivní obrábění“. Tato metoda se od klasického elektroerozivního obrábění liší právě způsobem „vyplachování“ a chlazení. Jak již z názvu vyplývá, obrábění probíhá za sucha čili nejsou použity procesní kapaliny jako například různé oleje nebo deionizovaná voda, nýbrž je použit procesní plyn.

Tento způsob vyplachování a chlazení se nejčastěji používá při vrtání opravdu malých otvorů (micro-EDM). Procesní plyn je tlačěn pod obrovským tlakem skrze nástrojovou elektrodu přímo do místa úběru. Materiál je tímto odstraněn a zároveň dochází i ke chlazení nástrojové elektrody. Jako procesní plyny se používají klasický vzduch, kyslík, argon, helium nebo dusík. Existuje ještě modifikace tohoto suchého EDM obrábění, a to tzn. „Near-dry EDM“ („skoro suché elektroerozivní obrábění“), které jako procesní plyn/kapalinu využívá právě mix těchto dvou aspektů. [24; 25]

Obecně suché EDM obrábění přináší řadu výhod, jako je například nízký poměr opotřebení nástrojové elektrody, tenká ovlivněná vrstva na materiálu, a především vyšší šetrnost k životnímu prostředí než při použití klasických procesních kapalin. Ovšem pro plnohodnotné průmyslové využití je třeba dosahovat vyšších rychlostí úběru materiálu a lepší integrity povrchu. Z tohoto důvodu byly vytvořeny různé modifikace, jako již zmíněné skoro suché EDM obrábění nebo použití vibrací. Tyto modifikace v určitých vlastnostech pomohly (například zvýšení úběru materiálu), ale na druhou stranu jinde uškodily (větší opotřebení nástrojové elektrody nebo větší drsnost povrchu). [24; 25]



Obrázek 11: Princip „Dry EDM“ – vlastní, dle [26]

5 Dosahované parametry po obrábění

U elektroerozivního obrábění obecně platí vztah, který nám charakterizuje odchylku výsledného obrobku od požadovaného tvaru. Zavádí se, jelikož při obrábění působí několik vlivů, které by mohly negativně ovlivnit kvalitu výsledného povrchu. Tuto odchylku značíme δ a je definována následovně: [13]

$$\delta = \delta_{ST} + \delta_T + \delta_{NÁST} + \delta_{ER},$$

kde platí:

- δ_{ST} je chyba obráběcího stroje, která zahrnuje různé deformace a přesnosti pohybových mechanismů a polohovacího mechanismu nástrojových elektrod. Jelikož se jedná o obrábění bez silového působení, počítá se přibližně s hodnotou maximálně do 0,003mm;
- δ_T je chyba vzniklá tepelnou dilatací během obrábění způsobenou ohřevem elektrod a dielektrika. Obecně platí $\delta_T = f(l, \alpha_{nástr.}, \alpha_{obr.}, \Delta T)$, z čehož vyplývá, že při obrábění větších dílců na stroji, který není vybaven tepelnou stabilizací, je třeba brát v potaz určitou tepelnou kompenzaci rozměru.
- $\delta_{NÁST}$ je výrobní nepřesnost nástrojové elektrody. Lze předpokládat, že pro frézované elektrody se jedná o $\pm 0,02$ mm a elektrody broušené, popřípadě o drátové elektrody se jedná o $\pm (0,002-0,005)$ mm.
- δ_{ER} jsou chyby dané vlastním EDM. Lze je kompenzovat tvarem nástroje či vhodným způsobem obrábění. Řádově tyto odchylky nepřesahují hodnoty μm .

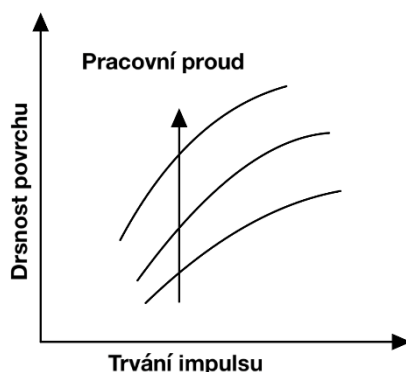
5.1 Drsnost povrchu

Výsledná drsnost povrchu se odvíjí od způsobu obrábění a zejména od zadaných parametrů, jako je například doba impulsu nebo pracovní napětí a proud. Jak už je známo, při elektroerozivním obrábění vznikají drobné krátery. Tyto krátery vznikají natavením materiálu elektrickým výbojem. Z logiky věci vyplývá, že pokud budeme zvětšovat vybíjecí energii, množství odebraného materiálu bude větší a tím pádem se snižuje jakost výsledného povrchu. [5; 27]

Pro výslednou hodnotu drsnosti povrchu je definován následující vztah:

$$Ra = 0,0225 \cdot i_p^{0,29} \cdot t_p^{0,38},$$

kde i_p je pracovní proud a t_p je doba trvání impulsu. Z uvedeného vztahu vyplývá, čím větší bude pracovní proud a doba trvání impulsu, tím horší bude výsledná kvalita povrchu. Lze to sledovat na grafické závislosti na obrázku 12. [27]



Obrázek 12: Závislost drsnosti povrchu na době impulsu – vlastní, dle [27]

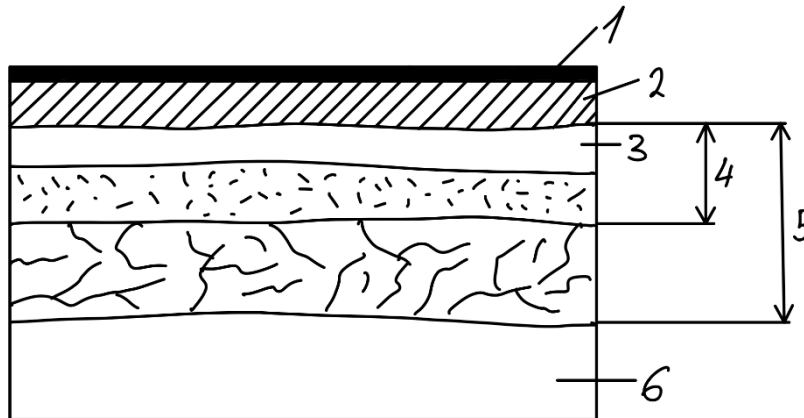
Lze tedy konstatovat, že z technologického hlediska lze dosáhnout nejlepší kvality povrchu nízkými hodnotami proudu, krátkými impulsy a vysokofrekvenčními výboji. Bohužel toto nastavení je doprovázeno zvýšeným opotřebením nástroje. Orientační kvalitativní parametry různých způsobů obrábění lze sledovat v tabulce 1. [13]

Způsob obrábění	Dosažitelná přesnost rozměrů [mm]	Dosažitelná drsnost povrchu Ra [μm]
Opracování na hrubo pulsním zdrojem s velkou energií výboje	± (0,02 - 0,5)	Ra > 6 Rmax ~ 25
Normální opracování pulsním zdrojem	± (0,01 - 0,02)	Ra = (2 - 6) Rmax = (8-10)
Jemné a velmi přesné obrábění vysokofrekvenčním zdrojem (drátová elektroda)	± (0,005 - 0,01)	Ra = (0,8 - 2) Rmax < 6
EDM leštění nebo přesné řezání drátovou elektrodou	až ± 0,002	Ra = (0,2 - 0,8) Rmax < (2,5 - 4)

Tabulka 1: Dosažované kvalitativní parametry – vlastní, dle [13]

5.2 Stav povrchové vrstvy

Dalším důležitým faktorem ovlivňující výslednou kvalitu povrchu je stav povrchové vrstvy. Vlivem elektrické eroze dochází ke změnám struktury na povrchu, ale i do určité hloubky pod povrch obrobenej plochy. Vzniká několik vrstev s různými vlastnostmi. Rozložení těchto vrstev lze sledovat na obrázku 13. [13; 14]



Obrázek 13: Jednotlivé vrstvy povrchu po obrábění – vlastní, dle [13]

- 1 – první mikrovrstva obsahuje nasycené částice dielektrika. Jedná se o chemickou sloučeninu vytvořenou difuzí.
- 2 – v případě zapojení nástroje na záporný pól, vzniká tato vrstva vlivem jeho difuze.
- 3 – „bílá vrstva“ silně nasycená uhlíkem vzniká znovu ztuhnutím taveniny. Má jemnou martenzitickou strukturu o tvrdosti až 60 HRC a tloušťce (0,04 – 0,2) mm.
- 4 – tzv. pásmo termického ovlivnění, rozměrově větší než bílá vrstva. Strukturou se jedná o zakalený a popuštěný výchozí materiál.
- 5 – pásmo plastické deformace. Vzniká v důsledku tlakových rázů impulsů.
- 6 – základní materiál.

Závěrem vyplývá, že v povrchové vrstvě po elektroerozivním obrábění zůstává zbytkové tahové pnutí, které snižuje mez únavy a napomáhá k poškození povrchu, například při vzájemné interakci s jiným povrchem. Proto se v některých případech využívá dokončovacímho mechanického obrobení této vrstvy. [18]

6 Typy elektroerozivního obrábění

6.1 Elektroerozivní hloubení

Též uváděno pod zkratkou SEDM z anglického názvu „Sinking electrical discharge machining“. Jedná se víceméně o nejvyužívanější technologii v oblasti elektroerozivního obrábění. Největší uplatnění nachází v oblasti automobilového, leteckého a lékařského průmyslu. Například slitiny s vysokým obsahem niklu, které se hojně využívají v leteckém průmyslu, představují pro konvenční technologie různé problémy. Dále SEDM lze využít při výrobě hlubokých kapes nebo komplikovaných tvarů v oblasti výroby forem z těžkoobrobitelných materiálů. [28]

Základní princip spočívá v použití tvarové elektrody, jež má tvar negativu tvarové dutiny, kterou požadujeme vyhloubit. Elektroda se opakovaně přibližuje a oddaluje od obrobku, z důvodu zajištění proudění dielektrika a následného vyplachování nataveného materiálu. Tento pohyb v ose Z může být doprovázen i tzv. translačním pohybem, jinými slovy zajišťuje vychylování elektrody ve všech směrech, a tedy obrábění i v ose X a Y. Translační pohyb se zavádí z důvodu zvýšení přesnosti a kvality obráběné plochy hlavně u hlubších dutin nebo zápusťek, jelikož odjiskřené částice jsou stále elektricky vodivé a mohlo by docházet k dalším výbojům a zhoršování jakosti obrobku. U translačního pohybu dochází k výbojům střídavě na různých částech elektrody a vzniká tak dostatek prostoru k vypláchnutí zbytkového materiálu. Tento pohyb zajišťují speciální vychylovače elektrody. Lze tak vytvořit několik druhů tohoto pohybu, který se odvíjí od tvaru hloubené dutiny (například kruhový, spirální nebo do hvězdy). Samozřejmě nelze opomenout, že celý proces opět musí být zaplaven v dielektriku. Zde se nejčastěji využívají dielektrika na bázi oleje či petroleje. [3; 12]

Jak již bylo zmíněno v kapitole o nástrojových elektrodách, nejpoužívanější materiál k výrobě elektrody pro elektroerozivní hloubení je grafit. Oproti dříve používané mědi je mnohem lehčí a hlavně pevnější, takže se z něj vyrábí tenkostěnné nebo dlouhé elektrody. Dále má nižší tepelnou roztažnost a lze používat i vyšší hodnoty proudu bez výrazného opotřebení nástroje, což je výhodné například při hrubování. Na výrobu těchto elektrod se používá klasické třískové obrábění nebo speciální způsob vybrušování negativním brusným nástrojem z umělé hmoty a brusivem v povrchové vrstvě. [3]

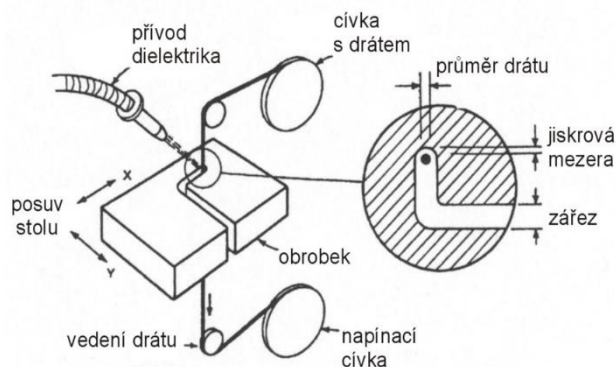


Obrázek 14: Grafitové elektrody [29]

6.2 Elektroerozivní drátové řezání

Další hojně využívanou technologií je elektroerozivní řezání pomocí drátu anglickým názvem „Wire electrical discharge machining“ neboli WEDM. Hlavní využití má zejména ve výrobě střížných a lisovacích nástrojů. [30]

Základní princip lze sledovat na obrázku 15. Víceméně jsou veškeré zákonitosti elektrické eroze zachovány jen s malým rozdílem, že elektrodu zde nahrazuje drát, který je napnutý mezi dvěma vodícími hlavicemi a neustále se odvíjí pomocí speciálního odvíjecího mechanismu. Doslova vyřezává požadovaný tvar do obrobku. Neustálé odvíjení se zavádí z důvodu úplného odstranění vlivu opotřebení nástroje. Obrobek je upnut na posuvném stole a je zapojen s opačnou polaritou. Způsob zapojení závisí na použitém stroji a způsobu obrábění. Po dosažení pracovní mezery a přivedení dielektrika vzniká výboj. Jako dielektrikum se u drátové řezání většinou používá deionizovaná voda nebo lehké oleje. Tloušťka řezu se odvíjí od zvoleného průměru drátu. [13; 30]



Obrázek 15: Elektroerozivní drátové řezání [30]

Při výběru správného materiálu drátové elektrody je třeba hledět na několik specifických vlastností. Drát musí mít dostatečnou tepelnou vodivost, a to z důvodu, že přivádí do místa řezu elektrickou energii a protéká jím vysoký pracovní proud. Dále musí splňovat určitou mechanickou pevnost a toleranci rozměru a tvaru (zejména na průměr a kruhovitost). Aby bylo obrábění co nejpřesnější, je zapotřebí, aby drát vstupoval do řezu dostatečně napnutý a bez jakýkoliv vychylek. [13]

V praxi se využívá několik materiálů, každý má své uplatnění. Například pro přesné obrábění se používají dráty měděné nebo mosazné, které mají dobrou elektrickou vodivost a vysokou pevnost v tahu (480–900 MPa). Pro jemné řezy se používají dráty z molybdenu nebo wolframu o malých průměrech (0,03 - 0,07 mm). Lze také využít i dráty povlakované, které pomalu nahrazují dráty klasické. Jedná se o dráty, které mají jádro většinou z oceli nebo mědi a na povlakovou vrstvu se využívají různé materiály v závislosti na použití. Měděný povlak zajišťuje lepší elektrickou vodivost, dále se používají povlaky zinkové nebo grafitové. Grafit má nízký koeficient tření a lze s ním dosahovat vyšší rychlosti odvíjení drátu. Celkově se průměry drátů pohybují v rozmezí 0,03 – 0,3 mm a dosahuje se rychlosti drátu během řezání až $150 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. [30]



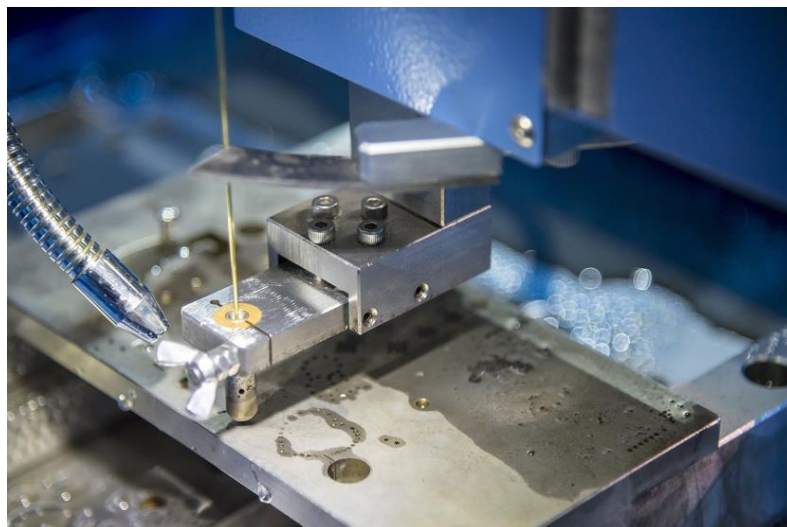
Obrázek 16: Ukázka řezání drátovou elektrodou [31]

Dosahované parametry řezu závisí na mnoha aspektech. Roli hrají vlastnosti stroje, přesnost vedení a napnutí drátu, přesnost a spolehlivost CNC řízení daného stroje, stabilita generátoru nebo kvalita a dostatečná čistota přiváděného dielektrika. Pokud jsou všechny tyto vlastnosti řádně ošetřeny, lze dosahovat vysoké přesnosti. Například rovnoběžnost řezu až $2 \mu\text{m}$ na 100 mm nebo drsnosti povrchu až $Ra = 0,15 \mu\text{m}$. V neposlední řadě se nesmí zanedbat ani teplotní kolísání stroje. Čím větší bude rozmezí kolísání, tím menší přesnosti budeme dosahovat. [9]

6.3 Elektroerozivní vrtání

Z anglického „Electrical discharge drilling“ neboli EDD. Jedná se o vrtání malých kruhových či jiných tvarových otvorů (obvykle 0,5-1,5 mm s přesností $\pm 0,05$ mm) do velice tvrdých materiálů, které nelze vrtat konvenčně. Využívají se k tomu stroje se specifickými generátory, které generují slabší výboje než klasické EDM generátory a s podstatně kratší dobou trvání jednotlivých impulsů (3-5 μs). Velkou výhodou je možnost vrtat do velké hloubky, jelikož při vrtání nedochází k žádným silám a poměr možné vrtané hloubky ku průměru nástroje je až 300:1. [3; 13]

Princip je opět podobný jako u ostatních elektroerozivních procesů. Tentokrát je elektroda ve formě mikrotyče, „vrtáku“, který je upnut do stroje a zapojen na opačnou polaritu než obrobek. Nástroj se pomalu pohybuje v ose Z směrem dolů a v důsledku elektrické eroze vyvrtává otvor. Samozřejmě za přítomnosti dielektrika, nejčastěji ve formě deionizované vody, které může být přiváděno například dutinou uvnitř nástroje. Pro lepší vyplachování může být ještě doplněn o vibrační pohyb. [33]



Obrázek 17: Elektroerozivní vrtání [32]

Elektrody se vyrábí převážně z mosazi nebo mědi. Mosaz sice není úplně ideální materiál pro elektrickou erozi, jelikož zde nastává značný opal, ale u vrtání to není až tak důležité, na rozdíl od hloubení. Měď lze obohatit o wolfram. To se poté používá na vrtání opravdu malých průměrů. [3]



Obrázek 18: Elektrody pro EDM vrtání [34]

6.4 Elektroerozivní frézování

Další, ne tak rozšířenou technologií založenou na elektrické erozi je elektroerozivní frézování. Prakticky se o jedná o stejný mechanismus úběru materiálu jako u konvenčního frézování jen s rozdílem, že k obrábění dochází v důsledku elektrické eroze a místo klasických fréz se jako nástroj používá rotační měděná elektroda, nejčastěji trubice. Stejně jako u konvenčního frézování se nástroj pohybuje po počítačem vygenerovaných drahách a ubírá materiál vrstvu po vrstvě. Dielektrikum je přiváděno tryskami z vnějšku nebo dutinou uvnitř nástroje, pokud je to možné. [3; 35; 36]

EDM frézování větší objektů nemá zatím skoro žádné průmyslové využití. Co je ale více uplatnitelné, je elektroerozivní micro frézování. Jedná se téměř o totožnou technologii, s tím rozdílem, že se používají elektrody o průměru menší než 0,8 mm. U těchto malých průměrů je problémem vysoká pružnost nástrojů. To může snižovat přesnost výsledného obrobku. Tento problém částečně řeší rotace nástroje, kdy nastává dynamický efekt a nástroj se stává tužším než ve stacionárním stavu. [35]

Co se týče nevýhod této metody, po dokončení frézování mohou být na stěnách patrné jednotlivé oderodované vrstvy materiálu, nebo jako u klasického frézování nelze dosáhnout vnitřních ostrých hran. Rádus se odvíjí od průměru elektrody. Také se musí brát v potaz opotřebení elektrody. Lze předpokládat na základě matematického modelu, jak se bude elektroda opotřebovávat, a to zahrnout do obrábění. [3]

6.5 Elektroerozivní broušení

Elektroerozivní broušení neboli EDG (z anglického „Electrical discharge grinding“) je opět velice podobné klasickému konvenčnímu broušení, pouze obohacené o elektrickou erozi. Jedná se o rotující elektrodu, která se přiblíží na pracovní vzdálenost od obrobku (0,013-0,075 mm) a díky opačné polaritě a proudícímu dielektriku dochází k erozi (broušení). Elektroda je vyrobená převážně z grafitu, dosahuje rychlosti 30-180 m/min a díky rotaci dochází k efektivnímu vyplachování dielektrika. Dielektrikum se v tomto případě používá ve formě uhlovodíkového oleje. Lze dosahovat rychlosti úběru materiálu 0,16-2,54 cm³/min a drsnosti povrchu Ra = 1,6-3,2 μm. Pomocí EDG lze brousit tvrdé materiály mnohem rychleji než klasickými konvenčními metodami, ovšem nelze

dosáhnout takové výsledné kvality povrchu. Proto existuje hybridní technologie pod názvem elektroerozivního abrazivního broušení (angl. „Electrical discharge abrasive grinding – EDAG“), která tyto dvě technologie kombinuje. Klasická elektroda je nahrazena kovem vázaným s pojivem a k úběru materiálu dochází kombinací klasického mechanického broušení s elektrickou erozí. Oproti použití pouze samotného EDG lze dosahovat vyšších úběrů a mnohem lepší drsnosti výsledného povrchu. [3; 27]

6.6 Elektroerozivní leštění

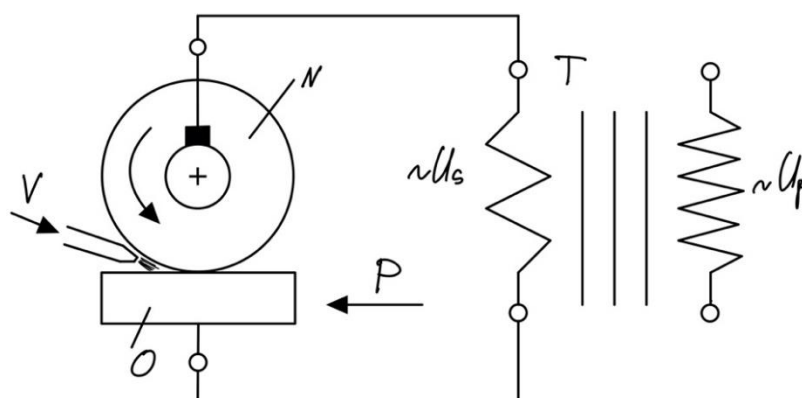
U většiny zápuštěk nebo lisovacích forem je zapotřebí dosahovat drsnosti až $R_a = 0,2 \mu\text{m}$. Lze tím dosáhnout technologií elektroerozivního leštění neboli EDT (z anglického „Electrical discharge texturing“), které využívá velmi krátkých ($3-5 \mu\text{s}$) impulsů s nízkou energií. Elektroda koná orbitální pohyb a díky tomu leští daný povrch. Ovšem samotná elektroda musí mít vysokou kvalitu povrchu, aby byl výsledný povrch co nejlepší. Proces opět probíhá v pracovním médiu (parafín). Na povrchu obrobku vznikají drobné překrývající se krátery, které jsou velmi ploché, kruhové a víceméně stejné. Takto lze leštit plochu maximálně 100 cm^2 . [13; 27]

6.7 Elektrokotaktní obrábění

Jako poslední stojí za zmínku poněkud specifická technologie na principu elektrické eroze, a to elektrokotaktní obrábění. Specifická protože, že se opět jedná o hybridní technologii, kdy dochází k přímému kontaktu elektrody s obrobkem, což u jiné technologie nedochází. Kontakt může být buď nepřetržitý s využitím například u elektrofrikčních pil nebo může být přerušovaný, kdy se používá pouze k vyvolání obloukového výboje. [37]

Princip funkce je následující. Elektroda se pohybuje v kontaktu po obrobku a vykonává rotační pohyb. Tento pohyb mechanicky budí elektrické nestacionární kontaktní obloukové výboje, které následně natavují materiál. Systém je napájen střídavým napětím z transformátoru (o výkonu $10-250 \text{ kW}$ a frekvence $50-500 \text{ Hz}$). Celý proces využívá Joul-Lenzova tepla, které vzniká při kontaktu elektrod. Nástrojová elektroda musí v průběhu obrábění neustále vykonávat pohyb, jinak by došlo k vzájemnému svaření s obrobkem. Pro dostatečný odvod materiálu je nutné zavádět pracovní médium, jako

třeba kapalinu nebo vzduch, jelikož pouhé tlakové vlny, které vznikají při vzniku výboje, nestačí k vytlačení nataveného materiálu z místa řezu. Ještě častěji se používají nástrojové elektrody s mírnými výstupky, které zlepšují odvod nataveného materiálu. Pracovní napětí se pohybuje v hodnotách $6 \div 12 \div 25 \div 40$ V. Čím nižší se používá pracovní napětí, tím vyšší je zapotřebí přítlačný tlak, a naopak při vyšších napětí převládá účinek elektrické energie a přítlačný tlak je nižší. Ve výbojovém kanále převládá iontová vodivost a charakteristické jsou i doby výboje, kdy se dosahuje až $t_i = 0,01$ s. Principiální schéma obrábění lze sledovat na obrázku 19. [9; 13; 37]



Obrázek 19: Schéma elektrokontaktního obrábění – vlastní, dle [13]

Jako výhody u této technologie lze uvést například vysokou produktivitu obrábění $100 - 500$ kg/hod ($1\ 000$ cm³/min) nebo malé opotřebení nástroje. Další velkou výhodou je jednoduchý a relativně levný stroj, který využívá nízké pracovní napětí. Je také možné obrábět při absenci dielektrika. Nejvíce se tato technologie využívá pro odřezávání nálitků a vtoků nebo hrubování odlitků ve slévárenství. Lze ji využít i pro opracování svarů a řezání těžko obrobitelných materiálů. [13]

7 Oblasti využití elektroerozivního obrábění

V předchozích kapitolách jsem se věnoval komplexnímu popisu této speciální technologie obrábění. Pro úplné shrnutí v této kapitole uvedu nejdůležitější výhody a nevýhody a představím několik oblastí, kde se tato technologie nejvíce uplatňuje.

7.1 Výhody EDM

Mezi ty nejdůležitější výhody elektroerozivního obrábění je určitě nutno uvést obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Konkrétně jsou tím myšleny tvrdé materiály jako je titan, různé karbidy a další obtížně obrobitelné materiály, které by klasickou konvenční metodou obrábět nešlo. Pro EDM nejsou důležité mechanické vlastnosti, nýbrž ty fyzikální. Materiál musí být hlavně elektricky vodivý. [18]

Další výhodou je obrábění problematických tvarů s vysokou přesností a dosahovanou kvalitou výsledného povrchu. Lze obrábět například tenkostěnné součásti, které by konvenční technologie mohla v důsledku působení řezné síly poškodit. Zároveň lze vytvářet i ostré vnitřní rohy, které konvenční technologií udělat nelze. EDM technologií je možné dosáhnout přesnosti rozměru až 0,002 mm a drsnosti povrchu až $Ra = 0,05 \mu\text{m}$. [18]

Jako u všech ostatních technologiích výroby i zde je trendem automatizace. Proto jsou dnešní EDM stroje vybaveny zásobníky nástrojů, podavači nebo technologickými paletami, které snižují výrobní časy a náklady. Navážou-li na problematiku výrobních časů, další obrovskou výhodou je dlouhý bezobslužný provoz. Například dnešní EDM drátová řezačka dokáže pracovat až 140 hodin bez zásahu obsluhy. Je to umožněno neustále odvíjející se drátovou elektrodou, takže opotřebení nástroje zde nehraje žádnou roli a při obrábění nevzniká defacto žádný odpad, který by proces mohl omezit. [38]

7.2 Nevýhody EDM

Samozřejmě každá technologie má i řadu nevýhod, s nimiž je nutné při použití počítat. Jako první je již zmiňované obrábění pouze elektricky vodivých materiálů. Nepatří to sice mezi největší nevýhody, ale vylučuje se tím obrábění například plastů nebo různých kompozitních materiálů. [18]

Další nevýhodou je nízká produktivita a mnohem vyšší energetická náročnost oproti klasickým konvenčním technologiím. Stručné porovnání lze sledovat v tabulce 2. Ovšem nízká produktivita a vysoká energetická náročnost nutně neznamená větší pracnost. Například obrábění velmi složitých tvarů se pomocí EDM provádí mnohem jednodušeji než konvenční technologií. [18]

Způsob obrábění	Úběr materiálu [mm ³ /s]	Měrná práce [J.mm ⁻³]	Příkon stroje [kW]
Soustružení Frézování	až 15000	do 10	do 50
Broušení	80 - 1500	5 - 200	5 - 150
EDM	5 -120	100 - 1000	až 15

Tabulka 2: Technologické srovnání EDM s konvenčními metodami – vlastní, dle [18]

V neposlední řadě se nejedná pouze o energetickou náročnost, ale i o vysoké pořizovací náklady, kdy se cena stroje může pohybovat od jednotek milionů až po desítky. A stejně jako u většiny strojů následná údržba a servis také není levnou záležitostí. To samé platí pro některé nástroje, kdy jejich výroba může být náročnější, navíc dochází i k velkému opotřebení během samotného obrábění. [8; 18]

Na závěr bych jako nevýhodu uvedl již jednou zmíněný stav povrchové vrstvy po obrábění. Jelikož zde zůstává zbytkové tahové pnutí, může docházet ke snížení meze únavy materiálu a například nástrojům vyrobených pomocí EDM se tím zkracuje životnost. [18]

7.3 Aplikace EDM

Elektroerozivní obrábění nachází uplatnění v téměř každém průmyslovém odvětví. Jak již bylo několikrát řečeno, využívá se hlavně tam, kde klasické konvenční metody selhávají. Zejména tedy při obrábění těžkoobrobitelných materiálů, kde je zapotřebí dosáhnout vysoké přesnosti a kvality povrchu při výrobě tvarově složitých součástí. [39]

Konkrétní využití v praxi je velice obsáhlé, mezi nejčastější typy patří zejména: [39]

- výroba forem pro vstřikovací lisy,
- výroba střížníků a střížnic,
- vrtání malých otvorů od průměru 0,05 mm,
- výroba různých složitých tvarů z těžkoobrobitelných materiálů,
- výroba nástrojů ze slinutých karbidů,
- odstraňování zalomených součástí, šroubů apod.,
- vyřezávání úzkých drážek,
- výroba různých znaků a písmen,
- ostření a lapování nástrojů,
- odřezávání hotových výrobků z platformy po kovovém 3D tisku.

8 Srovnání s ostatními výrobními metodami

8.1 Technologie řezání EDM, plazmou, laserem a vodním paprskem

V této kapitole se hodlám zabývat těmito čtyřmi nekonvenčními technologiemi řezání. Nejprve čtenáře seznámím s jednotlivými metodami a následně na konkrétním příkladu uvedu srovnání. U metody EDM řezání netřeba vysvětlovat princip, jelikož jsem se jím podrobně zabývat v kapitole 6.2.

8.1.1 Řezání plazmou

Jedná se o technologii, která k úběru materiálu využívá vysoce zahřátý ionizovaný plyn (plazmu). Co to vlastně plazma je? Jsou to plyny zahřáté na teploty přesahující několik tisíc stupňů Celsia, díky čemuž vzniká unikátní čtvrté skupenství. Jedná se o hmotu, která se svými vlastnostmi podobá jak stavu tuhému, tak i plynnému. V plazmě jsou volně pohybující se elektrony, které mohou přenášet elektrický proud čili je vodivá. Lze ji získat několika způsoby: [40]

- obloukovým výbojem (elektricky),
- kompenzovaným iontovým svazkem (mechanicky),
- rozpadovými a slučovacími jadernými reakcemi.

V technické praxi se nejvíce využívá plazma vyvolaná elektrickým obloukem. Zde výboj vzniká mezi dvěma elektrodami. Princip je takový, že elektrické pole v plynném prostředí přesáhne určitou hodnotu. Tuto hodnotu nazýváme kritickou. Poté, jen nepatrný přivedený elektrický proud vyvolá jev s intenzivní světelností ve viditelném ultrafialovém spektru a vzniká jiskra. Aby se s takovou energií dalo dobře pracovat, je zapotřebí jí usměrnit. To lze provést za pomoci vhodného tvaru trysky hořáku a teplotní stabilizace (chlazením), většinou pomocí proudícího plynu nebo vody. Tak dosáhneme požadovaného zúženého tvaru plazmového paprsku. Čím intenzivněji probíhá chlazení, tím menšího průměru paprsku a větší teploty lze dosáhnout. [40]

Pro plazmové řezání lze použít několik typů plynů. Každým používaným plynem se dá dosahovat různých teplot. Používá se například: [40]

- vodíková plazma (do 7000 K),
- argonová plazma (do 15000 K),
- heliová plazma (do 20 000 K).

Při samotném řezání dochází k natavování materiálu. K jeho odstranění z místa řezu dochází pomocí kinetické energie plazmových plynů. Obecně plazma je ionizovaný plyn, k jejíž ionizaci došlo ohřátím na vysokou teplotu. Rychlost pohybujících se částic uvnitř plazmy se pohybuje kolem 15 000 m/s a teplota paprsku dosahuje v průměru přes 10 000 stupňů Celsia. Pro běžné plazmové řezání se nejčastěji používá směs argonu a helia. [40]

8.1.2 Řezání laserem

Princip této technologie řezání je založen na počátečním průpalu materiálu a následném postupném odtavování dle požadovaného tvaru pomocí laserového paprsku. V praxi se používají dva typy laserového řezání, oxidační a tavné. Oxidační řezání je určeno především pro materiály s vysokou tepelnou vodivostí (například černá ocel nebo měď). Jako procesní plyn se využívá kyslík, který podporuje hoření, a tedy lokálně zvyšuje teplotu v oblasti řezu. Výhodou oproti tavnému řezání je úspora procesních plynů při řezání větších tloušťek, jelikož je vytvořená větší tepelná plocha řezu, ze které nemá plyn kam unikát čili je možno snížit jeho tlak. [41]

U tavného řezání se používá především dusík nebo vzduch (záleží na konkrétní aplikaci) a je určeno pro řezání například nerezové oceli, mosazi, pozinku, hliníku a podobných materiálů. Hliník má sice vysokou tepelnou vodivost, ale je vysoce reaktivní s kyslíkem, proto ho nelze řezat oxidačně. Procesní plyn slouží především k odvodu nataveného materiálu. Lze tímto způsobem řezat i některé plasty (například ABS). [41]

Při řezání laserem záleží na mnoha parametrech. Například na velikosti ohniska, typu procesního plynu, tlaku plynu, rychlosti řezací hlavy, výkonu laseru, ale především je

důležitá vlnová délka. Jelikož každý materiál efektivně absorbuje záření při různých délkách. [41]

Nejčastěji se používá například vlnová délka 1 064 nm, což jsou lasery vláknové a nd: YAG nebo 10 600 nm, čehož využívají plynové CO₂ lasery. Každým lze řezat jiné typy materiálů. Například s 10 600 nm lze kromě kovů řezat i organické materiály (dřevo, keramika, polymery, ...), což by za použití vlnové délky 1 064 nm mohlo zanechat zčernalý povrch. [41]

8.1.3 Řezání vodním paprskem

U tohoto typu technologie se k úběru materiálu používá vodní paprsek pod vysokým tlakem. Jedná se o moderní, kvalitní, a hlavně velice ekologickou metodu dělení materiálu. Fyzikální princip této metody je založen na předpokladu, že vodní paprsek, který je urychlen na dvou až čtyř násobnou hodnotu rychlosti zvuku, lze považovat za tuhé těleso. Voda je standartně stlačena na hodnotu mezi 2 000 – 6 500 barů, nicméně v některých případech lze vyvinout až 8 000 barů. Následně opouští mechanismus tryskou o průměru v závislosti na požadavcích řezu. Další průběh řezání je obdobný jako u laseru, kdy se nejprve vytvoří otvor skrze materiál a následně se vytváří kontura. Řezací je hlava je řízena počítačem, lze tedy vytvořit velice přesné a opakovatelné tvary. [42]

Samotný úběr materiálu probíhá následovně. Při nárazu vodního paprsku na obrobek dochází ke kumulaci vysokého tlaku na malé ploše, což vede ke vzniku rázových vln, tedy i k destrukci materiálu na hranicích zrn a vzniku mikrotrhlin. Tyto trhliny se v důsledku dynamického zatížení kapalinou a turbulentnímu proudění kapaliny ve spáře rychle šíří a dochází k obrábění materiálu. [42]

Pracovním médiem nemusí být pouze čistá voda. Často do vody přidávají abrazivní částice, které přidávají na efektu řezání. Proto se tato technologie často označuje jako hydroabrazivní obrábění. Své využití najde v mnoha průmyslových odvětví, v posledních letech se začala hojně využívat zejména v leteckém a kosmické průmyslu. Jak už jsem naznačil, využívá se především ve dvou provedení. A to buď s čistým vodním paprskem

nebo s příměsí abrazivních částic. Pro představu uvedu několik rozdílů těchto dvou aplikací. [42]

Řezání čistým vodním paprskem se využívá zejména na řezání nekovových materiálů, jako například kevlar, různé lamináty, kompozity, sklotextil nebo gumotextil. Rychlost řezání se pohybuje v rozsahu od 5 m/min do 400 m/min. Pracovní tlak kapaliny lze regulovat dle potřeby. Samotné trysky se vyrábí z diamantu, safíru nebo rubínu a jejich životnost je v závislosti na obsahu minerálů ve vodě v rozmezí 50-500 hodin. [42]

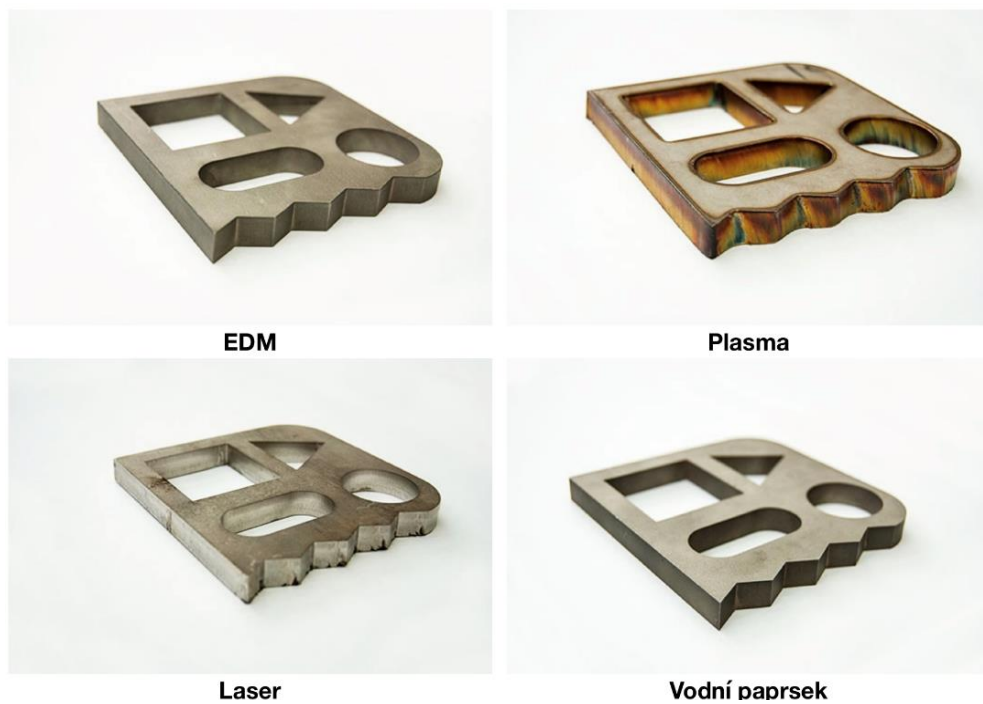
Jako abrazivní částice při řezání vodním paprskem s příměsí abrazivních částic se používají různé syntetické i přírodní abrazivní materiály. Příkladem je křemičitý písek, korundová zrna, granát, olivín apod. Z pravidla se používají částice o zrnitosti 0,2 - 0,5 mm. Zde musí tryska odolávat mnohem větším abrazivním účinkům, a proto se vyrábí z karbidu wolframu. Při běžném řezání, což je za použití křemičitého písku a tlaku kapaliny kolem 4 000 barů, vydrží tryska cca 100 hodin. Rychlost řezání je různorodá a stanovuje se optimalizační zkouškou. Vzdálenost trysky od obrobku se snaží být co nejmenší z důvodu minimální šířky spáry a tím i lepší dosahované přesnosti. [42]

8.1.4 Srovnání na konkrétní součásti

Na obrázku 20 je názorně vidět, jak vypadá součást po obrobení danou technologií. V následujících řádcích uvedu krátké porovnání těchto čtyřech řezacích metod.

Začal bych u elektroerozivního řezání. Na první pohled je součást čistá a hladká. Obvykle není nutné žádného dalšího opracování, i když na součásti zůstává nepatrná tepelně ovlivněná oblast. Malou nevýhodou v porovnání těchto čtyř metod je, že lze řezat pouze elektricky vodivé materiály. Jako další faktor lze uvést maximální řezanou tloušťku, která je u EDM řezání prakticky omezena jen pracovním prostorem v ose Z. Obvykle to bývá kolem 300 mm. Přesnost řezání může být až 0,002 mm. Samotné nastavení drátové řezačky se liší pro různé typy materiálu. Pro úplnou představu se ceny drátových řezaček pohybují kolem 100-400 tis. USD, ale samozřejmě i více. [43]

Jako další na obrázku 20 lze vidět díl vyřezaný pomocí plazmy. Jeho povrch působí na pohled značně opálený. Není to jen vizuální záležitost, ale na obrobku je i do větší hloubky tepelně ovlivněná oblast. Do jaké hloubky už závisí na použitém pracovním plynu. Také mohlo dojít k jistým tepelným deformacím na povrchu obrobku. Z tohoto důvodu je nutná následná dokončovací operace, jako například broušení. Plazmou se řeže především ocel a hliník. Samozřejmě lze řezat i jiné materiály s určitými omezeními. Je možné řezat do tloušťky materiálu zhruba 50-80 mm a dosahovat přesnosti do 0,5 mm. Plazmové stroje vyžadují také různá nastavení pro řezání různých materiálů. Opět pro představu se ceny pohybují v rozmezí 60-300 tis. USD. [43]



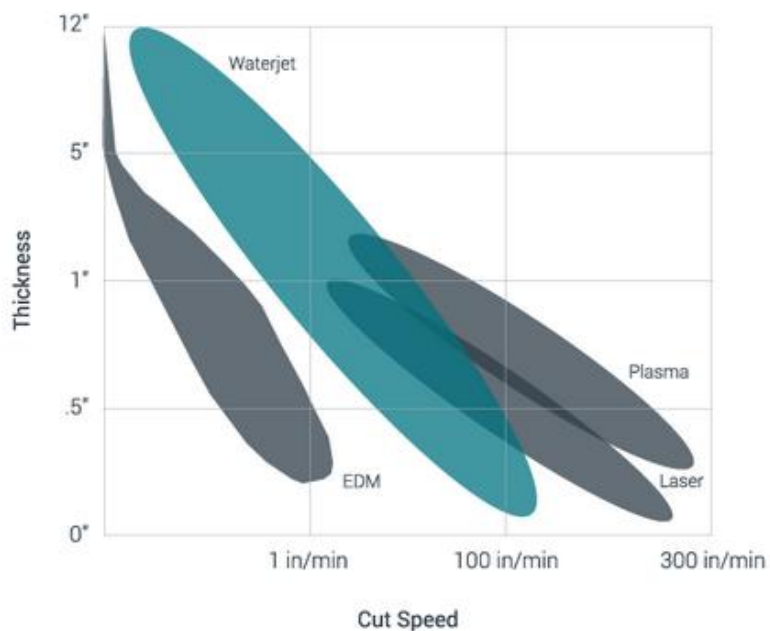
Obrázek 20: Srovnání řezacích technologií [43]

Dále je uvedeno řezání laserem. Zde povrch vypadá už o něco lépe než po řezání plazmou, ale stále se na obrobku nacházejí zoxidované hrany a samozřejmě také tepelně ovlivněná oblast. Čili následné opracování je většinou také nutné, ale dá se u některých aplikací obejít i bez toho. Laserem lze řezat už větší spektrum materiálů než plazmou, ale v praxi se řeže především ocel, nerez a hliník. Značné omezení je v maximální řezané tloušťce, které je u běžných ocelí okolo 30 mm. S tvrdšími materiály tato tloušťka klesá. Přesnosti

lze dosahovat poněkud vyšší a to do 0,05 mm. Na závěr opět pro představu se ceny laserů pohybují od 200 tis. až do 1 mil. USD. [43]

Jako poslední je uvedena metoda řezání vodním paprskem. Ta je z těchto metod neekologičtější a také řekl bych i nejuniverzálnější. Na obrázku 20, se dá pozorovat, že povrch součásti je velice čistý a hladký. Jelikož řezání probíhá za studena, nevznikají žádné tepelně ovlivněné oblasti a obvykle tedy není nutné žádného dalšího opracování. Jak jsem již zmínil, tato metoda je nejuniverzálnější, jelikož lze řezat téměř jakýkoliv materiál a nastavení stroje je prakticky vždy stejné. Maximální řezaná tloušťka v případě této metody je také relativně příhodná. Lze řezat až do 300 mm, v některých případech až do 600 mm. Přesnost řezání může být až do 0,025 mm a kapitálová investice se pohybuje v rozmezí 60-300 tis. USD. [43]

Na závěr bych ještě rád uvedl porovnání rozsahu řezných rychlostí. Nejuniverzálnější jsou metody řezání pomocí EDM a vodního paprsku, s tím že EDM je ale nejpomalejší z nich. Detaily lze sledovat na grafu uvedeném na obrázku 21. [43]



Obrázek 21: Rozsah řezných rychlostí [43]

8.2 Technologie tvrdého HSC obrábění a EDM hloubení

HSC neboli „High Speed Cutting“ (v překladu „vysokorychlostní obrábění“) představuje modifikovanou metodu konvenčního obrábění, kdy dochází řádově k pět až desetkrát vyšším rezným rychlostem. Lze takto opracovávat i tvrdé, zakalené materiály. Jelikož se HSC obrábění nepoužívá pouze pro obrábění tvrdých materiálů, je nutné tedy definovat pojem tvrdý materiál. Obecně platí, že za tvrdý materiál se považuje materiál o tvrdosti větší než 56 HRC. Jednotlivé maximální hodnoty rezných rychlostí se liší v závislosti na obráběném a rezném materiálu. Pro představu lze uvést, že pro kalené oceli a litiny se pohybuje v rozmezí 200-400 m/min. [44; 45]

Hlavní myšlenkou HSC obrábění je zvýšení výkonu procesu, zlepšení výsledné kvality povrchu a zvýšení životnosti nástroje. A to vše za použití vyšších hodnot otáček, minutového posuvu a při nižší hloubce řezu a menší působící síle. Nutno však podotknout, že HSC obrábění neznamená nutně dosažení co nejvyšších otáček. Je to komplexní proces, u kterého je nutný soulad mnoha faktorů. Především jsou kladeny vysoké požadavky na použitý stroj a nástroj. Je nutné dosáhnout takové optimální rychlosti obrábění, při které se budeme nacházet v nejnižším bodě na křivce celkových nákladů. To znamená, že pokud bychom od tohoto momentu rychlost zvyšovali dále, docházelo by k takovému opotřebení nástroje, kdy by náklady na výrobu začaly opět výrazně stoupat a výroba by se přestala vyplácet. Jiným názvem pro tento typ obrábění by mohl být „HSM – High Speed Machining“. [44; 45; 46]

Co se týče tepelného ovlivnění, u HSC obrábění k němu dochází minimálně. Teplota třísek se zde pohybuje až kolem teploty tavení daného materiálu (tzn. ocel – 1 500 °C, šedá litina – 1 300 °C apod.). A jelikož se pracuje při vysokých otáčkách, dochází k vysoké odchozí rychlosti třísek a tím pádem k minimálnímu přenosu tepla do nástroje a obrobku. Z tohoto důvodu lze pomocí HSC obrábění dosahovat lepších tvarových a rozměrových přesností a výsledné kvality povrchu. [44; 45]

Výhodou tedy je, že stejně jako u EDM hloubení není mnohdy zapotřebí žádné jiné dokončovací operace. Mezi další přednosti lze uvést například výrazné zkrácení času obrábění, celková kvalita obrábění nebo možnost obrábět bez chlazení. [45]

Co se týče použití, tak stejně jako EDM hloubení lze HSC obrábění (respektive frézování, které je „podobné“ jako hloubení) využít na výrobu různých forem nebo zápustek z materiálů o vyšší tvrdosti okolo 60 HRC. [45]

Pokud srovnáme tyto dvě technologie, tak každá bude mít své výhody i nevýhody. Začneme jednoduše u doby obrábění, kdy jednoznačně převládá HSC obrábění, jelikož jakýkoliv proces EDM je velice časově náročný a v tomto ohledu se až na výjimky nedá srovnávat s klasickými konvenčními technologiemi. Na druhou stranu ne vše lze vyrobit pouze za pomoci tvrdého HSC obrábění. Bude-li se jednat například o tvarově velice složité formy, které mají tenké stěny nebo ostré vnitřní rohy, tak to nebudeme schopni frézováním vyrobit, tudíž se dostává do výhody EDM hloubení. [47]

Dalším parametrem pro volbu vhodnější technologie jsou vysoké předepsané tolerance. Při EDM hloubení dochází ke skládání tolerancí samotné elektrody, mezi elektrodové vzdálenosti, tepelné dilatace a spousty dalších vlivů (podrobněji v kapitole 5). Přesnost EDM také klesá s lepší kvalitou povrchu, proto je třeba faktory vyvážit a volit vhodný poměr drsnost/přesnost. Zde zůstává ve výhodě frézování, kdy nedochází ke skládání tolerancí. Také, jak jsem již zmiňoval, u HSC obrábění nastává minimální tepelně ovlivněná oblast, což se považuje za výhodu oproti jakémukoliv EDM procesu. [47]

Výhodou EDM hloubení oproti frézování je snazší hloubkové obrábění. U frézování bychom se měli vyhnout vysokému poměru L:D (délka nástroje ku průměru nástroje). Dále je EDM mnohem lépe automatizovatelný proces, jelikož je lépe předvídatelný než frézování. [47]

Jako vhodný kompromis pro zrychlení výroby složitých forem lze tyto dvě technologie zkombinovat. Pro úběr větší masy materiálu je možné užít HSC frézování a pomocí EDM hloubení dodělat výsledný detailní tvar. [3]

8.3 Technologie EDM vrtání, suché laserové vrtání a jeho hybridní modifikací Laser MicroJet a vrtání elektronovým paprskem

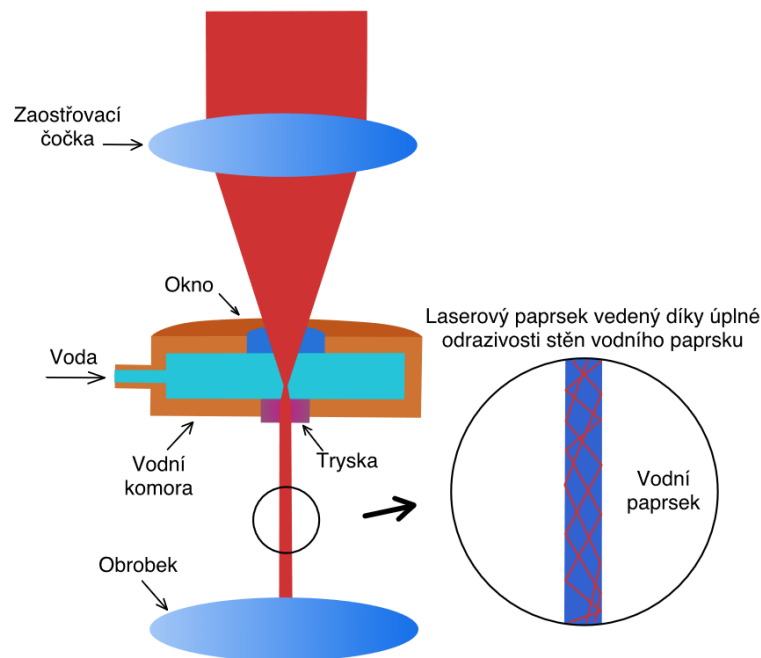
Obecný princip EDM vrtání již netřeba představovat, jelikož tomu tak bylo učiněno v kapitole 6.3. Princip laseru byl již také zmíněn, konkrétně v kapitole 8.1.2, ovšem jednalo se o řezání. Vrtání je mnohem komplikovanější aplikace laserové technologie. Je založeno na postupném tavení nebo odpařování (sublimační laser) materiálu v místě působení laserového paprsku. Pro vytvoření paprsku se využívají vysoce výkonné pulsní lasery s délkou pulsu méně než 1 ms. V praxi se využívá několik aplikací, jako například vrtání jednotlivými pulsy, vrtání opakovanými pulsy nebo prosté vyřezávání díry. Lze takto vrtat do velkého spektra materiálů jako jsou různé kovy, plasty, dřevo, sklo, keramika různé přírodní materiály. Obecně laserem se vrtají otvory cca od 0,1 mm až po defacto, co potřebujeme. U větších průměrů se jedná spíše o již zmiňované vyřezávání. [48]

Jednou ze základních nevýhod laseru je, že po sobě zanechává tepelně ovlivněnou oblast. Ovšem existují tzv. ultrarychlé lasery, které mají délku jednoho pulsu v řádech nano nebo pikosekund (experimentálně i femtosekund). U těchto laserů se ukládá energie tak rychle, že nedochází k žádným tepelným jevům (ohřev, tavení, odpařování). Materiál se odstraňuje pomocí několika termálních i netermálních procesů, které pokračují i několik desítek nanosekund po skončení pulsu. Lze takto vytvořit vysoce přesnou díru s téměř neovlivněnou oblastí. Tohoto jevu se využívá jen u velice malých průměrů. [49]

Laser své využití nachází především v leteckém a kosmickém průmyslu, kde se využívá na vrtání chladicích otvorů. Dále hojně v průmyslu automobilovém, kde je potřeba vrtat velice malé průměry různých vstřikovacích trysek. Samozřejmě se využívá i v dalších průmyslových odvětvích, jako například v elektrotechnice nebo medicíně. [48]

Technologie Laser MicroJet je hybridní modifikací klasického laserové obrábění. Využívá „vlasového“ vodního paprsku k přesnému vedení toho laserového. Laserový paprsek se uvnitř vodního odráží podobným způsobem jako u konvenčních optických vláken. Mezi obrovskou výhodou se řadí intenzivní chlazení místa řezu a okamžité

odstranění vzniklých nečistot. Další výhodou oproti klasickému laseru je, že zde dochází k výrazně menšímu tepelnému ovlivnění povrchové vrstvy. [50]



Obrázek 22: Schéma technologie Laser MicroJet – vlastní, dle [50]

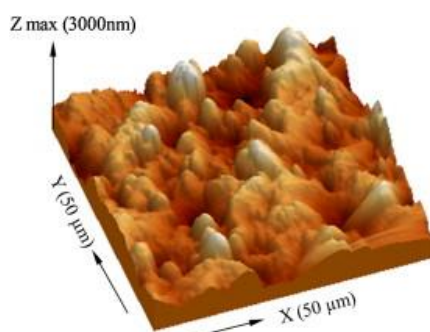
Tato technologie dokáže v mnoha aplikacích efektivně nahradit klasické suché laserové vrtání. Využívá se například při výrobě solárních článků, integrovaných obvodů a mnoho dalšího. Lze ho dobře využít i při již zmíněné výrobě vstřikovacích trysek v automobilovém průmyslu. Oproti suchému laseru má ještě jednu obrovskou výhodu, a to extrémně dlouhou řeznou vzdálenost. Suchý laser je omezen vzdáleností, na kterou dokáže přesně zaostřit. Zde díky vodnímu paprsku je možné vést laser na násobně větší vzdálenosti. [51]

Jako poslední uvedenou technologii stojí zmínit vrtání elektronovým paprskem. Tato technologie využívá kinetickou energii jednotlivých elektronů, které jsou ve formě paprsku vysílány na obrobek. V momentě dopadu elektronů na povrch obrobku se jejich kinetická energie mění na energii tepelnou. Materiál se postupně odtavuje a paprsek proniká hlouběji do obrobku. Vzniklá tepelná energie se koncentruje pod povrchem a zapříčiňuje erupční odpařování nataveného materiálu. Odpařující se částice se z otvoru pohybují obrovskou rychlostí a vzniklé páry jsou zoinizovány, přičemž v důsledku toho dochází k novému zaostření paprsku v pracovním místě. [52]

Co se týče využitelnosti elektronového paprsku, lze jím samozřejmě také obrábět těžkoobrobitelné materiály, jako jsou různé žárupevné oceli, austenitické oceli (při stavbě jaderných reaktorů), různé slitiny (zinku, titanu, wolframu apod.) nebo drahokamy. Hůře obrobitelné jsou naopak například mosaz, bronz, hořčík nebo slinované kovy. [52]

Všechny tyto metody mají oproti konvenčnímu vrtání několik společných výhod. Dokážou obrábět těžkoobrobitelné materiály a lze s nimi dosahovat opravdu malých průměrů děr. Jsou mnohem přesnější a může se s nimi dosáhnout i dobré kvality povrchu. Ovšem každá technologie má řadu výhod i nevýhod. V následujících řádcích si je rozebereme o něco podrobněji.

Jako první si rozebereme EDD. Co se týče dosažitelných parametrů, tak standardně se EDD využívá pro vrtání děr o průměru 0,5-1,5 mm s přesností $\pm 0,05$ mm. V extrémních případech lze dosáhnout až průměru 0,015 mm. Obrovskou výhodou této technologie oproti běžnému laseru je držení stabilního průměru a mnohem větší vrtané hloubky, které se u EDD pohybuje až kolem 300D. Co by nás ještě mohlo zajímat, tak je integrita povrchu po obrábění. Mikrostruktura povrchu po obrábění pomocí EDD se skládá z drobných kráterů o průměru 10–15 μm . Na obrázku 23 lze sledovat detailní strukturu povrchu, kdy je maximální vzdálenost mezi vrcholem a údolím kráterů cca 3 μm . Tento 3D model byl vyhotoven pomocí metody SHFM, která je relativně nepřesná, a proto skutečná hodnota R_{max} je cca 1,7 μm . [51]



Obrázek 23: Povrch po EDD [50]

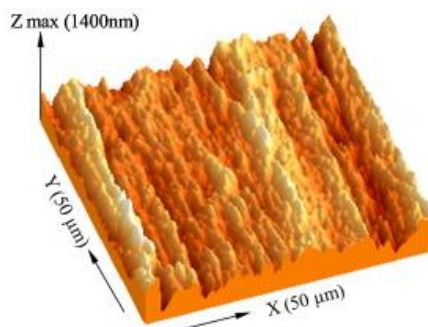
Mezi nevýhody EDD patří obvykle jako u všech EDM procesů dlouhý čas obrábění. Pro představu, ve studii (viz zdroj [51]) bylo provedeno vrtání pole děr 5x5 o průměru 0,18 mm a hloubce 0,3 mm. Čas celého cyklu byl 10 s. Na rozdíl od použití Laser MicroJet

byl čas delší téměř o 6 s. Další nevýhodou je nutno opět uvést obrábění pouze vodivých materiálů. [51]

Vrtání suchým laserem přináší mnoho úskalí. Jelikož se jedná o tepelný proces, vrtané díry touto technologií jsou často spojeny s různými geometrickými vadami, jako je například velikost otvoru, časté zúžení otvoru nebo kruhovitost. Ale mohou nastat i různé metalurgické vady, jako například rozstřík, tepelně ovlivněná oblast nebo mikrotrhliny. Všechny tyto vady záleží na použitých parametrech. Jak už jsem zmiňoval, v dnešní době je trendem používání vysokopulsních laserů, které disponují délkou pulsu až v řádech femtosekund. Použitím těchto pulsů lze eliminovat určitě rizika, kupříkladu tepelně ovlivněnou oblast. [49]

Dalším parametrem k posouzení může být vrtaná hloubka. Ta opět velmi závisí na zadaných parametrech laseru a vrtaném materiálu. Obecně platí, že s delšími dobami pulsů lze dosáhnout vyšších hloubek, ale za cenu zvýšené tvorby okují a vzniku dalších již zmíněných rizik. Běžně se ale podobně jako u řezání dosahuje hloubky 30–50 mm. Obecně laserem lze dosáhnout přesnosti na 1 μm a nejmenší vrtaný průměr je 0,025 mm. Co se týče výsledné kvality povrchu, při použití delších pulsů bude povrch členitější a pokryt okujemi. Na druhou stranu při použití vysokopulsních laserů bude povrch výrazně hladší a rovnoměrnější a lze dosáhnout hodnoty R_{max} až 0,8 μm . [53; 54; 55; 56]

Technologie Laser MicroJet z tohoto porovnání vychází o něco lépe. Standartní průměr trysky se vyrábí 25-120 μm . Průměr paprsku je pak cca o 15 % menší než průměr trysky. Stejně jako EDD má oproti suchému laseru výhodu v držení stabilního průměru a výrazně větší vrtané hloubce, kde se lze dostat až na hodnotu 1 000D. Oproti EDD je opracovaný povrch díky vodnímu paprsku mnohem hladší a méně tepelně ovlivněn (viz obrázek 24). Skutečná hodnota R_{max} se v tomto případě pohybovala kolem 0,8 μm . [51; 57]



Obrázek 24: Povrch po Laser MicroJet [50]

Obrábění elektronovým paprskem má několik režimů. Pro účely vrtání se využívá režim pulsní. Ten funguje na podobném principu jako laser. Doby pulsů se mohou pohybovat v rozmezí od 2 μs až do 0,01 s při frekvenci 500 až 10 000 Hz. Tímto způsobem lze vrtat díry od průměru 0,015 mm, a to do hloubky cca 100D. U těchto hlubokých vrtů musí být ale průměr paprsku dva až čtyřikrát menší než požadovaný průměr díry. Tolerance vyvrtané díry je potom 5-20 % jejího průměru. Oproti ostatním metodám vyniká obrovskou rychlostí. Lze dosahovat až 4 000 děr za sekundu. Ovšem nevýhoda tohoto procesu je obrábění pouze ve vakuu. Kvalita obrobeného povrchu se obecně špatně určuje. Ze studií vychází, že závisí na mnoha parametrech (doba pulsu, hloubka vrtání, ...). Nejlepší naměřený povrch se pohybuje kolem $R_a = 0,15 \mu\text{m}$. [52; 58; 59; 60]

9 Závěr

Má práce byla rozdělena na dva větší úseky. V první části jsem se zabýval popisem samotné technologie elektroerozivního obrábění. Začal jsem stručnou historií a dostal jsem se až po současné aplikace. Důkladně a pro čtenáře srozumitelně, jsem popsal veškeré prvky a parametry, které jsou pro funkci elektroerozivních strojů nezbytné. Bylo zmíněno i nejrůznější příslušenství, které se využívá v praxi a pomáhá zautomatizovat výrobní proces.

Elektroerozivní obrábění považuji za velice přínosnou technologii v dnešním průmyslu. Její hlavní předností je obrábění tvarově velice složitých ploch, a to i do velice tvrdých a špatně obrobitelných materiálů. Díky její univerzálnosti nachází uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích. Samozřejmě jsem zmiňoval i několik nevýhod, jako například časová náročnost této technologie. Ovšem pokrok jde stále kupředu a věřím, že díky neustálému vývoji se v budoucnu bude dosahovat jiných hodnot.

V druhé části mé práce jsem se rozhodl věnovat třem aplikacím elektroerozivního obrábění, které jsem srovnával s technologiemi v daném odvětví. Rozhodl jsem se mé srovnání koncipovat spíše na nekonvenčních metody obrábění. Výstupem této části jsou následující srovnávací tabulky.

	EDM	Plazma	Laser	Vodní paprsek
Přesnost	±0,002 mm	±0,5 mm	±0,05 mm	±0,025 mm
Řezaná tloušťka	cca 300 mm (defacto omezeno pouze osou Z stroje)	50 - 80 mm	cca do 30 mm (v závislosti na materiálu)	Většinou do 300 mm (lze i více)
Řezané materiály	Pouze elektricky vodivé	Převážně ocel a hliník (lze i ostatní s určitými omezeními)	Větší spektrum než plazmou (především ocel, nerez, hliník)	Téměř veškerý
Následné opracování	Většinou není nutné	Nutné (odstranění strusky a tepelně ovlivněné oblasti)	Většinou nutné (zoxidované hrany, tepelně ovlivněná oblast)	Není nutné
Nastavení stroje	Různé dle typu materiálu	Různé dle typu materiálu	Různé dle typu materiálu	Stejně pro většinu materiálů

Tabulka 3: Srovnání technologií řezání

V prvním srovnání jsem se zabýval řezacími technologiemi. Konkrétně tedy elektroerozivním drátovým řezáním, řezání plazmou, laserem a vodním paprskem. Z tabulky 3 vyplývá, že zajímavým konkurentem elektroerozivního drátového řezání

může být řezání vodním paprskem. EDM sice stále zůstává s přesností na prvním místě, ale bohužel je energeticky i časově velice náročná. Vodním paprskem lze dosáhnout srovnatelné přesnosti za mnohem kratší čas a také nejsme omezeni podmínkami elektricky vodivého řezaného materiálu jako u EDM. Dalším velkým plusem může být větší ekologie, na kterou je v dnešním průmyslu kladen stále větší důraz.

	SEDM	Tvrdé obrábění (HSC)
Přesnost (tolerance)	Skládání tolerancí, větší tepelně ovlivněná oblast	Přesnější, menší tepelně ovlivněná oblast (odvod tepla do třísky)
Doba obrábění	V závislosti na aplikaci - vždy časově náročný	Řádově rychlejší*
Obráběné materiály	Pouze elektricky vodivé materiály	Materiály okolo tvrdosti cca 60 HRC
Obráběné tvary	Téměř veškeré tvary, tenkostěné výrobky	Omezené (vnitřní ostré rohy, tenkostěné výrobky)
Hloubka obrábění	Teoreticky "neomezená" hloubka (omezení v ose Z stroje)	S hloubkou klesá přesnost
Automatizace	Více předvídatelný a automatizovatelný proces	Omezená

Tabulka 4: Srovnání technologií SEDM a HSC

V dalším srovnání jsem se věnoval elektroerozivnímu hloubení a dnešní velice progresivní technologii vysokorychlostního tvrdého obrábění. Standartní konvenční technologie většinou nejsou schopné obrábět tvrdé, kalené materiály. Ale díky neustálému pokroku v oblasti nástrojových materiálů, vývojem obráběcích center a neustálému zvyšování řezné rychlosti, jsme do jisté míry schopni tyto materiály obrobít i konvenčně. Z mého porovnání ale vychází lépe stále EDM. Samozřejmě je důležité si položit otázku, co potřebujeme vyrobit a co pro nás je momentálně výhodnější. Bohužel u HSC nelze odstranit omezení obrobení složitých vnitřních tvarů, ostrých rohů nebo omezení u hloubkového obrábění. EDM technologie jsou také mnohem lépe automatizovatelné a to je v dnešním průmyslu obrovská výhoda. Samozřejmě nelze vyloučit klasické omezení EDM, jako je rychlost obrábění a podmínka elektrické eroze.

*V tabulce 4 uvádím, že technologie tvrdého obrábění je řádově rychlejší než EDM. Abych byl přesný, je nutné podotknout, že tomu není tak vždycky. Výjimka nastává

například u obrábění žebrování. Zde se jedná spíše o hloubkové obrábění. U konvenčního obrábění je nutné použít více vyložený nástroj a obrábí se za vzniku malých třísek. V tomto případě bude rychlejší EDM, u kterého se může využít vyšších pracovních proudů. Sice na úkor přesnosti, ale u tohoto typu výrobku je to zcela zanedbatelné.

Třetí nejvyžívanější EDM technologie je elektroerozivní vrtání. Klasickým oponentem by mohlo být vrtání laserem. Při hledání informací jsem narazil na hybridní technologii, která kombinuje laserový a vodní paprsek. Tato technologie mne velice zaujala, a ačkoliv není tolik v praxi využívána, rozhodl jsem se ji do mého srovnání zařadit. Pro úplnost jsem ještě doplnil technologii obrábění elektronovým paprskem, která svou pozoruhodností stála za zmínku.

V tabulce 5 můžeme sledovat relativní převahu již zmíněné hybridní technologie Laser MicroJet. Díky stabilizaci laseru vodním paprskem dokážeme s mnohem větší přesností a rychlostí vyvrtat miniaturní otvory i do větších hloubek. Výsledný povrch je přívětivější pro technologii Laser MicroJet, ale v určitých případech i pro suchý laser (u malých průměrů). U technologie Laser MicroJet je díky vodnímu paprsku řez ihned ochlazován, zabraňuje se většímu tepelnému ovlivnění povrchové vrstvy a také jsou nečistoty rovnou odstraňovány. Jako další výhodu lze uvést širší spektrum obrobitelných materiálů.

	EDD	Suchý laser	Laser MicroJet	Elektronový paprsek
Vrtaný průměr	od 0,015 mm	od 0,025 mm	od 0,02 mm	od 0,015 mm
Přesnost	±0,05 mm	±0,001 mm	±0,0015 mm	5 - 20 % průměru díry
Hloubka	až 300D	30 - 50 mm (v závislosti na materiálu)	až 1000D	až 100D
Struktura	Drobné krátery, nepravidelná	V závislosti na době pulsu (pravidelná i nepravidelná)	Pravidelnější, přímočará	Pravidelnější, přímočará
Kvalita povrchu	R _{max} = 1,7 μm	R _{max} = 0,8 μm (femtolasery)	R _{max} = 0,8 μm	R _a = 0,15 μm
Obráběné materiály	Pouze elektricky vodivé materiály	Široké spektrum (diamanty, tvrdokovy, kompozity, keramika, ...)	Široké spektrum (diamanty, tvrdokovy, kompozity, keramika, ...)	Většina těžkoobrobitelných materiálů (především kovy)

Tabulka 5: Srovnání technologií EDD, Suchý laser, Laser MicroJet, Elektronový paprsek

Úplným závěrem lze tedy konstatovat, že elektroerozivní obrábění se stále jeví jako jedna z nejpřesnějších technologií a mnohdy jen obtížně nalézáme přímého konkurenta. Ovšem díky neustálému vývoji a technologickému pokroku vznikají nové a nové obráběcí metody, které by mohly EDM v některých aplikacích nahradit. Na druhou stranu se i EDM neustále vyvíjí. Já však věřím, že se i nadále bude řadit mezi nejpřesnější ty technologie.

10 Bibliografie

- [1] POSLUŠNÝ, Petr. Elektroerozivní obrábění. *Průmyslové spektrum* [online]. 2006. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-obrabeni>
- [2] Elektrojiskrové obrábění. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrojiskrov%C3%A9_obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD
- [3] MATUŠKA, Karel. *Elektroerozivní obrábění* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79860/F2-BP-2018-Matuska-Karel-Elektroerozivni%20obrabeni.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [4] Leyden jar. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Leyden_jar
- [5] KUCHARÍK, Milan. *Drátové elektroerozivní obrábění při výrobě přesných střížných nástrojů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6335. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [6] ALLAIN, Rhett. Let's Geek Out on the Physics of Leyden Jars. In: *WIRED* [online]. 2017 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.wired.com/2017/01/the-physics-of-leyden-jars/>
- [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”. *The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)* [online]. 2013, , 5-12. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827113000759>
- [8] Electrical discharge machining. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_discharge_machining
- [9] JAROSLAV, Ěasa a Kerečaninová ZUZANA. Nekonvenční metody obrábění. *Průmyslové spektrum* [online]. 2007. Dostupné také z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni>

- [10] O que é usinagem por descarga elétrica e como funciona?. In: *FERRAMENTAL* [online]. 2020 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.revistaferramental.com.br/?cod=artigo/que-usinagem-por-descarga-eletrica-como-funciona/>
- [11] Elektroerozivní obrábění: Základní pojmy. *ELUC* [online]. 2021 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1399>
- [12] WOODS, Susan. Gap guidance. *Cutting tool engineering* [online]. 2013 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.ctemag.com/news/articles/gap-guidance>
- [13] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění: Skripta FS ČVUT*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989.
- [14] KALENDA, Jan. *Elektroerozivní obrábění při výrobě tvarových dutin* [online]. Brno, 2009 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16773. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] BÍLEK, Jiří. *Nové trendy v oblasti elektroerozivního obrábění* [online]. Zlín, 2017 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/40809/b%3adlek_2017_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [16] COTEAȚă, Margareta, Alexandru FLOCA, Oana DODUN, Nicolae IONESCU, Gheorghe NAGIȚ a Laurențiu SLĂTINEANU. Pulse Generator for Obtaining Surfaces of Small Dimensions by Electrical Discharge Machining. *Procedia CIRP*. 2016, **42**, 715-720. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.307>
- [17] HOLUB, Gustav. Přímé lineární motory – ano, či ne?. *ELEKTRO - časopis pro elektrotechniku* [online]. 2011, (3), 55 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/prime-linearni-motory-ano-ci-ne--9986>
- [18] JAKEŠ, Jan. *Trendy použití elektroerozivních technologií* [online]. Brno, 2008 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30306171.pdf>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [19] FANUC ROBOCUT: VYSOKORYCHLOSTNÍ ELEKTROEROZIVNÍ DRÁTOVÉ ŘEZAČKY. *PENTA Trading* [online]. 2021 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://www.penta-edm.cz/dokumenty/pouzite_stroje/katalog_fanuc_c_cz.pdf

- [20] Unikátní řešení pro elektroerozivní řezání. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2011, (4) [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/unikatni-reseni-pro-elektroerozivni-rezani>
- [21] FANUC α -1iC. *PENTA Trading* [online]. 2021 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://www.penta-edm.cz/dokumenty/pouzite_stroje/fanuc_1ic.pdf
- [22] KOVÁŘ, Petr. *Elektroerozivní obrábění* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/71814/KOV405_FS_B2341_2303R002_2009.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- [23] ŠEDO, Václav. *Výroba pertlovací matice s pomocí elektroerozivního obrábění* [online]. Brno, 2016 [cit. 2021-06-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=126471. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [24] UHLMANN, Eckart, Tassilo-Maria SCHIMMELPFENNIG, Ivan PERFILOV, Jan STRECKENBACH a Luiz SCHWEITZER. Comparative Analysis of Dry-EDM and Conventional EDM for the Manufacturing of Micro Holes in Si₃N₄-TiN. *Procedia CIRP*. 2016, **42**, 173-178. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.214>
- [25] LIQING, L. a S. YINGJIE. Study of Dry EDM with Oxygen-Mixed and Cryogenic Cooling Approaches. *Procedia CIRP*. 2013, **6**, 344-350. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.055>
- [26] DEVARAJAN, Ramasamy a S. MAHENDRAN. MICRO-EDM: OVERVIEW AND RECENT DEVELOPMENTS.: Dry EDM working principle. In: *ResearchGate* [online]. 2021 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Dry-EDM-working-principle_fig1_268262553
- [27] EL-HOFY, Hassan Abdel-Gawad. *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. ISBN 978-1-4665-7702-2.
- [28] THOMPSON, Joe. Die-sink EDM forms complex parts: Erosion by spark creates cavities, fine finishes. *CANADIAN METALWORKING* [online]. 2020 [cit. 2021-06-19]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/metalworking/die-sink-edm-forms-complex-parts>

- [29] Grafitové elektrody. In: *INVO CZECH* [online]. 2021 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.invocz.cz/vyrobky-z-cnc-stroju/grafitove-elektrody>
- [30] SEDLÁČEK, Jiří. *Drátové elektroerozivní řezání při výrobě nástrojů na dřevo* [online]. Brno, 2008 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7468. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [31] Wire Cutting Services. In: *ExportersIndia.com* [online]. 2021 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.exportersindia.com/jasraj-multitech-cnc-company5760315/wire-cutting-services-4432762.htm>
- [32] KAMASHIAN, Andy. Principles of Hole Drilling EDM. In: *Southern Fabsales* [online]. 2019 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.southernfabsales.com/blog/principles-of-hole-drilling-edm>
- [33] SINGH, A., P. PATOWARI a M. CHANDRASEKARAN. *Experimental study on drilling micro-hole through micro-EDM and optimization of multiple performance characteristics* [online]. 2020 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-020-02595-w>
- [34] EDM drilling. In: *TANSO* [online]. 2021 [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <http://www.tanso.se/en/edm/edm-drilling/>
- [35] RICHARD, J. a R. DEMELLAYER. Micro-EDM-milling Development of New Machining Technology for Micro-machining. *The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)* [online]. 2013, , 292-296 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827113000978>
- [36] HAN, F., Y. WANG a M. ZHOU. High-speed EDM milling with moving electric arcs. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2009, , 20-24 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695508001727>
- [37] OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění* [online]. Brno, 2012 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <http://opus.fme.vutbr.cz/dokumenty/moduly/Osicka.pdf>. Vzdělávací a tréninkový modul. Vysoké učení technické v Brně.

- [38] SVOBODA, Rostislav. *Elektroerozivní drátové řezání: Poznejte princip EDM strojů* [online]. 2015 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/elektroerozivni-dratove-rezani-poznejte-princip-edm-stroju/>
- [39] DLABAJA, Zdeněk. *Využití technologie elektrojiskrového obrábění* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30293543.pdf>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [40] Obrábění plazmou. *Technickyportal.cz* [online]. 2015 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/obrabeni-plazmou_29259.html
- [41] Základní rozdělení laserového řezání. *LASCAM* [online]. 2017 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/zakladni-rozdeleni-laseroveho-rezani/>
- [42] Princip řezání vodním paprskem. *MM Vodní paprsek* [online]. 2021 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <http://www.rezani-cnc.cz/princip-rezani-vodnim-paprskem.html>
- [43] Srovnání řezání. *Flow: Shape technologies group* [online]. 2021 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Srovnacni-Rezani.aspx#waterjet>
- [44] HÝBL, Pavel. *Drsnost povrchu při frézování nakloněným nástrojem* [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/81260/HYB028_FS_N2301_2303T002_2010.pdf?sequence=1. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- [45] BUKÁČEK, Zdeněk. *Technologie obrábění tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu* [online]. Brno, 2009 [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18708. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [46] OETTLE, Matthias. *Tvrde frézování v oblasti nástrojů a forem* [online]. 2005, (4), - [cit. 2021-06-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tvrde-frezovani-v-oblasti-nastroju-a-forem>
- [47] ZELINSKI, Peter. EDM vs. Milling In Die/Mold Machining. *Modern Machine Shop* [online]. 2000 [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/edm-vs-milling-in-diemold-machining>
- [48] Laserové vrtání. *LINTECH* [online]. 2021 [cit. 2021-06-07]. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/laserove-vrtani>

- [49] NATH, A.K. *9.06 - Laser Drilling of Metallic and Nonmetallic Substrates*. Oxford: Elsevier, 2014, s. 115-175. ISBN 978-0-08-096533-8. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00904-3>
- [50] Technologie Laser MicroJet. *SYNOVA* [online]. 2021 [cit. 2021-06-08]. Dostupné z: <https://www.synova.ch/technology/laser-microjet.html>
- [51] RASHED, C.A.A., L. ROMOLI, F. TANTUSSI, F. FUSO, M. BURGNER, G. CUSANELLI, M. ALLEGRINI a G. DINI. Water jet guided laser as an alternative to EDM for micro-drilling of fuel injector nozzles: A comparison of machined surfaces: A comparison of machined surfaces. *Journal of Manufacturing Processes*. 2013, **15**(4), 524-532. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.08.002>
- [52] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění - 6. díl: Obrábění paprskem elektronů. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2008, (6), - [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-2>
- [53] VIDEOUKÁZKA: PRECIZNÍ LASEROVÉ VRTÁNÍ. *LINTECH* [online]. 2020 [cit. 2021-06-20]. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/novinky/videoukazka-laserove-vrtani>
- [54] Lasery pro vrtání. *LASCAM: Laserové a optické technologie pro průmysl a vědu* [online]. 2016 [cit. 2021-06-20]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/lasery-pro-vrtani/>
- [55] ROMOLI, L., C.A.A. RASHED a M. FIASCHI. Experimental characterization of the inner surface in micro-drilling of spray holes: A comparison between ultrashort pulsed laser and EDM: A comparison between ultrashort pulsed laser and EDM. *Optics & Laser Technology*. 2014, **56**, 35-42. ISSN 0030-3992. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.07.010>
- [56] Obrábění laserem. *ELUC* [online]. 2021 [cit. 2021-06-20]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1423>
- [57] SUCHÁNEK, Libor. *Nekonenční metody obrábění při výrobě malých otvorů* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2021-06-08]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/14114/1/Bakalarska%20prace_Libor%20Suchanek\(2013-2014\).pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/14114/1/Bakalarska%20prace_Libor%20Suchanek(2013-2014).pdf). Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [58] Obrábění elektronovým paprskem. *ELUC* [online]. 2021 [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1421>

- [59] GALATI, Manuela, Paolo MINETOLA a Giovanni RIZZA. Surface Roughness Characterisation and Analysis of the Electron Beam Melting (EBM) Process. *Materials*. 2019, **12**, 2211. Dostupné z: doi:10.3390/ma12132211
- [60] PRIARONE, Paolo, Suela RUFFA, Joel BEDOLLA a Luca SETTINERI. A DoE Approach to Hole Quality Evaluation in Drilling of an Electron Beam Melted Titanium Aluminide. *Procedia CIRP*. 2013, **8**, 481-486. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.137>

11 Seznam obrázků

Obrázek 1: Leydenská nádoba [6]	10
Obrázek 2: Priestleyho kruhy [5].....	10
Obrázek 3: Základní princip EDM [10].....	12
Obrázek 4: Jednotlivé fáze výboje [3]	13
Obrázek 5: Jednotlivé druhy impulsů – vlastní, dle [5].....	18
Obrázek 6: Zapojení závislého generátoru – vlastní, dle [15]	18
Obrázek 7: Zapojení rotačního generátoru – vlastní, dle [13]	20
Obrázek 8: Zapojení tranzistorového generátoru – vlastní, dle [13]	20
Obrázek 9: Žíhací princip navlékání drátu – vlastní, dle [19]	22
Obrázek 10: Metody vyplachování – vlastní, dle [13; 23]	25
Obrázek 11: Princip „Dry EDM“ – vlastní, dle [26]	26
Obrázek 12: Závislost drsnosti povrchu na době impulsu – vlastní, dle [27].....	28
Obrázek 13: Jednotlivé vrstvy povrchu po obrábění – vlastní, dle [13].....	29
Obrázek 14: Grafitové elektrody [29].....	31
Obrázek 15: Elektroerozivní drátové řezání [30]	32
Obrázek 16: Ukázka řezání drátovou elektrodou [31].....	33
Obrázek 17: Elektroerozivní vrtání [32].....	34
Obrázek 18: Elektrody pro EDM vrtání [34].....	34
Obrázek 19: Schéma elektrokontaktního obrábění – vlastní, dle [13].....	37
Obrázek 20: Srovnání řezacích technologií [43]	45
Obrázek 21: Rozsah řezných rychlostí [43].....	46
Obrázek 22: Schéma technologie Laser MicroJet – vlastní, dle [49]	50
Obrázek 23: Povrch po EDD [49].....	51
Obrázek 24: Povrch po Laser MicroJet [49].....	53

12 Seznam tabulek

Tabulka 1: Dosahované kvalitativní parametry	28
Tabulka 2: Technologické srovnání EDM s konvenčními metodami	39
Tabulka 3: Srovnání technologií řezání	54
Tabulka 4: Srovnání technologií SEDM a HSC	55
Tabulka 5: Srovnání technologií EDD a Laser MicroJet.....	56

13 Seznam použitých zkratek a symbolů

ABS	Akrylonitril Butadien Styren (termoplastický polymer)
CNC	Computer numeric control (číslicově řízený stroj)
EDAG	Electrical discharge abrasive grinding
EDD	Electrical discharge drilling
EDG	Electrical discharge grinding
EDM	Electrical discharge machining
EDT	Electrical discharge texturing
GAP	Mezielektroková vzdálenost
HSC	High Speed Cutting
Ra	Průměrná odchylka povrchu
RC	Elektrický obvod složený z odporu R a kondenzátoru C
RLC	Elektrický obvod složený z odporu R, cívky L a kondenzátoru C
Rmax	Maximální odchylka povrchu
SEDM	Sinking electrical discharge machining
SHFM	Shear Force Microscopy (Mikroskopie smykového tření)
WEDM	Wire electrical discharge machining
C	Kapacita kondenzátoru
f	Frekvence
i_p	Pracovní proud
K	Konstanta úměrnosti
q	Časové využití periody impulsu
Q_v	Přibližná produktivita obráběcího procesu
T	Perioda
t_i	Celková doba impulsů
t_p	Doba trvání impulsu
U_C	Průrazné napětí (lze definovat jako $0,8U_0$)
V_n	Objemové opotřebení nástroje
V_O	Odebraný objem materiálu obrobku
α	Součinitel teplotní délkové roztažnosti
γ	Relativní objemové opotřebení
δ	Odchylka výsledného obrobku od požadovaného tvaru

Δ	Změna
η	Účinnost
μ	Předpona „mikro“