

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A

METROLOGIE



Výběr optimálního materiálu grafitových elektrod
pro EDM

Bakalářská práce

Autor: Bartoloměj Kubát

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

Praha, 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kubát** Jméno: **Bartoloměj** Osobní číslo: **491731**
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:

Výběr optimálního materiálu grafitových elektrod pro EDM

Název bakalářské práce anglicky:

Selection of optimal graphite electrode material for EDM

Pokyny pro vypracování:

1. Analýza současného stavu.
2. Návrh metodiky testu.
3. Vyhodnocení testu.

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 druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

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

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústav/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 svoji bakalářskou práci na téma: Výběr optimálního materiálu grafitových elektrod pro EDM vypracoval samostatně a použil jsem pouze uvedené prameny.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu, Ing. Pavlovi Novákovi, Ph.D. za pomoc a odborné rady, které mi při vypracování poskytoval. Dále patří mé velké díky panu Josefu Zachovi, který stál za první myšlenkou testování grafitu ve firmě a po celou dobu mi poskytoval cenné rady. Nakonec i celé firmě Zach nástrojárna s.r.o., díky které jsem měl možnost celý experiment realizovat. Jiřímu Michálkovi za pomoc při EDM hloubení, Martinovi Jandovi při měření na CMM a Milanovi Mikešovi a Jakubovi Hamerníkovi při výrobě elektrod.

Anotace

Tato bakalářská práce v teoretické části podává základní přehled o EDM obrábění s bližším zaměřením na materiál nástrojových elektrod. V praktické části byly porovnány různé druhy grafitových elektrod. Cílem experimentu bylo na základě výsledku zátěžového testu stanovit optimální materiál pro potřeby EDM hloubení ve firmě Zach nástrojárna s.r.o.

Klíčová slova

EDM, grafit, elektroda, opotřebení, HK-75, R8710, EDM 1, HK-15, R8510, EDM 180.

Annotation

This thesis provides a basic overview of EDM machining with a closer focus on the material of tool electrodes. In the practical part, different types of graphite electrodes were compared. The aim of the experiment was to determine the optimal graphite material for the needs of EDM die sinking at the company Zach nástrojárna s.r.o., based on the result of the test.

Key words

EDM, graphite, electrode, wear ratio, HK-75, R8710, EDM 1, HK-15, R8510, EDM 180.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Elektroerozivní obrábění.....	11
2.1	Princip EDM	11
2.1.1	Fáze elektroerozivního výboje.....	12
2.2	Vlastnosti povrchové vrstvy po EDM	15
2.2.1	Drsnost povrchu po EDM obrábění.....	16
2.3	Druhy EDM technologií	17
2.3.1	EDM hloubení (Sinking Electrical Discharge Machining).....	17
2.3.2	EDM drátové řezání (Wire Electrical Discharge Machining)	19
2.3.3	EDM vrtání (Electric Discharge Drilling)	21
3	Materiály nástrojových elektrod	22
3.1	Požadované vlastnosti nástrojových elektrod	23
3.2	Měď	24
3.3	Grafit.....	25
3.4	Mosaz	26
3.5	Wolfram.....	27
3.6	Měď-Wolfram (CuW).....	27
3.7	Stříbro	28
3.8	Hliník.....	28
4	Výběr optimálního materiálu grafitových elektrod pro EDM	29
4.1	Postup experimentu	30
4.2	Vybraní zástupci grafitu.....	31
4.2.1	Typické vlastnosti vybraných grafitů.....	32

4.2.2	Přiřazení grafitových materiálů k upínačům.....	32
4.3	Vzorková deska	33
4.4	Pokusná elektroda.....	34
4.5	Upínací systém elektrod 3R	35
4.6	Zkoumané parametry	36
4.7	Způsob vyhodnocení na souřadnicovém měřícím stroji	37
4.8	Způsob vyhodnocení na optickém měřícím stroji.....	38
4.9	Nastavení generátoru elektroerozivního hloubícího stroje	39
4.10	Stroje použité v experimentu.....	40
4.11	Nezrealizované části experimentu	41
4.12	Orientační ceny grafitu	41
5	Výsledky měření	41
5.1	Strojní časy jednotlivých elektrod	41
5.2	Rozměrové vyhodnocení jednotlivých typů grafitů	43
5.2.1	Grafit HK-75	43
5.2.2	Grafit R8710.....	44
5.2.3	Grafit EDM 1	46
5.2.4	Grafit HK-15	47
5.2.5	Grafit R8510.....	49
5.2.6	Grafit EDM 180	50
5.3	Souhrn naměřených dat a grafy.....	52
6	Shrnutí experimentální části	55

7	Závěr	56
8	Bibliografie	58
9	Seznam obrázků	62
10	Seznam tabulek	63

1 Úvod

Elektroerozivní obrábění, také EDM (z angl. Electric Discharge Machining) je technologie obrábění spadající do skupiny tzv. nekonvenčních metod obrábění. Nekonenční metody mají uplatnění zejména u materiálů, které mají vysokou tvrdost, houževnatost, nebo vysokou geometrickou náročnost. Tyto technologie obrábění mohou poskytovat řadu výhod oproti konvenčnímu obrábění, jako například lepší kvalitu povrchu, delší životnost nástroje, vyšší přesnost, nebo lepší produktivitu. Elektroerozivní obrábění se nejvíce používá při obrábění obrobků z těžko obrobitelných materiálů s vysokými geometrickými a tvarovými požadavky. Hlavním omezením této technologie je dostatečná elektrická vodivost obráběného materiálu. [1]

Firma Zach nástrojárna s.r.o. se specializuje na výrobu forem pro vstřikování plastů a tlakové lití slitin hliníku a zinku. Součástí těchto forem jsou tvarové části (vločky a jádra), které jsou zhotoveny ze zakalené nástrojové oceli. Pro výrobu tvarových dutin vložek není možné pomocí klasického třískové obrábění vytvořit ostré hrany, nebo hluboké tenké otvory, které dodavatel často požaduje. Kvůli těmto technologickým požadavkům firma často využívá EDM obrábění.

V teoretické části této práce se budu zabývat hlavními charakteristikami EDM obrábění a jeho aplikacemi s bližším zaměřením na materiál elektrod. Nicméně, hlavním cílem praktické části je návrh optimalizace elektroerozivního hloubení při výrobě tvarových dutin forem ve firmě Zach nástrojárna s.r.o. Tato optimalizace bude vycházet z výsledků experimentu. Experiment je založen na porovnání různých druhů grafitů. Na základě těchto výsledků bude vybrán nejvhodnější grafitový materiál elektrod, popřípadě jejich kombinace pro následné použití v podniku. Ve výsledku by měla práce rozšířit know-how firmy v oblasti elektroerozivního hloubení. To s sebou

může přinést zvýšení produktivity a kvality výroby společně se snížením výrobních nákladů.

2 Elektroerozivní obrábění

Jak jsem již avizoval v úvodu, elektroerozivní obrábění, též elektrojiskrové obrábění patří do skupiny nekonvenčních metod obrábění. Konkrétně se jedná o jeho nejrozšířenější podskupinu. Od klasického obrábění se liší tím, že odebírání materiálu není založeno na mechanickém procesu, nýbrž na procesu elektro-tepelném. Velmi zjednodušeně lze princip vysvětlit tak, že při vzájemném přiblížení obrobku a elektrody (na kterou je přivedeno elektrické napětí), dojde k elektrickému výboji. Dojde k odtavení mikročástic na obou elektrodách, které se následně odplaví pomocí dielektrika, ve které se obrobek i elektroda nachází. Opakováním tohoto procesu dochází k samotnému obrábění, nebo dělení materiálu. Podrobněji se tomuto procesu věnuji v další kapitole. Největším benefitem této metody je fakt, že ji můžeme použít tam, kde jiné selhávají. Zejména v případech problematicky obrobitelných materiálů, složitých geometrických tvarů, přísných rozměrových požadavků, nebo vysoké kvality povrchu. Další zajímavostí EDM obrábění je, že obrobitelnost materiálu nezáleží na jeho tvrdosti, nebo houževnatosti, nýbrž na jeho elektrické vodivosti. Čím větší má materiál elektrickou vodivost, tím se bude na EDM strojích lépe opracovávat. Ačkoliv je elektroerozivní obrábění veřejnosti relativně cizí, jeho uplatnění je podepsáno pod širokou škálou výrobků. Nejčastěji se využívá na výrobu střižných nástrojů, lisovacích nástrojů, nebo vstřikovacích forem, a tak se nepřímou schovává za produkty všeho druhu. Od dílu pro automotive, až po běžné výrobky, se kterými se setkáváme každý den. [2] [1] [3]

2.1 Princip EDM

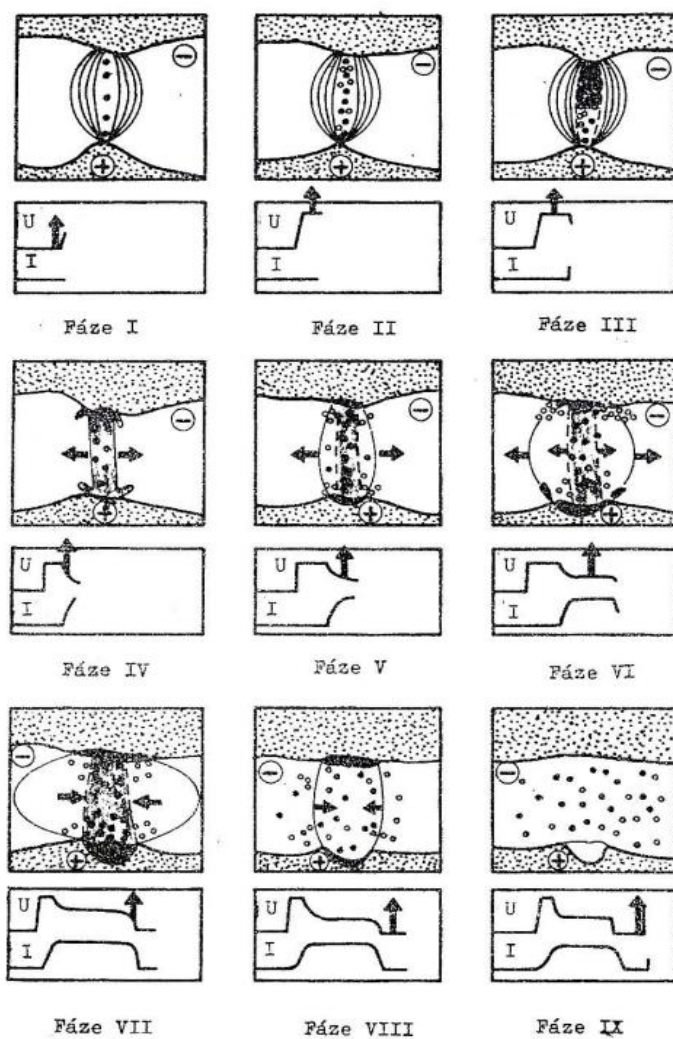
K odebírání materiálu dochází vlivem rychle se opakujících elektrických výbojů, které jsou rozloženy po celé ploše obráběné plochy. Obrábění probíhá mezi dvěma

elektrodami, které jsou vzdáleny o jiskrovou mezeru, které je známá pod zkratkou GAP a je jedním z hlavních parametrů při elektroerozivním hloubení. Její velikost se pohybuje od 0,01 do 0,4 mm. Pro celý proces obrábění je důležité, aby byly obě elektrody ponořené v dielektriku. Dielektrikum je kapalina s vysokým elektrickým odporem, nejčastěji se jedná o speciální oleje nebo destilovanou vodu. Je to pracovní médium, které zajišťuje bezproblémový průběh. K erozi dochází na jedné elektrodě mnohem více než na té druhé. Cílem je tak dosáhnout co největšího úbytku na straně obráběného materiálu a zároveň co nejmenšího na elektrodě nástroje. Podíl úbytku lze ovlivnit materiálem nástroje, obráběným materiálem a pracovní kapalinou – dielektrikem. [2] [4]

Ke vzniku výboje dojde po přivedení napětí na elektrody v místě s největším elektrickým napěťovým polem. Vlivem působení napěťového pole dochází k pohybu volných záporných a kladných iontů. Začnou zrychlovat a dosahují vysokých rychlostí. Tento fakt zapříčiní vznik vodivého ionizovaného kanálu. V tento moment dochází právě k výboji a začne téct proud. Vznikne plazmové pásmo, kde se teploty pohybují v rozmezí od 3000 do 12000 °C. Tyto výboje způsobí tavení a odpařování materiálu na obou elektrodách. Po přerušení přívodu napětí klesne teplota a postupným ochlazením odtavený materiál tuhne. Elektrický výboj mezi elektrodami je ovlivněn vzdáleností elektrody nástroje a obrobku (GAP), hodnotou napětí a vodivostí kapaliny. Nastavením těchto parametrů tak můžeme pozitivně, a někdy i negativně ovlivňovat proces elektrojiskrového obrábění. [5] [6]

2.1.1 Fáze elektroerozivního výboje

Elektroerozivní stroje používají jako zdroj napětí polovodičové generátory, které řídí průběh elektroeroze. Samotný proces můžeme následně rozdělit do devíti fází, které jsou zobrazeny na obrázku 1 a jsou podrobněji popsány v této kapitole: [5]



Obrázek 1 Jednotlivé fáze elektroeroze [5]

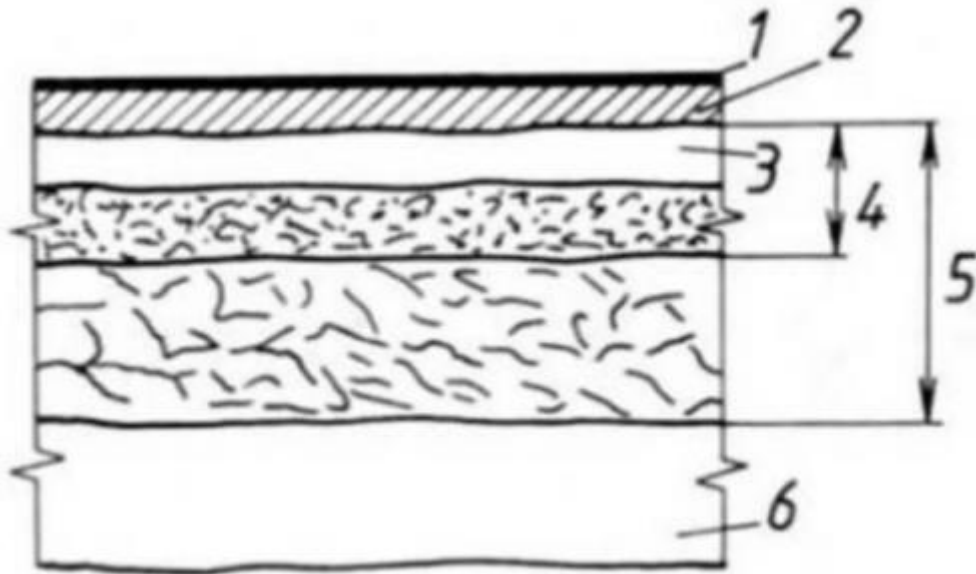
- Fáze I. – po přivedení napětí na elektrody se začne vytvářet elektrické napěťové pole. V místě nejmenší vzdálenosti elektrod, které je způsobeno nepřesností a nerovností povrchu se vytvoří maximální gradient, do kterého se přeskupí elektricky vodivé částice.
- Fáze II. – Přivedené napětí dosahuje maximální hodnoty. Elektricky vodivé částice vytvoří základ pro náboj pomocí můstků.

- Fáze III. – Ze záporně nabitých elektrod (katod) se vlivem působení elektrického pole začnou uvolňovat elektrony. Díky tomu, že jsou urychlovány se srážejí s neutrálními částicemi a vznikají tak kladné a záporné ionty. Tento jev se nazývá jako ionizace prostředí.
- Fáze IV. – Vzniklé ionty se uskupí okolo vzniklého výbojového kanálu, ve kterém klesne odpor. V tomto prostoru začne postupně téct proud a z plazmy se vytvoří vodivý kanál. Roste proudová hustota a teplota na povrchu elektrod a napětí klesá.
- Fáze V. – Dielektrikum se začne odpařovat, což způsobí vznik plynové bubliny. Důsledkem narážení elektronů na anodu a katodu se uvolní značné množství energie a teplota vzroste až na 12000°C. Dojde k tavení obou elektrod. Proud dosáhl své maximální hodnoty a napětí se ustálilo na tzv. zápalné hodnotě výboje.
- Fáze VI. – V této fázi dochází k expanzi bublin. Materiál se taví a odpařuje.
- Fáze VII. – Přerušením přívodu energie dojde k poklesu proudu, což zapříčiní snížení teploty. Pokles teploty vyvolá implozi plynové bubliny. Dochází k rozrušování materiálu na povrchu obou elektrod. Vzhledem k působení sil elektrického pole a sníženým tlakem plynů je tavenina vyhnána do prostoru a vznikne kráter.
- Fáze VIII. – Kleslo napětí i proud na nulovou hodnotu, tím zaniká výboj i bublina. Do vzniklého kráteru se vplaví dielektrikum, které ho vyplachuje a ochlazuje. Vyplavený materiál zůstává v dielektriku v podobě drobných kuliček, které mají řádově objem 10^{-3} až 10^{-6} mm³.
- Fáze IX. – Tato poslední fáze popisuje situace před následujícím výbojem. Jako základ pro další nový výboj slouží zbývající volné ionty, které se nacházejí v dielektriku. Tento proces se následně několikrát opakuje.

[5]

2.2 Vlastnosti povrchové vrstvy po EDM

Jakmile se vlije čerstvé dielektrikum do místa výboje, tak nejenže vyplaví roztavený vyvržený materiál, ale zároveň zakalí materiál, který byl roztaven, ale nedošlo k jeho vyplavení. To má za následek vznik bílé vrstvy a dalších tepelně ovlivněných zón, které jsou zobrazeny na Obrázek 2 Tepelně ovlivněné vrstvy..



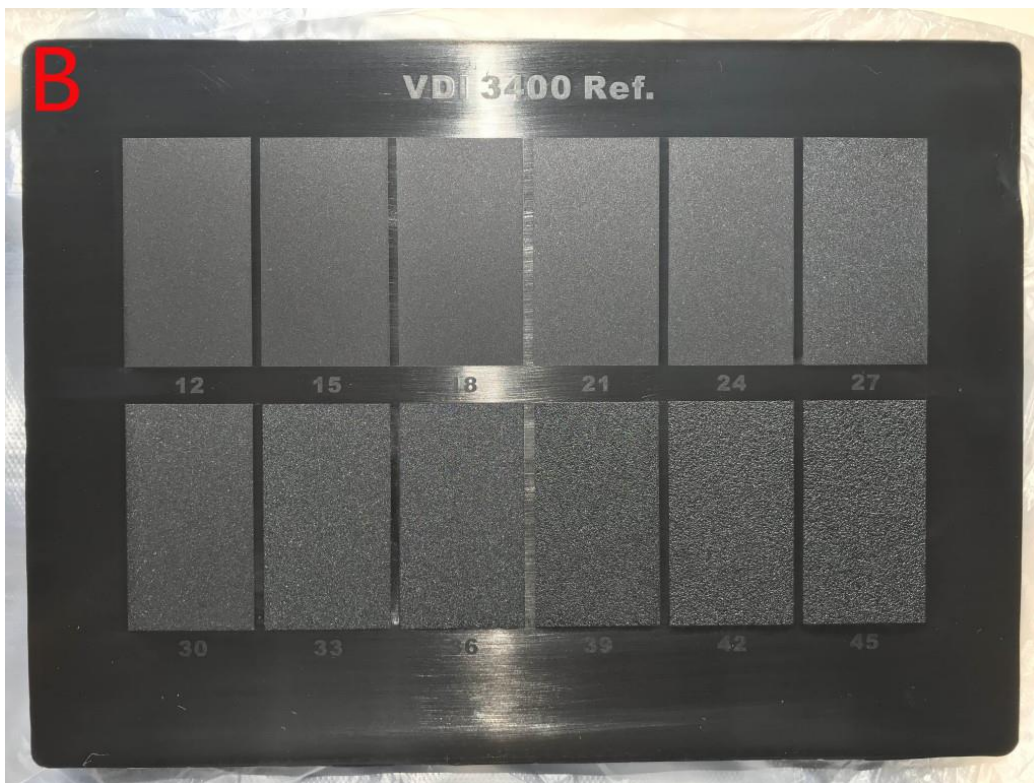
Obrázek 2 Tepelně ovlivněné vrstvy. [7]

- 1- Mikrovrstva, která je tvořena prvky a chemickými sloučeninami, které vznikly difuzí prvků dielektrika.
- 2- Vrstva, která obsahuje stopy prvků nástrojové elektrody.
- 3- Bílá vrstva, která byla silně nauhličena a následně zakalená. Má martenzitickou strukturu a sílu 1-40 μm . Negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti součásti.
- 4- Tepelně ovlivněná vrstva (zakalený a popuštěný materiál obrobku).
- 5- Pásmo plastické deformace vyvolané rázy pulzů.
- 6- Základní materiál.

[7] [5]

2.2.1 Drsnost povrchu po EDM obrábění

Vyhodnocování drsnosti povrchu po EDM hloubení je odlišné od vyhodnocování kvality povrchu třískovým obráběním. Konvenční obrábění za sebou zanechává stopy nástroje, kdežto po EDM obrábění zůstávají krátery vzniklé výboji. Charakter kráterů je dán, několika hledisky. Především závisí na velikosti proudu, délce pulzů a na frekvenci pulzů. Obecně platí, že nižší proud a kratší doba pulzů o větší frekvenci vede ke kvalitnějším povrchům a naopak. Tento fakt má za následek vysoké opotřebení nástrojové elektrody a pomalý úběr materiálu. K tomu abychom byli schopni porovnat povrchy po EDM obrábění a konvenčním slouží převodní tabulka č.1, která se řídí normou. Konkrétně jde o normu VDI3400, která se mimochodem používá například pro povrchy vzniklé po tryskání, neboť také vytváří krátery. Pro určení hodnoty VDI se používá vzorkový etalon viz Obrázek 3. Hodnota VDI lze následně převést na parametr Ra popřípadě Rz pomocí převodní tabulky. [8]



Obrázek 3 Etalon drsností podle normy VDI3400 [8]

Tabulka 1 Převodní tabulka mezi VDI3400 a Ra [9]

VDI3400	Ra[μm]	Rz[μm]
12	0,4	1,5
15	0,56	2,4
18	0,8	3,3
21	0,8	3,3
24	1,6	6,5
27	2,24	10,5
30	3,15	12,5
33	4,5	17,5
36	6,3	24
39	9	34
42	12,5	48
45	18	69

2.3 Druhy EDM technologií

Druhy elektroerozivních technologií můžeme rozdělit do několika technologických podskupin. Mezi hlavní patří EDM hloubení, EDM řezání a EDM vrtání. Dalšími druhy, s kterými se v praxi moc neseťkáváme jsou EDM frézování a EDM broušení. Jednotlivé technologie se liší především ve tvaru, materiálu a pohybu elektrody.

2.3.1 EDM hloubení (Sinking Electrical Discharge Machining)

Tato technologie je z historického hlediska ta nejstarší a zároveň také nepoužívanější metoda obrábění. Jako nástroj se používá elektroda, které má tvar negativu požadované obráběné části a je zmenšená o mezielektrodovou, chcete-li pracovní vzdálenost. Samotný proces obrábění probíhá pod hladinou dielektrika, který je v tomto případě nejčastěji na bázi oleje, či petroleje.

Elektroda vykonává pohyb v jedné ose, a to směrem k obrobku. Přiblíží se na mezielektrodovou vzdálenost a začnou se se střídat velmi krátké časové intervaly, kdy do elektrody teče elektrický proud a kdy se nic neděje. Délka intervalů je definována tzv. OFF a ON time. Doba těchto intervalů se pohybuje v rámci milisekund. Poté co se

vystřídá několik takových intervalů se elektroda vzdálí a dovolí tak vniknout čistému dielektriku do obráběného prostoru, kde proběhne výplach odebraného materiálu.

Před zhruba 25 lety se s vývojem CNC řízených strojů přišlo na to, že elektrody nemusí vykonávat pouze jednoduchý pohyb nahoru a dolů, ale mohou se vzhledem k obráběnému dílu pohybovat planetárně. Problém související s pohybem pouze nahoru a dolů spočívá v nerovnoměrném obrábění a tím pádem i kvalitě povrchu na čele a bocích obráběné dutiny. Planetární pohyb elektrod vede k menšímu opotřebení elektrody, což může vyústit v menší počet elektrod potřebných k dokončení určité dutiny. Tohoto pohybu může být také využito pro kompenzaci chyb vzniklých během procesu obrábění, a tak pozitivně ovlivňuje přesnost finálního dílu. Další výhodou je zkrácení doby obrábění z důvodu zvětšení obráběné plochy, lze tedy použít větší vybíjecí proudy a vyšší frekvence. [10] [11]

Elektrody se pro potřeby hloubení dříve vyráběli především z mědi. V poslední době nahradil měď grafit, a to z několika důvodů. Grafit je oproti mědi mnohem lehčí. To může hrát velkou roli zejména u větších elektrod. Má menší tepelnou roztažnost, lepší pevnostní parametry a vyšší teplotu tání, takže se více hodí pro dlouhé a tenké elektrody. Při hrubování vykazuje menší opotřebení a také může pozitivně ovlivnit nutný počet elektrod pro výrobu dutiny. Při použití HSC obrábění a vhodně nastavených parametrech obrábění (vysoká rychlost otáček), se grafit dobře obrábí. Na druhou stranu se vzhledem k abrazivním vlastnostem grafitu frézy rychleji tupí než při obrábění ocelí, či mědi. Také je třeba brát v potaz, že stroje pro obrábění grafitu musí být příslušně vybaveny. To zejména odsáváním a precizním těsněním, aby byla zajištěna životnost stroje a ochrana obsluhy z důvodu vysoké prašnosti při obrábění grafitu. [12] Tého technologie se nejvíce využívá při výrobě vnitřních, tvarově složitých dílů, tenkých a dlouhých žeber, nebo vnitřních ostrých hran. Můžeme se s ní setkat při výrobě střižných nástrojů, forem pro vstřikování plastů, nebo kovů, tvářecích zápusťek a obecně v celém automotive průmyslu. [4] [13]



Obrázek 5 Elektroerozivní hloubící stroj [11]



Obrázek 4 Proces hloubení [39]

2.3.2 EDM drátové řezání (Wire Electrical Discharge Machining)

Tato metoda je po hloubení druhou nejrozšířenější. Jako elektroda zde slouží tenký drát, který má průměr od 0,01-0,4 mm. Nejčastěji je vyroben z mosazi, nebo ze stratifikované mědi. V případě drátů s velmi malým průměrem se mohou vyrábět i z wolframu. Podobně jako u hloubení, či jiných elektroerozivních metod celý proces probíhá pod hladinou dielektrika. V případě drátového řezání se nejčastěji jedná o deionizovanou vodu. Ve většině případů se drát pohybuje vertikálně shora dolů skrz řezaný materiál po předem naprogramované kontuře. Moderní drátové řezačky ovšem přinášejí možnost úhlového řezání pomocí posunutí horní hlavy vůči dolní, a tak vzrostly možnosti výroby dílu se složitější geometrií. [14]

Klíčovou součástí strojů pro drátové řezání je systém vedení elektrod. Jeho úkolem je dovést mosazný drát, který je na navinut na zásobní cívce až do horní hlavy. Cívka je odvíjena pomocí elektromotoru a prochází přitom systémem vyrovnávacích kladek. Jakmile je drát přiveden do horní hlavy, začne proces samo navlékání, který s sebou přináší výhodou bezobslužného provozu. Samo navlékací mechanismus se dá řešit několika variantami, nejčastějším řešením je buďto silným proudem dielektrika, který navede drát z horního vodička do dolního, nebo podávací kladkou. V momentě, kdy

se drát dostane do spodní hlavy, tak se znovu nepoužívá (kvůli velkému opotřebení elektrody), ale je pomocí tažných kladek odváděn do nádoby, kde se skladuje, nebo se automaticky nasekává na drobné kousky, které se lépe skladují. Během procesu řezání je důležité, aby byl drát vhodně napnutý a měl plynulý chod. Tento požadavek zajišťuje brzdové kolečko, které je řízeno řídicím systémem stroje. Kdyby byl drát málo napnutý, nebo naopak moc docházelo by k častému přetrhávání drátu, což by negativně ovlivnilo celý proces řezu. [15] [14]

Drátové řezání nachází uplatnění při řezání velmi tvrdých materiálu jako je zakalená nástrojová ocel, karbid wolframu, molybden, vodivá keramika, titan, diamant atd. Druhou výhodou této metody je vysoká přesnost, a tak se s drátovým řezáním můžeme setkat u produktů jako jsou protlačovadla, průstřížníky, matrice a razníky. Dále při výrobě etalonů, obrábění grafitu pro EDM hloubení, v leteckém průmyslu, hodinářském průmyslu v elektronice a obecně všude, kde je požadovaná výsledná přesnost obrobku. [15] [13]



Obrázek 7 Elektroerozivní drátová řezačka Fanuc Robocut [16]



Obrázek 6 Proces řezu [vlastní zdroj]

2.3.3 EDM vrtání (Electric Discharge Drilling)

U EDM vrtání se jako nástrojová elektroda používá nejčastěji mosazná trubička od průměru 0,2 do 5 mm. Trubička je uvnitř dutá a prochází jí 1-3 kanálky, kterými proudí natlakované dielektrikum. V případě EDM vrtání se používají dva druhy, buďto právě deionizovaná voda, která proudí skrz kanálky trubiček, nebo olej. Typ dielektrika určuje i konstrukci a samotné využití stroje. [17]

S EDM vrtačky používající jako dielektrikum deionizovanou vodu se v praxi setkáme nejčastěji. V porovnání s těmi na olej, jsou až 5x rychlejší, cenově dostupnější a mají lepší poměr vrtaného průměru ku délce L:D, který při této metodě vzroste až k hodnotám 300:1. Obvykle dosahují tolerance na průměru $\pm 0,05$ mm. Typicky se používá pro díry o průměru (0,5-1,5mm).

Naproti tomu EDM vrtačky na olej se používají pro výrobu děr s tou nejvyšší přesností a kvalitou povrchu. Dokážou vyrábět díry ještě o řád přesněji, tedy s tolerancí $\pm 0,005$ mm a o průměru až 0,01 mm. Poměr L:D je zde maximálně 150:1. Na rozdíl od vrtaček na vodu, jejichž elektrody pouze rotují kolem vlastní osy a jezdí shora dolů, ty na olej mají speciální dokončovací operace a podobně jako u hloubení používají orbitující pohyby. Elektrody jsou v tomto případě nejčastěji tvořeny z mědi nebo wolframu. Další výhodou strojů na olej, je fakt, že obrobky během obrábění nezreznou. [17]

U konvenčního vrtání se průměr vrtané díry přibližně rovná průměru použitého vrtáku. U EDM vrtání přesných děr je nutné brát ohled na to, že mezi elektrodou a obrobkem musí být mezera, a tak musí být elektroda zmenšena o mezielektrodovou mezera. Pro průmyslové použití EDM vrtání neexistují žádná doporučení týkající se průměru elektrody a nastavení obráběcích parametrů, které má by mělo být použito k dosažení určitého průměru. Například nominální průměr díry 2 mm se dá vyrobit pomocí čtyř různých průměrů elektrod (1,6-1,9 mm). Různým nastavením vybíjecího proudu a doby vybíjení se dá dosáhnout požadovaného průměru. Chceme-li vytvořit

přesnou díru pomocí EDM vrtání, je nutné správně vybrat průměr elektrody a nastavení generátoru stroje. [18]

Elektroerozivní vrtačky nacházejí uplatnění všude tam, kde je potřeba vrtání děr do velmi tvrdých materiál, nebo velmi hlubokých děr s malým průměrem. Z těchto důvodů se používají například ve zdravotnictví, letectví, či kosmonautice. Častým využitím je také výroba startovacích otvorů pro již zmíněné EDM řezání. [13]



Obrázek 9 Vysokorychlostní EDM vrtačka-PENTA 2030 [19]



Obrázek 8 Příprava na vrtání startovacích otvorů pro EDM řezání [Vlastní zdroj]

3 Materiály nástrojových elektrod

Cena obrobku, který byl vytvořen pomocí elektroerozivního obrábění se nejvíce odvíjí od ceny elektrody, která byla použita, a to až ze 70 %. Cena elektrody se potom odvíjí od použitého materiálu a jejím obráběním. Poměr mezi těmito dvěma faktory nelze objektivně vyjádřit, jelikož závisí na řadě proměnných parametrů. S jistotou lze prohlásit, že použitý materiál může pozitivně, či negativně ovlivnit nákladovost

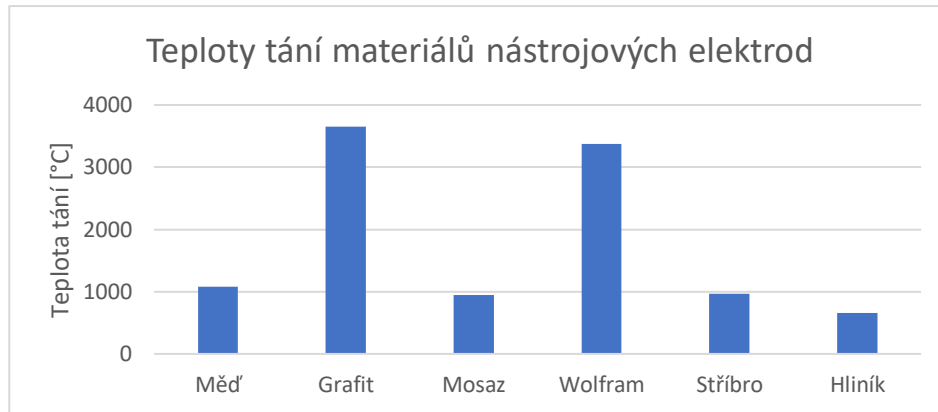
produkce elektrod. Právě z tohoto důvodu je důležité brát ohled na vlastnosti materiálů použitých při elektrojiskrovém obrábění. [20] [21]

3.1 Požadované vlastnosti nástrojových elektrod

Obrobek a elektroda použité při elektroerozivním obrábění, by ideálně měli mít protichůdné vlastnosti. Za prvé by elektroda měla co nejvíce dovolit průtoku nábojům a zároveň by měla být co nejvíce odolná vůči erodujícím charakteristikám výbojů. Jinými slovy, zatímco obrobek musí být co nejvíce erodován elektrickými výboji, samotná elektroda ne. Jelikož elektrody nepřichází do styku s obráběným materiálem, jako u konvenčního obrábění, tak při výběru správného materiálu nehrají hlavní roli mechanické vlastnosti, ale termo-fyzikální. Mezi ty nejdůležitější patří teplotní a elektrická vodivost, tepelná roztažnost a teplota tání. Čím větší má materiál teplotní vodivost, tím rychleji může odcházet teplo z povrchu elektrody a klesá tak opal. Podobně to platí i pro teplotu tání. V momentě, kdy povrchová teplota elektrody nedosáhne teploty tání materiálu, tak nedochází ani k odtavení elektrody. Proto jsou pro nástrojové elektrody vhodné materiály s vyšším bodem tání, jejichž hodnoty jsou uvedeny v grafu č.1. Neméně důležité jsou elektrické vlastnosti elektrod. Vyšší elektrická vodivost, nebo menší měrný elektrický odpor obecně vedou k menšímu opotřebení. Vznikající jiskry negativně působí na elektrody a vytvářejí vnitřní napětí, které může vyústit v mikrotrhliny na povrchu elektrod. Tím pádem je důležitá strukturální integrita, která významně ovlivňuje výkon obrábění. I přes to, že na elektrodu nepůsobí žádné vnější síly (kromě tlaku dielektrika), u tenkých a dlouhých elektrod hraje velkou roli i pevnostní vlastnosti materiálu, a to hlavně při jejich výrobě. Nemalou roli hraje také obrobitelnost materiálu, což významně ovlivňuje ekonomickou stránku problematiky. U objemných elektrod, je důležité brát ohled i na hmotnost, která má následně vázanost na tuhost stroje. V neposlední řadě je důležitým faktorem cena. Dalo by se říct, že nástrojovou elektrodou může být jakýkoli materiál, který vykazuje dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. V praxi se pro tento účel používá nejčastěji grafit, měď, nebo mosaz. Pro speciální účely se však

můžeme setkat i s materiály jakými jsou wolfram, karbid wolframu, grafit s příměsí mědi, stříbro, nebo hliník. [22] [23] [24] [25] [21]

Graf 1 Teploty tání jednotlivých materiálů [25]



3.2 Měď

Měď byla donedávna nejpoužívanějším elektrodovým materiálem používaným v EDM. To hlavně kvůli její vysoké elektrické a tepelné vodivosti. Má velmi dobrou strukturální integritu, a je tak vhodná pro dokončovací operace. Při použití měděné elektrody se dosahuje nejlepší kvality povrchu. Díky této vlastnosti skvěle zachovává tvar a ostré hrany. Měď má relativně nízkou teplotu tání, což zapříčiňuje relativně rychlý opal elektrody. Dalším negativem je i fakt, že měď je velmi kujný a houževnatý materiál, který se velmi obtížně obrábí. Při frézování má tendenci se na frézy lepit a musí se frézovat nesousledně, jinak by mohlo dojít k poškození vřetene stroje. Alternativou může být měď s příměsí teluru, tato příměs zlepšuje její obrobiteľnost, nicméně oproti čisté mědi se zhoršují parametry jako je rychlost úběru materiálu MRR (z angl. Material Removal Rate) a opotřebenění. V porovnání s EDM grafitem je měď v průměru dražší, nicméně se dá recyklovat, což se o grafitu říct nedá.

Vlastnosti mědi	
Hustota (g/cm ³)	8,93
Měrný elektrický odpor (μΩm)	0,018
Teplotní vodivost (W/mK)	385

Bod tání (°C)	1083	Tabulka 2 uvádí typické vlastnosti čisté mědi.[26]
Měrná tepelná kapacita (J/kgK)	385	
Koeficient tepelné roztažnosti ($\times 10^{-6}/K$)	16,4	

Tabulka 2 Vlastnosti mědi [27]

Vlastnosti mědi	
Hustota (g/cm^3)	8,93
Měrný elektrický odpor ($\mu\Omega m$)	0,018
Tepelná vodivost (W/mK)	385
Bod tání (°C)	1083
Měrná tepelná kapacita (J/kgK)	385
Koeficient tepelné roztažnosti ($\times 10^{-6}/K$)	16,4

3.3 Grafit

V posledních 5 letech se většina evropských firem přeorientovala na výrobu elektrod z grafitu, který nahradil měď na prvním místě v EDM použití. Grafit má oproti mědi řadu výhod. Jednou z hlavních je jeho vysoká teplota tání, která se odráží v jeho dobré odolnosti vůči opalu. Další výhodou je jeho obrobitelnost, která je oproti mědi znatelně lepší. S obrobitelností to však není úplně jednoduché. Při obrábění vytváří obrovské množství prachu, který je tvořen velmi malými částicemi. Ty mohou proniknout do pohonu stroje, kde se chovají jako abrazivum a mohou tak velmi negativně zkrátit životnost obráběcích strojů. Z tohoto důvodu bývají stroje na obrábění grafitu vybaveny odsáváním a velmi kvalitním těsněním. Mezi pozitiva grafitu patří i to, že se vyrábí v několika zrnitostních variantách. Vzniká tak možnost výběru grafitu pro konkrétní aplikace, kde grafity s jemnější strukturou jsou vhodnější pro dokončovací aplikace a malé, či úzké elektrody. Grafity s hrubší zrnitostí jsou většinou levnější, prokazují větší rychlost eroze, ale i větší opotřebení. Nejsou vhodné pro malé tvarové detaily, protože hrozí vydrolování větších zrn při erozi. V tabulce 3 jsou uvedeny elektro-tepelné vlastnosti grafitu. [26] [21]

Tabulka 3 Vlastnosti grafitu [28]

Vlastnosti grafitu	
Hustota (g/cm ³)	2,25
Měrný elektrická odpor (μΩm)	0,33-1,85
Teplotní vodivost (W/mK)	25
Bod tání (°C)	3650
Měrná tepelná kapacita (J/kgK)	707
Koeficient tepelné roztažnosti (x10 ⁻⁶ /K)	0,6-4,3

3.4 Mosaz

Mosaz je slitina mědi a zinku. Byla jedním z prvních použitých elektrodoých materiálů pro elektrody kvůli nízké ceně a snadné obrobiteľnosti konvenčními metodami. Vzhledem k vysoké míře opotřebení se však používá jen zřídka jako elektroda v moderních hloubicích strojích. Mosaz se dá mnohem snadněji odlévat a protlačovat. Je tak vhodná pro výrobu drátu, který se používá pro potřeby elektroerozivního řezání. Vzhledem k tomu, že se při EDM řezání drát znovu nepoužívá nevádí ani fakt, že se výrazně opotřebovává. Dále se využívá pro výrobu mosazných trubiček často používaných jako materiál elektrod pro EDM vrtání. Z tabulky 4 je patrné, že její tepelná a elektrická vodivost není tak dobrá jako u mědi. Z tohoto důvodu má menší rychlost úběru materiálu než například měď, nebo grafit. Pozn.: Rozpětí hodnot v tabulce je dáno poměrem mědi a zinku ve slitině. [21]

Tabulka 4 Vlastnosti mosazi [29]

Vlastnosti mosazi	
Hustota (g/cm ³)	7,2-8,86
Měrný elektrická odpor (μΩm)	0,03-0,28
Teplotní vodivost (W/mK)	26-233
Bod tání (°C)	809-1030
Měrná tepelná kapacita (J/kgK)	380
Koeficient tepelné roztažnosti (x10 ⁻⁶ /K)	18-26



Obrázek 10 Trubičkové elektrody [40]

3.5 Wolfram

Wolfram se využívá ve speciálních případech jako je například mikro EDM obrábění. To z důvodu vysoké hustoty, pevnosti v tahu a vysokému bodu tání. Na druhou stranu má nízkou elektrickou vodivost, a tak materiál při obrábění odebírá relativně pomalu. V praxi se moc nepoužívá z důvodů špatné obrobitelnosti a vysoké ceny. V tabulce 5 jsou uvedeny elektro-tepelné vlastnosti čistého wolframu. [30]

Tabulka 5 Vlastnosti wolframu [29]

Vlastnosti wolframu	
Hustota (g/cm ³)	19,3
Měrný elektrický odpor (μΩm)	0,056
Teplotní vodivost (W/mK)	163
Bod tání (°C)	3370
Měrná tepelná kapacita (J/kgK)	134
Koeficient tepelné roztažnosti (x10 ⁻⁶ /K)	4,4

3.6 Měď-Wolfram (CuW)

CuW je pseudo-slitina mědi a wolframu. Jelikož měď a wolfram nejsou vzájemně rozpustné, tak jsou částice jednoho kovu rozptýleny v materiálu druhého kovu. Jako elektroda se používá, proto, aby se zkombinovali nejlepší vlastnosti mědi (teplotní a elektrická vodivost) a wolframu (vysoký bod tání). Vyrábí se práškovou metalurgií a pro potřeby EDM elektrod mají obvykle poměr 25 % mědi a 75 % wolframu. Tabulka 6 udává typické elektro-tepelné vlastnosti tohoto materiálu. Z tabulky je patrné, že přítomnost wolframu sice snižuje elektrickou vodivost, což negativně působí na rychlost obrábění, nicméně výrazně zvyšuje bod tání, a tak se oproti čisté mědi mnohem méně opotřebovává. Kvůli vysoké ceně má limitované uplatnění, je však vhodná pro obrábění WC-Co, kde projevuje lepší parametry obrábění, než při použití mědi nebo grafitu. [21] [30]

Tabulka 6 Vlastnosti CuW [32]

Vlastnosti CuW (25%Cu a 75%W)	
Hustota (g/cm ³)	14,84

Měrný elektrická odpor ($\mu\Omega\text{m}$)	0,038
Teplotní vodivost (W/mK)	220
Bod tání ($^{\circ}\text{C}$)	1085-3410
Měrná tepelná kapacita (J/kgK)	214
Koeficient tepelné roztažnosti ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	10,77

3.7 Stříbro

Stříbro se jako materiál nástrojových elektrod používá jen velmi zřídka. Z tabulky 7 lze vidět, že má velmi vysokou hodnotu elektrické vodivosti, dokonce vyšší než měď. Další výhodou je vysoká strukturální integrita, což ze stříbra dělá jeden z nejlepších materiálů pro dokončování. Ačkoliv má stříbro tyto skvělé „EDM“ vlastnosti, jeho vysoká cena, nízká teplota tání a vysoká teplotní roztažnost ho v praxi činí téměř nepoužitelným materiálem pro elektroerozivní použití. [21]

Tabulka 7 Vlastnosti stříbra [33]

Vlastnosti stříbra	
Hustota (g/cm^3)	10,49
Měrný elektrická odpor ($\mu\Omega\text{m}$)	0,0155
Teplotní vodivost (W/mK)	419
Bod tání ($^{\circ}\text{C}$)	961,8
Měrná tepelná kapacita (J/kgK)	234
Koeficient tepelné roztažnosti ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	19,9

3.8 Hliník

Hliníková elektroda sice prokazuje dobrou elektrickou a tepelnou vodivost, díky které je dobrým adeptem pro elektroerozivní použití. Nicméně má vysoký koeficient tepelné roztažnosti, což zapříčiňuje následnou nepřesnost EDM obrábění. Nízký bod tání má za následek vysoké opotřebení. Ve studii, kterou prováděl Khan a Saifuddin, kde se porovnávalo EDM obrábění nerezové oceli AISI304 a WC-Co (slnutý karbid), hliník vytvořil lepší kvalitu povrchu než měď, ačkoliv měl mnohem horší opotřebení a odebíral materiál výrazně pomaleji. Tyto negativa činí hliník v praxi téměř nepoužitelným.

a 8 uvádí elektro-tepelné vlastnosti čistého hliníku. [35] [21]

Tabulka 8 Vlastnosti hliníku [30]

Vlastnosti hliníku	
Hustota (g/cm ³)	2,69
Měrný elektrický odpor (μΩm)	0,027
Teplotní vodivost (W/mK)	210
Bod tání (°C)	660
Měrná tepelná kapacita (J/kgK)	900
Koeficient tepelné roztažnosti (x10 ⁻⁶ /K)	24

4 Výběr optimálního materiálu grafitových elektrod pro EDM

Nedávno firma zakoupila nový elektroerozivní hloubicí stroj (OPS Ingersoll Eagle G50 competition). Důvod, kvůli kterému firma stroj zakoupila, byl zvýšení produktivity a kvality výroby, což může vést ke zvýšení výrobních kapacit a portfolia vyráběných dílců. V současnosti se pro potřeby EDM hloubení využíval pouze jeden druh grafitu, a to konkrétně grafit HK-75 od firmy SGL Carbon, jehož charakteristické vlastnosti jsou popsány v kapitole 4.2.1. a je vhodný spíše pro dokončovací operace.

V rámci optimalizace výroby a využití potenciálu stroje, jsme se společně s jednatelem rozhodli otestovat i jiné druhy grafitu, které budou vhodné jak pro hrubování, tak pro dokončování a podrobit je zátěžovému testu.

Testovalo se celkem 6 druhů grafitu od 3 dodavatelů. Od každého dodavatele jsme vybrali 2 druhy grafitu. Vždy jeden, který měl menší průměrnou velikost zrna (v rozmezí od 4-5 μm) a byl tak vhodný na dokončovací operace. Druhý s vyšší průměrnou velikostí zrna (v rozmezí od 9–10 μm), který je určen pro hrubovací operace. Jemnozrnný a hrubozrnný grafit jsme volili proto, abychom otestovali chování změny velikosti zrna na rychlosti procesu erodování a zároveň opotřebení elektrod.

Z grafitových polotovarů byl vyfrézován tvar elektrody, typický pro podnikovou výrobu a následně se s touto elektrodou na elektrojiskrovém hloubicím stroji vyerovaly 3 dutiny do pokusné desky. Elektrody se měřili celkem dvakrát na CMM.

Jednou po frézování, aby se ověřila přesnost výroby elektrod. Podruhé po procesu elektroerozivního obrábění a vyhodnocovala se řada parametrů.

Je velmi důležité uvést, že prováděný pokus neplatí obecně a nejde na základě jeho výsledků vyhodnotit, že některý grafit je lepší, nebo horší. Změny v podmínkách obrábění, jako například: tvar a velikost elektrody, nastavení generátoru, typ stroje, druh dielektrika, obráběný materiál a další parametry mohou zásadně ovlivnit výsledky testu. Test byl navržen pouze pro potřeby firmy, přičemž jsem při jeho návrhu vycházel z portfolia výroby. Všechny elektrody se vyráběly za stejných technologických podmínek (stejný stroj, upínací systém, fréza atd..). To samé platí i pro proces elektroeroze.

Při plánování výroby pomocí elektroerozivního hloubení se rozhoduje mezi tím, zda je ekonomičtější vyrobit větší počet elektrod z grafitu, který je levnější a pravděpodobně se více opotřebovává, nebo vyfrézovat pouze jednu elektrodu z kvalitnějšího, ale mnohonásobně dražšího grafitu.

Experiment by nám na základě porovnání materiálů grafitových elektrod měl ukázat, jak velké jsou rozdíly v parametru opotřebení a rychlosti obrábění a následně nám usnadnit volbu při výběru optimálního grafitu pro konkrétní aplikace.

4.1 Postup experimentu

Postup jsem se rozhodl rozdělit do třech částí, a to na výrobu vzorkové desky a výrobu nástrojových elektrod a proces elektroeroze.

- Výroba vzorkové desky
 - a) Ofrézování bloku materiálu do tvaru vzorkové desky.
 - b) Tepelné zpracování pokusné desky (nástrojová ocel W.Nr. 1.2343) kalení a následné popouštění na 48-52 HRc.
 - c) Broušení pokusné desky.
- Výroba nástrojových elektrod

- a) Příprava grafitových polotovarů.
 - b) Přiřazení grafitových polotovarů k označeným upínačům.
 - c) Výroba elektrod na frézce.
 - d) Rozměrová kontrola elektrod na souřadnicovém měřicím stroji.
- Proces elektroeroze a následné vyhodnocení
 - a) EDM hloubení jednotlivých dutin.
 - b) Měření opotřebení elektrod na souřadnicovém měřicím stroji.
 - c) Měření opotřebení ostrých hran na optickém měřicím stroji.
 - d) Zpracování a analýza naměřených dat.
 - e) Konečné porovnání naměřených dat s cenou jednotlivých grafitů.
 - f) Závěr v podobě přehledu o tom, jaký grafit je vhodný použít v konkrétních situacích.

4.2 Vybraní zástupci grafitu

Na tuzemském trhu se vyskytuje celá řada dodavatelů grafitu pro EDM použití. Na základě rešerše trhu a konzultace s vedením firmy jsem se shodli na výběru dodavatelů s nejlepšími referencemi. Jako nejvhodnější kandidáti pro EDM použití jsou dodavatelé Tokai Carbon (Japonsko), SGL Carbon (Německo) a POCO grafit (USA, Texas) jejichž grafit pro Český trh dodává řada prodejců. Testem byly podrobeny vždy dva druhy grafitu od každého výrobce. Hlavním parametrem pro náš výběr byla zrnitost grafitu. Ta nejvíce určuje to, zda je grafit vhodný pro použití na hrubovací, nebo dokončovací hloubení. Od každého výrobce jsme tedy zvolili jeden grafit vhodný pro hrubování a druhý určený na dokončování. Od firmy Tokai Carbon jsem se jako hrubovací grafit rozhodl zvolit HK-15 a jako dokončovací HK-75. Od SGL Carbon jsem pak volil R8710 jakožto dokončovací a R8510 jako hrubovací. Od POCO Graphite jsem vybral dokončovací grafit EDM 1, který je považován za nejkvalitnější grafit pro EDM, zároveň je nejdražším grafitem v porovnání s ostatními grafity se srovnatelnými parametry od jiných výrobců. V současnosti firma využívá na veškeré použití pouze

jeden druh grafitu a to HK-75, který je také součástí testů. Nakonec budeme mít možnost porovnat naměřená data ostatních materiálů se zažitým standardem.

4.2.1 Typické vlastnosti vybraných grafitů

Následující tabulka udává typické vlastnosti grafitů vyskytujících se v experimentu. Jejich hodnoty uvádějí výrobci v technických listech. Průměrná velikost zrna není jedinou vlastností definující grafit. Mezi další pozorované vlastnosti, patří například pevnost v ohybu, Shoreova tvrdost, nebo měrný elektrický odpor. Kombinace těchto typických vlastností EDM grafitu, definuje poměr mezi rychlostí obrábění, opotřebením elektrody a kvalitě obráběného povrchu. Vlastnosti grafitů, vyskytujících se v experimentu jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9 Vlastnosti grafitů podrobených testem [36] [37] [19]

Označení grafitu	Dodavatel	Využití	Průměrná velikost zrna[μm]	Pevnost v ohybu [MPa]	Tvrdost [shore]	Měrný elektrický odpor [$\mu\Omega\text{m}$]
R8510	SGL Carbon	Hrubování	10	60	70	13
R8710	SGL Carbon	Dokončování	3	85	80	13
HK-10	Tokai Carbon	Hrubování	9	52	54	12
HK-75	Tokai Carbon	Dokončování	4	66	72	16,5
EDM 180	POCO	Hrubování	10	59	66	13
EDM 1	POCO	Dokončování	5	68,2	69	19,3

4.2.2 Přiřazení grafitových materiálů k upínačům

Aby nedošlo k záměně jednotlivých materiálů, tak jsme k grafitové polotovary popsali čísla, která korespondovala s čísly upínačů systému 3R podle následující tabulky:

Tabulka 10 Systém značení upínek

	UPÍNAČ	GRAFIT	OZNAČENÍ
	008	HK75	A

JEMNÝ GRAFIT	015	R8710	B
	017	EDM 1	C
HRUBÝ GRAFIT	018	HK15	D
	026	R8510	E
	062	EDM 180	F

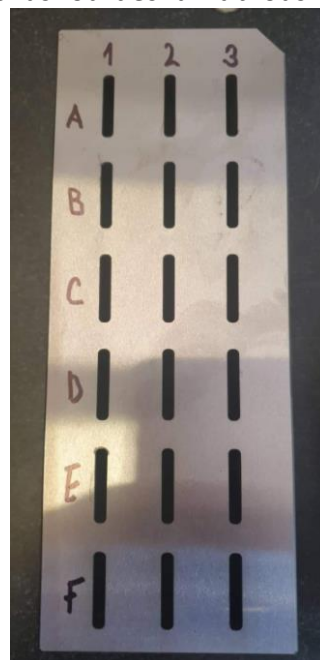
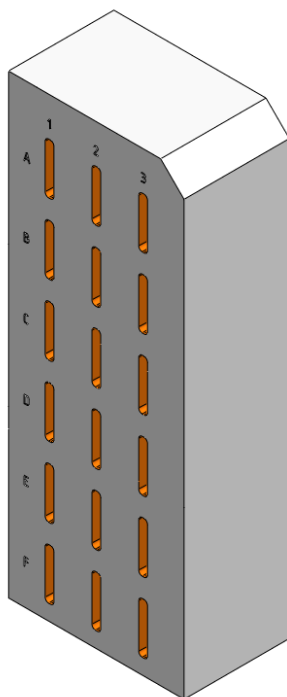
4.3 Vzorková deska

Abychom při testování elektrod zajistili co největší autenticitu výsledků, je důležité abychom použili materiál, který se využívá pro výrobu tvarových částí forem pro vstřikování plastů. Pro tuto konkrétní aplikaci se nejčastěji využívá nástrojová ocel s označením W.Nr. 1.2343 (Din X37CrMo5-1, ČSN 19 552). Jedná se o vysoce legovanou nástrojovou ocel. Tato ocel vykazuje vysokou teplotní vodivost a dobrou tepelnou odolnost. Tím pádem velice dobře vzdoruje mikro trhlinám vzniklými tepelným namáháním. Zároveň si zachovává dobrou houževnatost. S tímto materiálem se můžeme setkat také u válců a pístu pro lis, nebo například u protlačovacích nástrojů. S ohledem na objektivitu výsledků je důležité, aby byla vzorková deska co nejvíce podobná ideálnímu hranolu. Z technologických důvodů je důležité, aby byla horní a dolní plocha hranolu vyrobena v co možná nejlepší

rovinnosti a zároveň rovnoběžnosti. Z tohoto důvodu jsem nechal pokusnou desku nabrousit. Po měrové

kontrole, ověřili, že je nabroušená rovinnosti i

jsme deska s tolerancí



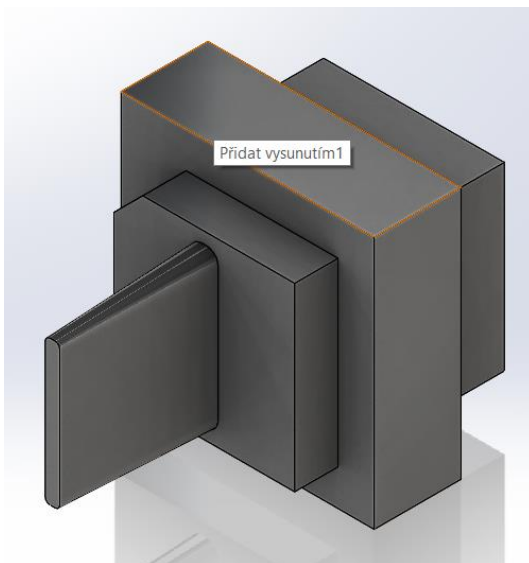
rovnoběžnosti $\pm 0,003\text{mm}$. Následně jsem desku popsal písmeny A-F a čísly 1-3 podle již popsaného systému.

Obrázek 12 Model vzorkové desky

Obrázek 11 Vzorková deska

4.4 Pokusná elektroda

Vzhledem ke komplexnosti a obecnosti této technologie je potřeba pokus značně zjednodušit. Abychom zaručili co nejvíce objektivní výsledek experimentu, bylo



potřeba navrhnout co nejvhodnější tvar elektrod. Při výběru správného tvaru elektrody jsem musel přihlížet na řadu hledisek, které zkoumání ovlivňují. Nakonec jsem se rozhodl zvolit tvar tenkého žebra. Rozhodl jsem se tak z několika důvodů. Tento tvar se ve formách často vyskytuje v podobě tenkých dutin a žeber. Firma se tedy s takovýmto typem elektrody často setkává. Zároveň se elektrody s menší čelní plochou při erozi více opotřebí než například kvádr s velikou čelní plochou, a tak na tomto tvaru bude zřejmější opotřebení a s tím spojené měření rozměrů po hloubení. Úkos 2,5° zajistí lepší výplach při erozi a zároveň simuluje vyjímací úkos, který se používá pro snazší odformování výlisků. Ostré hrany mezi čelní plochou a bokem elektrody nám poskytnou doplňující informace o jejich opotřebení, které bývá jiné než u rovných tvarů.

Obrázek 14 Model pokusné elektrody

4.5 Upínací systém elektrod 3R

Firma pro potřeby výroby elektrod a elektroerozivního obrábění využívá System 3R. Jedná se o soustavu upínacích zařízení a držáků,

kteřá výrazně zlepšuje kvalitu a produktivitu *Obrázek 13 Pokusná elektroda*

výroby. Tímto systémem je vybavena frézka, CMM měřící centrum a elektroerozivní hloubící stroj. Jeho hlavní výhodou je fakt, že je elektroda od samého začátku až do konce výrobního procesu upnuta v jednom upínači, který zároveň definuje jeho nulový bod. Poté, co se nařeže grafitový polotovar na pile se takto připravený polotovar upne do svěráku frézky. Na tomto polotovaru se vyfrézuje kvádr v normalizovaných rozměrech upínače 25x25x12, nebo 35x35x12 podle velikosti elektrody. Za tento obrobený rozměr se polotovar upne do přípravku, který je součástí tohoto systému. Od tohoto momentu se s elektrodou pracuje pouze v tomto

upínači, takže se zamezí nepřesnosti s opakovaným upínáním, opakovaným určováním nulového bodu a v neposlední řadě také ztrátovým časem s tím spojeným. Poté, co se obrobí tvar elektrody na frézce, putuje elektroda společně s držákem na CMM. Před každým měření elektrody probíhá automatický cyklus určující nulový bod přípravku (x, y, z) a úhel natočení (c). Cyklus má dvě fáze. V té první se měří souřadnice osy Z. Celkem se z přípravku nasnímají 4 body. Z takto naměřených bodů software vypočítá měřící rovinu, od kterých se následně určuje míra naklonění. V druhé fázi se do upínače vloží kalibrační zařízení, a pomocí automatického programu se nadefinuje střed (x, y) a natočení (c) přípravku. Následuje měření bodů elektrody, podle kterého software CMM vypočítá posunutí souřadného systému vůči souřadnému systému upínače. Na základě těchto dat se stanoví korekce pro hloubicí stroj, který je vybaven stejným upínacím systémem a může tak obrábět s maximální přesností, bez nutnosti dalšího určování nulového bodu elektrody operátorem přímo na stroji. [14]

4.6 Zkoumané parametry

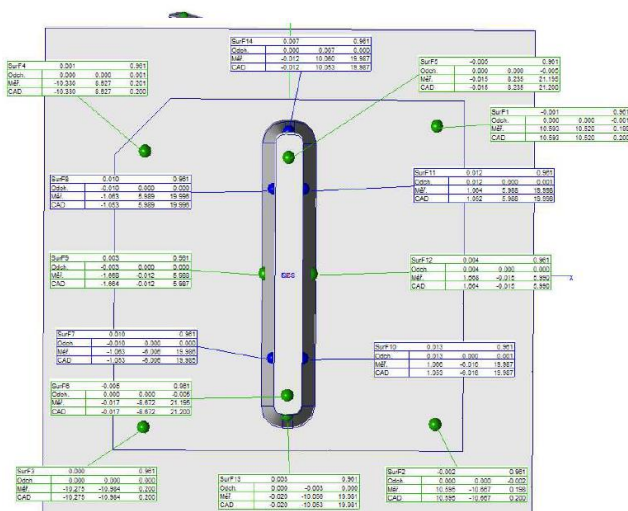
Velmi důležitou součástí celého pokusu je vyhodnocení naměřených parametrů. Abychom mohli učinit správné rozhodnutí při výběru optimálního grafitového materiálu je velice důležité porovnat správné parametry. Nejdůležitějšími výsledky je měření opotřebení elektrod, protože finální rozměry dutin, budou úměrné rozměrům opotřebovaných elektrod. Tomuto parametru bude přisuzována největší váha, jelikož je pro podnik důležité dodávat produkty, jejichž tvarové části jsou zhotoveny v příslušné rozměrové a tvarové toleranci. Opotřebení bylo měřeno dvěma způsoby. Konkrétně na souřadnicovém měřícím stroji, kde se měřil rozměrový úbytek materiálu a na optickém měřícím stroji, kde se vyhodnocoval opotřebení ostrých hran i délkové opotřebení elektrody viz kapitola 4.7 a 4.8. V konečném důsledku se může opotřebení odrazit v nutném počtu elektrod pro obrobení daného dílu. Důležitým ukazatelem je

i strojní čas, který je jedním z hlavních měřítek produktivity výroby. V neposlední řadě hraje značnou roli i cena grafitu, která společně se zmíněnou produktivitou ovlivňuje ekonomickou složku EDM obrábění. Na základě porovnání těchto parametrů bude učiněno rozhodnutí, který typ grafitu, popřípadě jaká kombinace grafitů bude nejvhodnější pro konkrétní použití.

4.7 Způsob vyhodnocení na souřadnicovém měřícím stroji

Ve firmě se standartně využívá systém měření na CMM porovnáváním obrobku vůči 3D datům. Tento systém měření zohledňuje jak rozměrovou, tak polohovou složku vyhodnocení (vektorová odchylka). Tento způsob vyhodnocení je pro nás zbytečně komplikovaný, jelikož nás zajímá pouze složka rozměrová, a to z toho důvodu, že složka polohová je ovlivňována přesností polohování stroje a nikoli vlastnostmi grafitu. Polohová chyba nebude žádným způsobem vyhodnocována a nebude ovlivňovat výsledky měření. Grafitové elektrody se měřili ve dvou fázích. Prvně se vyhodnotily rozměry elektrod ihned po jejich výrobě, a to z toho důvodu, aby se ověřily rozměry ještě před samotným EDM obráběním. Kvůli nepřesnostem stroje a nástroje nejsme schopni vyrobit všechny elektrody naprosto identicky. Každá elektroda byla vyrobena v rámci tisícín milimetru jinak. Jakmile se zjistili rozměrové úchytky na vyrobených elektrodách, stroj automaticky vygeneroval korekce pro hloubící stroj a přiřadil je k jednotlivým upínačům. Stejným způsobem (programem), jakým se měřily neopotřebované elektrody se následně změřily elektrody po erozi. Elektroda se po procesu hloubení vždy o něco zmenší. Právě na základě tohoto úbytku materiálu bylo zjištěno opotřebení elektrod, které přímo ovlivňuje finální rozměr obrobeného dílu. Platí zde vztah: „čím větší bude úbytek materiálu na elektrodě, tím větší bude i chyba rozměru na vzorkové desce.“ Celkem se na elektrodě snímalo 14 bodů viz obrázek. Čtyři body se nasnímaly na základním rámečku $z=0$, od kterého se odvozovala výška elektrod a sloužily pouze jako měrová základna. Dva body byly naměřeny na čelní ploše elektrody $z=21$, toto měření bylo nejdůležitější, protože zde elektroda měla největší opotřebení. Dále se snímaly body na bocích elektrody.

Nejdříve dva v $z = 0$ a nakonec čtyři v $z = 18$. Souřadnice naměřených bodů následně software porovnal s CAD modelem a stanovil odchylku.



Obrázek 15 Body snímané na elektrodě



Obrázek 16 Měření elektrody na CMM



4.8 Způsob vyhodnocení na optickém měřícím stroji

Hlavní motivací pro použití optického měřícího stroje bylo zjištění stavu ostrých hran po EDM hloubení, které se většinou značně opotřebávají. U jednotlivých elektrod byl změřen rádius zaoblčení ostrých hran a zároveň i maximální délka elektrod. Ta se vyhodnocovala od základního rámečku, až po maximum tvaru

elektrody „největšího hrbolku“. Z tohoto důvodu se výsledky měření opotřebení čelní plochy různí od výsledků ze souřadnicového měřicího stroje. Toto měření nám podalo lepší informace o tvaru elektrod po EDM hloubení a zároveň sloužilo jako ověření předchozího měření na CMM. V tomto případě bylo měření prováděno pouze po procesu hloubení.

4.9 Nastavení generátoru elektroerozivního hloubicího stroje

Nastavení generátorů stroje a tím pádem i celého elektroerozivního procesu zásadně ovlivňuje rychlost obrábění, jakost povrchu a v neposlední řadě i opotřebení nástrojové elektrody. U moderních EDM hloubicích strojů si řídicí systém stroje na základě zadaných parametrů vypočítá ideální nastavení generátoru. Pro tento experiment byly parametry obrábění následující:

- Materiál obrobku: kalená ocel
- Kontaktní plocha: 40 mm²
- Hloubka eroze: 20
- Materiál elektrody: grafit standard
- Typ obrábění: standard
- Úhel úkosu: 2,5°
- Drsnost povrchu: VDI 24≈Ra1,58
- GAP: 0,2 mm

Z takto nadefinovaných parametrů následně stroj vygeneroval 11 obráběcích režimů, jejichž údaje jsou uvedeny v tabulce č.10. Každý režim obsahoval jiné nastavení generátorů, různý OFF a ON time, čelní a boční GAP a s tím související úběr a opotřebení materiálu. Jednotlivé režimy byly seřazeny od hrubovací až po dokončovací operace. Například první režim měl velikost úběru materiálu 25 mm³/min, kdežto ten poslední 0,2 mm³/min. Zde si můžeme povšimnout jisté závislosti mezi GAP mezerou a velikostí úběru materiálu. V hrubovacím módu obrábí

stroj s několikanásobně větší mezielektrodovou vzdáleností než v tom dokončovacím. Platí tedy, že čím je větší GAP, tím je větší úběr materiálu a naopak.

Z tabulky 11 si můžete povšimnout, že procentuální (relativní) opotřebení elektrody je nejmenší při hrubování a největší při dokončování. Například v režimu 1. je procentuální opotřebení 0,05 % při úběru materiálu 25 mm³/min. V režimu 11. je naopak procentuální opotřebení 45 % při úběru materiálu 0,2 mm³/min. Je tomu tak z toho důvodu, že procentuální opotřebení je vztaženo k odebranému materiálu a bylo zavedeno pro snazší porovnání opotřebení. Značí se mV a řídí se podle následujícího vztahu, kde V_E je úbytek objemu materiálu elektrody a V_m je úbytek objemu materiálu obrobku. [5] [7]

$$mV = \frac{V_E}{V_m}$$

Tabulka 11 Nastavení obráběcích režimů

Režim	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
VDI	42	41	41	41	39	36	35	32	30	28	24
Velikost úběru materiálu [mm ³ /min]	25	22	20	10	7,5	4	3	2	1,5	0,8	0,2
Opotřebení [%]	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1	0,3	0,3	0,7	3	4	45
Čelní podrozměr [mm]	1,565	969	0,35	0,28	0,22	0,17	0,125	0,09	0,06	0,04	0,02
Boční podrozměr [mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,177	0,132	0,09	0,058	0,04	0,025	0,01

4.10 Stroje použité v experimentu

- Elektroerozivní hloubicí stroj – OPS Ingersoll Eagle G50 Competition
- CNC frézka – Rödgers RXP 501
- Souřadnicový měřicí stroj – Mitutoyo Crysta Apex S574
- Optický měřicí stroj – Vertex 310

4.11 Nezrealizované části experimentu

Abychom zajistili absolutní objektivitu získaných výsledků, tak by bylo nutné, aby se trojice dutin vyhloubili aspoň 5krát a ověřili se tak získané hodnoty i ze statistického hlediska. To se bohužel z časových a finančních důvodů ve firmě nedokázalo uskutečnit. Samotný proces elektroeroze už tak trval přes 28 hodin.

Při plánování experimentu jsem navrhoval i následné měření kvality povrchu po elektroerozi, nicméně po konzultaci s odborníkem v oblasti EDM, jsem zjistil, že by rozdíly mezi jednotlivými grafity byly téměř neměřitelné, a tak by nám tyto výsledky nepřinesly žádné užitečné informace. Z tohoto důvodu jsem se nakonec rozhodl měření drsnosti vypustit.

4.12 Orientační ceny grafitu

Uvedené hodnoty jsou pouze orientační. Cena je silně ovlivněna velikostí přířezku a nasmlouvanými cenami mezi dodavatelem a odběratelem.

Tabulka 12 Ceny grafitu

Typ grafitu	HK-75	R8710	EDM 1	HK-15	R8510	EDM 180
kč/dm ³	1280	3675	5500	960	1120	2157

5 Výsledky měření

5.1 Strojní časy jednotlivých elektrod

Na základě odečtení strojních časů z monitoru stroje jsme získali hrubý přehled o tom, jaké grafity mají lepší úběr materiálu a jsou tak vhodnější na hrubovací operace. Je

nutné zmínit, že naměřené časy EDM obrábění nevyovídají pouze o tom, jak rychle jednotlivé elektrody odebíraly materiál. Celkový čas totiž ovlivňuje i fakt, že se elektrody během procesu elektroeroze postupně opotřebovávají. Nejvíce se projeví opal na čelní ploše elektrody, což zapříčiní celkové zkrácení délky elektrody. Elektroda tím pádem nedojede do takové hloubky, jako kdyby byla neopotrebovaná a zkrátí tak svůj čas obrábění následující dutiny. Dalo by se tedy říct, že tento čas je zároveň měřítkem opotřebování elektrody. Tento fakt se dá vyzorovat i z konkrétních naměřených dat. Z tabulky 13 je vidno, že se časy na vyhloubení dutin postupně zkracují. Nejlépe je to vidět na příkladu grafitu EDM 1. Výsledky měření na CMM a optickém měřícím stroji ukázaly, že se ze všech grafitů opotřeboval nejméně na čelní ploše (nejméně se zkrátí). Dále si můžeme povšimnout, že časový rozdíl mezi 1. a 2. dutinou je pouze 11 sekund. Takto malý rozdíl v časech obrábění, potvrzuje, že se elektroda, mezi 1. a 2. dutinou téměř neopotrebovala. Čím menší má elektroda rozdíl v časech obrábění jednotlivých dutin, tím méně se opotřebovává a naopak.

Tabulka 13 Strojní časy jednotlivých grafitů

	[hodina:minuta:sekunda]			
	1.Dutina	2.Dutina	3.Dutina	Σ
HK75	1:41:27	1:39:18	1:37:34	4:58:19
R8710	1:33:46	1:32:01	1:30:59	4:36:46
EDM 1	1:45:00	1:45:11	1:43:11	5:13:17
HK15	1:24:39	1:23:09	1:22:11	4:09:59
R8510	1:32:06	1:31:09	1:30:02	4:33:17
EDM 180	1:33:47	1:31:37	1:29:32	4:35:01

5.2 Rozměrové vyhodnocení jednotlivých typů grafitů

Rozměrové vyhodnocení opotřebení elektrod je dvojího typu. První typ vychází z měření na souřadnicovém měřícím stroji. Elektrody se měřili před a po procesu elektroeroze. Tabulky 14-19 uvádějí naměřené odchylky bodů (elektrod po EDM hloubení) od CAD modelu. Sloupce reprezentují lokaci měřených bodů (čelo, boky a výška ve které byly snímány). Řádky uvádějí konkrétní odchylky. Měrové protokoly z CMM jsou součástí přílohy bakalářské práce. Druhý typ výsledků je z optického měřícího stroje, kde se zjišťovalo opotřebení ostrých hran elektrod a jejich celková délka. Metodika měření je podrobněji popsána v kapitole 4.6 (str. 36).

5.2.1 Grafit HK-75

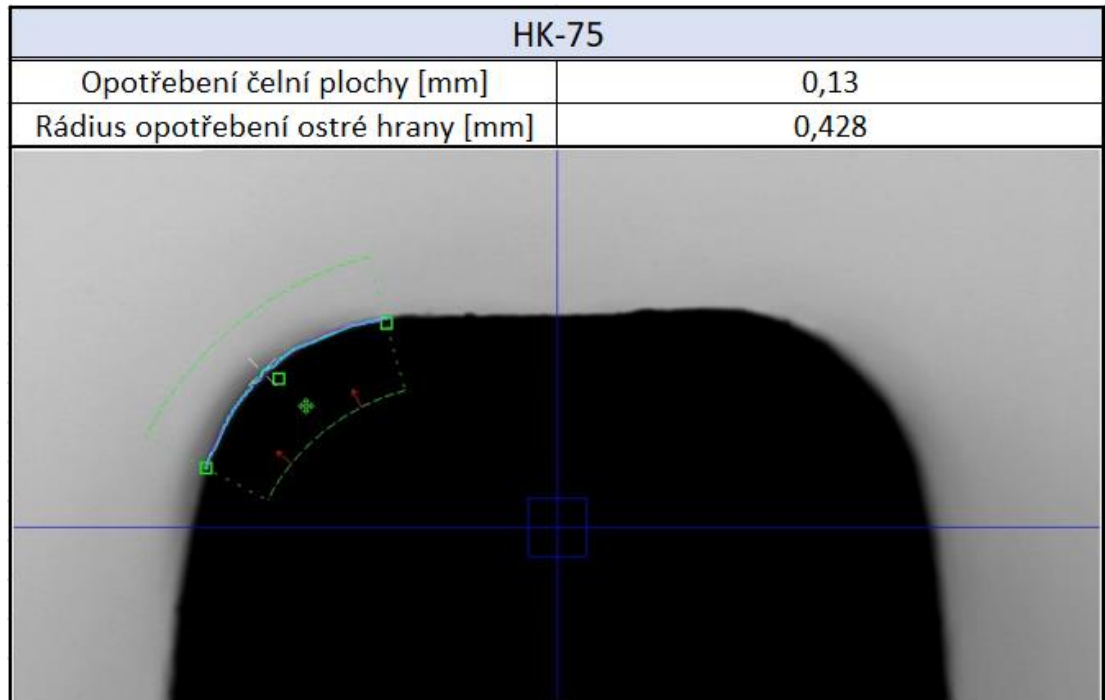
Jedná se o jemnozrnný grafit, který firma do současnosti využívá pro veškeré aplikace. Tento grafit slouží jako „etalon“ pro porovnání s ostatními grafity. Po EDM-1 projevila nejlepší odolnost vůči opotřebení na čele i na bocích.

- Vzorek: A
- Číslo upínače: 008
- Výrobce: Tokai Carbon
- Měření na CMM:

Tabulka 14 Výsledky měření na CMM, grafit HK-75

HK-75			
	Opotřebení na čele z=21	Opotřebení na bocích z=6	Opotřebení na bocích z=18
Odchylky od CAD modelu (nasnímané body) [mm]	0,120	0,008	0,032
			0,016
			0,010
	0,125	0,008	0,027
			0,018
			0,012
Směrodatná odchylka [mm]	0,003	0,000	0,008
Aritmetický průměr [mm]	0,123	0,008	0,019

- Měření na optickém měřicím stroji:



Obrázek 18 Optické měření grafit HK-75

5.2.2 Grafit R8710

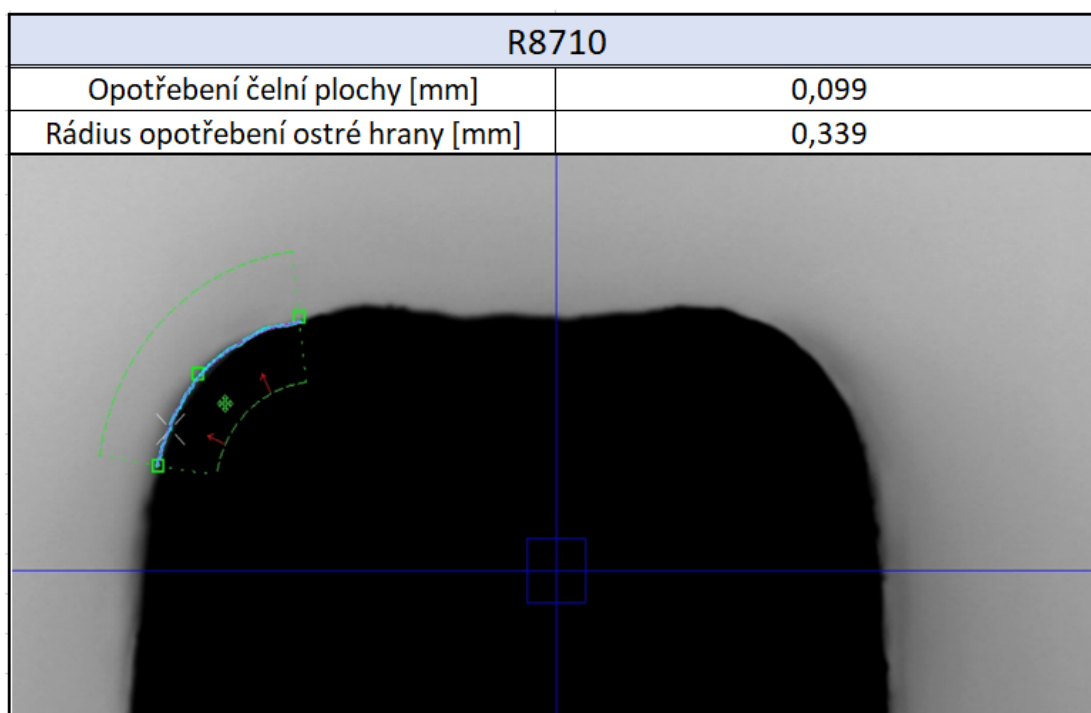
Jedná se o jemnozrnný grafit, který je určen na dokončovací operace. Z kategorie jemnozrnných grafitů, které jsme testovali projevil největší čelní opotřebení, ale nejrychlejší obráběcí čas.

- Vzorek: B
- Číslo upínače: 015
- Výrobce: SGL Carbon
- Měření na CMM:

Tabulka 15 Výsledky měření na CMM, grafit R8710

R8710			
	OPOTŘEBENÍ NA ČELE z=21	OPOTŘEBENÍ NA BOCÍCH z=6	OPOTŘEBENÍ NA BOCÍCH z=18
Odchylky od CAD modelu [mm]	0,159	0,030	0,042
			0,038
			0,036
	0,151	0,037	0,044
			0,037
			0,035
Směrodatná odchylka [mm]	0,004	0,004	0,003
Aritmetický průměr [mm]	0,155	0,034	0,039

- Měření na optickém měřicím stroji:



Obrázek 19 Optické měření grafit R8710

5.2.3 Grafit EDM 1

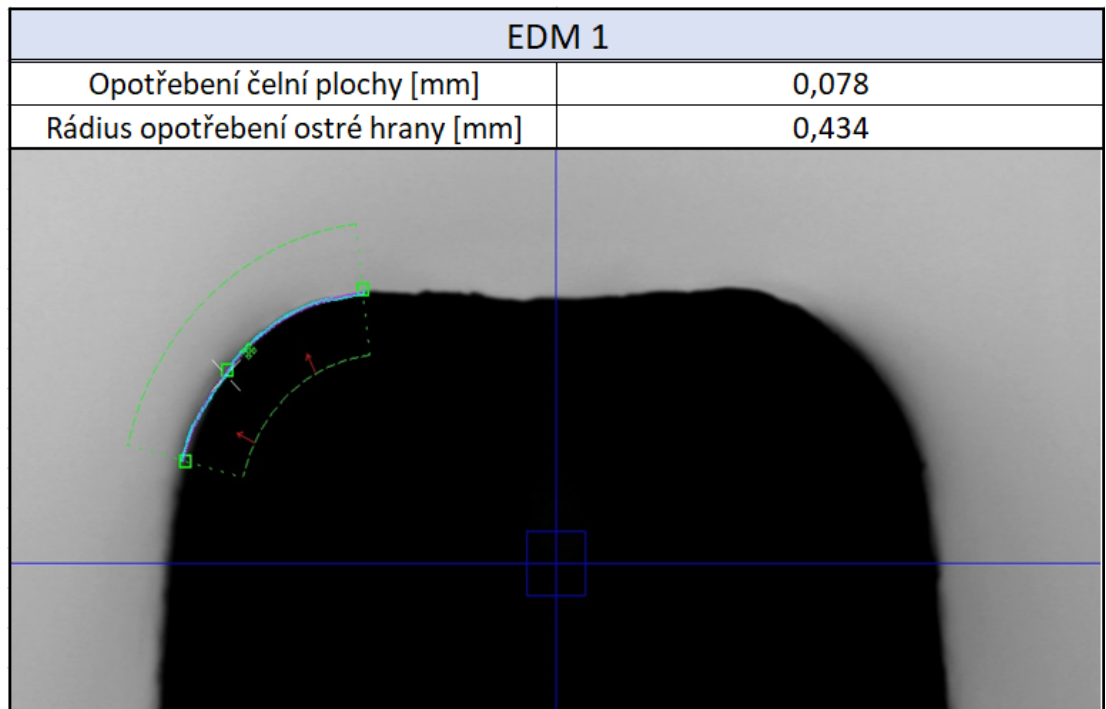
Grafit s velmi jemnou strukturou, který je určen pro větší a složitější elektrody. Při elektroerozi prokazuje skvělou odolnost proti opotřebení a kvalitu povrchu. Oproti ostatním testovaným grafitům je zhruba 3x dražší. V našem experimentu projevil nejlepší vlastnosti z pohledu opotřebení.

- Vzorek: C
- Číslo upínače: 017
- Výrobce: POCO
- Měření na CMM:

Tabulka 16 Výsledky měření na CMM, grafit EDM 1

EDM 1			
	OPOTŘEBENÍ NA ČELE z=21	OPOTŘEBENÍ NA BOCÍCH z=6	OPOTŘEBENÍ NA BOCÍCH z=18
Odchylky od CAD modelu [mm]	0,091	0,011	0,009
			0,006
			0,006
	0,092	0,012	0,009
			0,007
			0,006
Směrodatná odchylka [mm]	0,001	0,001	0,001
Aritmetický průměr [mm]	0,092	0,012	0,007

- Měření na optickém měřícím stroji:



Obrázek 20 Optické měření grafit EDM 1

5.2.4 Grafit HK-15

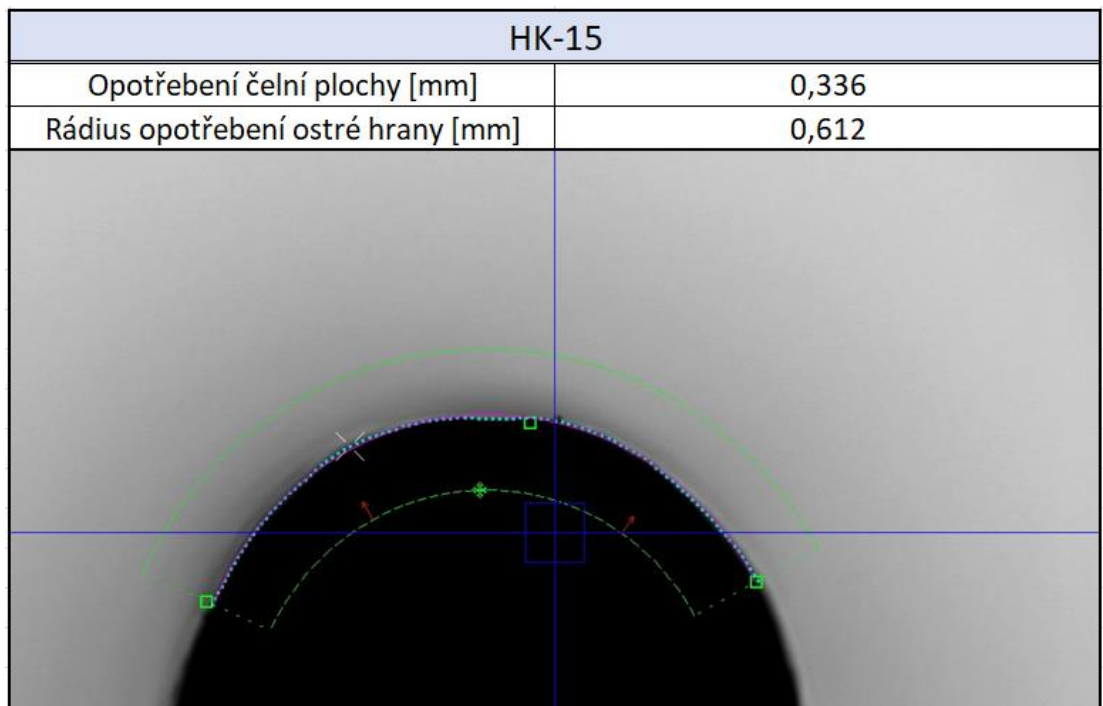
Jedná se o hrubozrný grafit, který v testu projevils největší opotřebení, a to jak na čele, tak na bocích elektrod. Na druhou stranu dokázal obráběcí operace splnit v nejkratším čase.

- Vzorek: D
- Číslo upínače: 018
- Výrobce: Tokai Carbon
- Měření na CMM:

Tabulka 17 Měření na CMM, grafit HK-15

HK-15			
	OPOTŘEBENÍ NA ČELE z=21	OPOTŘEBENÍ NA BOCÍCH z=6	OPOTŘEBENÍ NA BOCÍCH z=18
Odchylky od CAD modelu [mm]	0,298	0,051	0,217
			0,182
			0,185
	0,333	0,052	0,231
			0,185
			0,193
Směrodatná odchylka [mm]	0,018	0,001	0,019
Aritmetický průměr [mm]	0,316	0,052	0,199

- Měření na optickém měřicím stroji:



Obrázek 21 Optické měření grafit HK-15

5.2.5 Grafit R8510

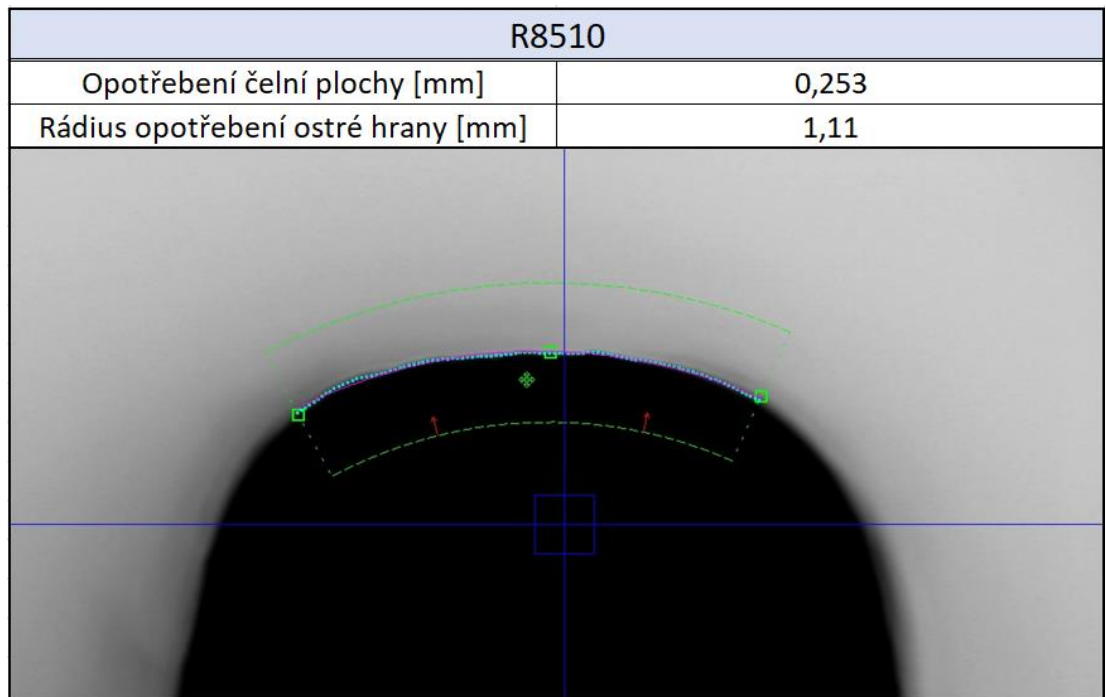
Hrubozrný grafit, který měl oproti ostatním grafitům relativně pomalé obráběcí časy a vyšší opotřebení.

- Vzorek: E
- Číslo upínače: 026
- Výrobce: SGL Carbon
- Měření na CMM:

Tabulka 18 Výsledky měření na CMM, grafit R8510

R8510			
	Opotřebení na čele z=21	Opotřebení na bocích z=6	Opotřebení na bocích z=18
Odchylky od CAD modelu [mm]	0,223	0,032	0,085
			0,089
			0,063
	0,223	0,031	0,107
			0,070
			0,069
Směrodatná odchylka [mm]	0,000	0,001	0,015
Aritmetický průměr [mm]	0,223	0,032	0,081

- Měření na optickém měřícím stroji:



Obrázek 22 Optické měření grafit R8510

5.2.6 Grafit EDM 180

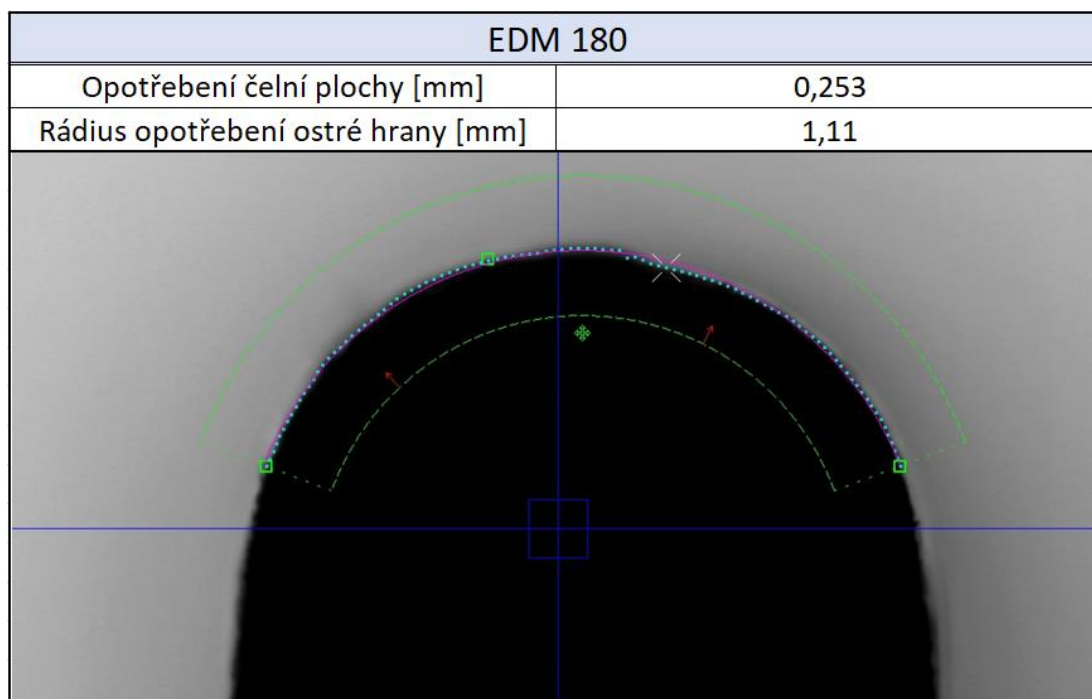
Z kategorie hrubozrnných grafitů projevilo nejmenší opotřebení na čelní ploše a nejdelší čas obrábění. Vlastnostmi se projevilo jako hybrid mezi hrubovacím a dokončovacím grafitem.

- Vzorek: F
- Číslo upínače: 062
- Výrobce: POCO
- Měření na CMM:

Tabulka 19 Výsledky měření na CMM, grafit EDM 180

EDM 180			
	OPOTŘEBENÍ NA ČELE z=21	OPOTŘEBENÍ NA BOCÍCH z=6	OPOTŘEBENÍ NA BOCÍCH z=18
Odchylky od CAD modelu [mm]	0,184	0,041	0,140
			0,120
			0,145
	0,209	0,043	0,129
			0,127
			0,121
Směrodatná odchylka [mm]	0,013	0,001	0,009
Aritmetický průměr [mm]	0,197	0,042	0,130

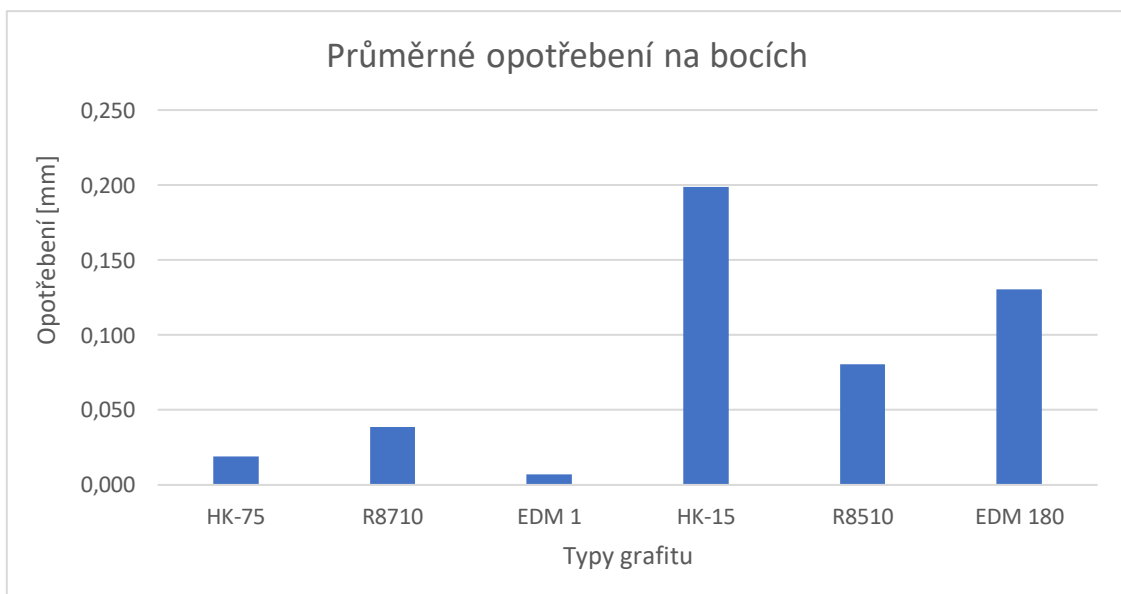
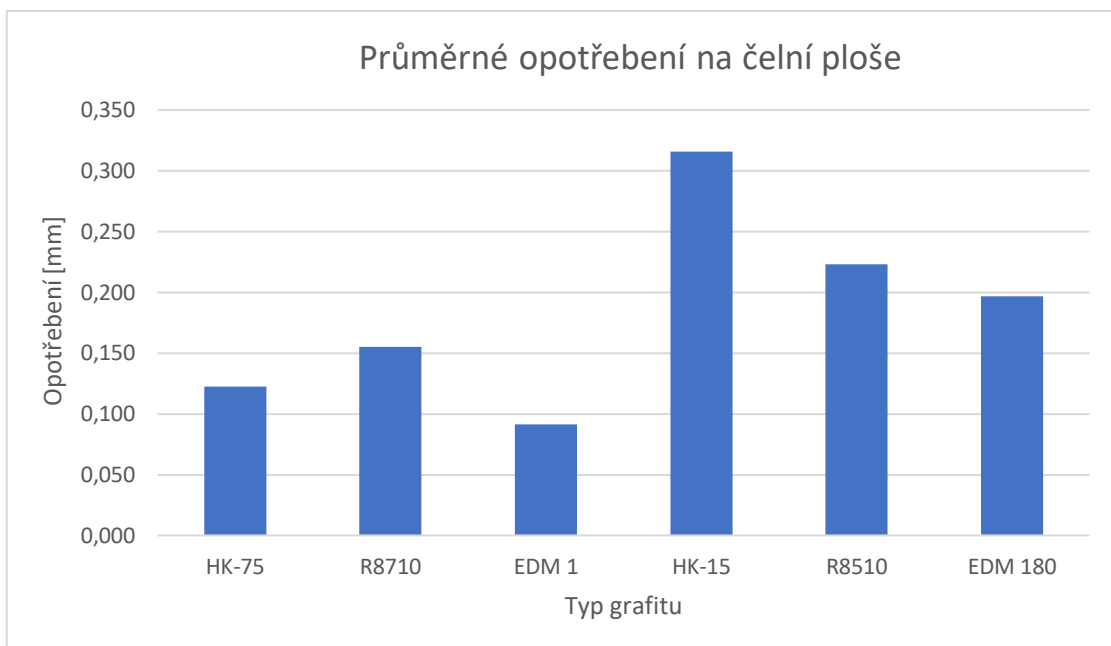
- Měření na optickém měřicím stroji:



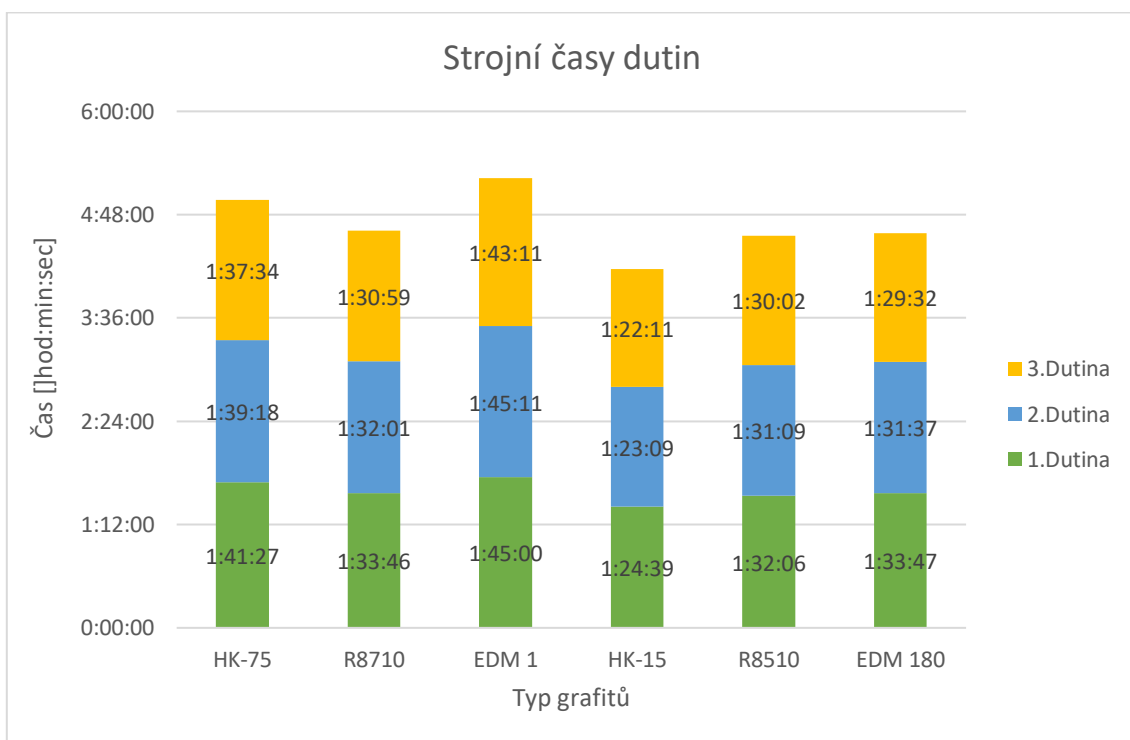
Obrázek 23 Optické měření grafit EDM 180

5.3 Souhrn naměřených dat a grafy

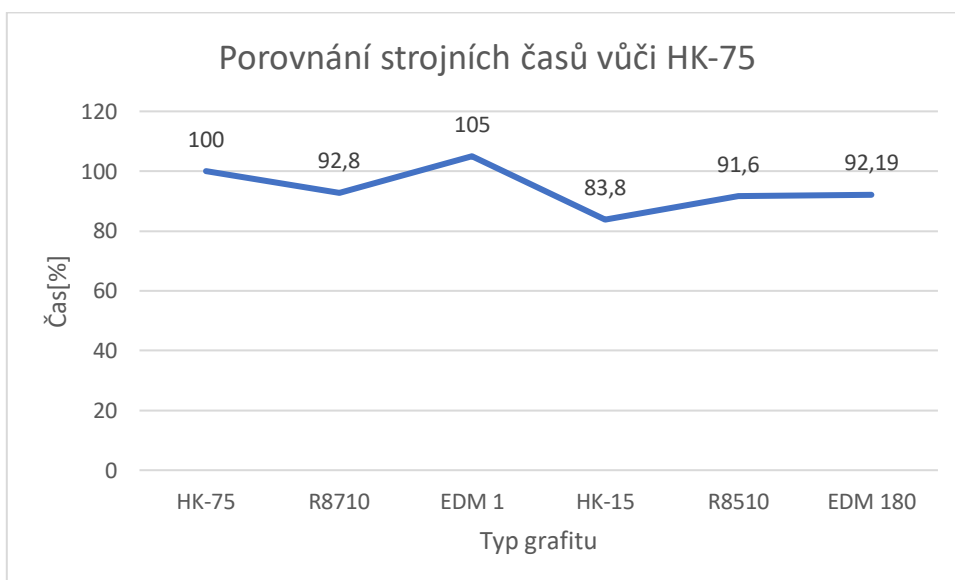
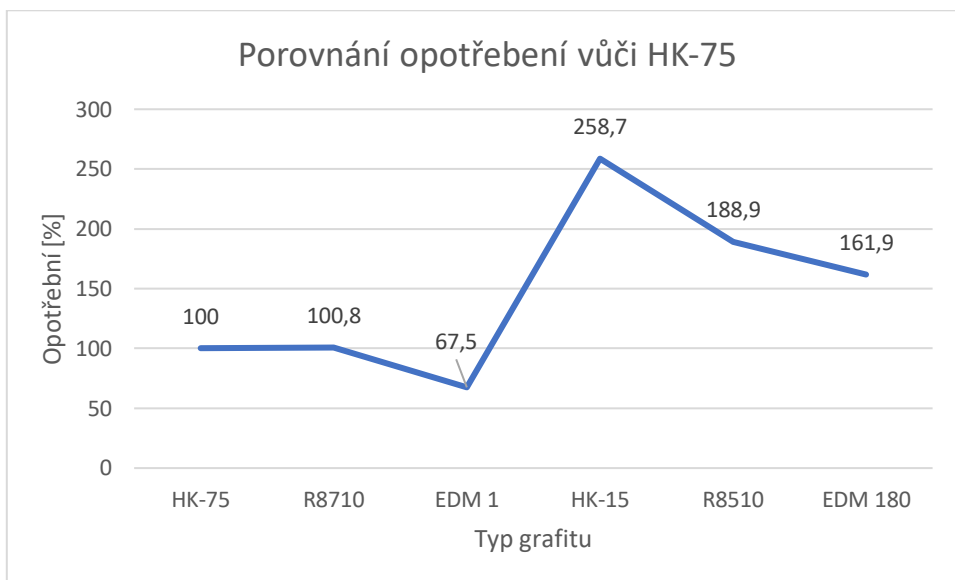
Následující grafy zobrazují průměrné opotřebení grafitových elektrod. Data jsou zprůměrována z hodnot pocházejících z CMM a optického měřicího stroje. Grafy opotřebení na čelní ploše a na bocích se vzájemně kopírují. Zajímavostí je, že grafit R8510 se na bocích opotřeboval výrazně méně než na čele, čímž se lišil od ostatních grafitů.



Následující graf zobrazuje strojní časy elektroerozivního hloubení třech dutin. Nejrychleji zvládl vyhloubit tři dutiny grafit HK-15. Nejdéle trval úkon grafitu EDM 1. U tohoto grafitu se jako jedinému prodloužil čas mezi první a druhou dutinou a to o 11 sekund. To ukazuje na to, že se mezi jednotlivými dutinami téměř neopotřebil. Největší rozdíly mezi 1. a 2. dutinou měly grafity HK-75 a EDM 180 a to 130 a 129 sekund. Mezi 2. a 3. dutinou měl největší rozdíl grafit EDM 180 se 125 sekundami. Celkově elektroerozivní část experimentu trvala přes 28 hodin.



Tyto dva grafy dávají do porovnání naměřená data s grafitem HK-75, který reprezentuje 100 % měřené hodnoty. Jejich výsledky jsou podrobněji popsány v poslední kapitole.



6 Shrnutí experimentální části

Na základě optimalizace výroby jsem se rozhodl naměřené parametry grafitů porovnat s těmi stávajícími. Současně používaný grafit (HK-75) v našem porovnání reprezentoval 100 % měřené hodnoty. Ostatní grafity byly vztaženy právě k tomuto „etalonu“. Výsledné grafy nám poskytly obrázek o tom, jak moc se ovlivní parametry obrábění, při změně materiálu nástrojové elektrody. V případě opotřebení byly mnohem větší procentuální změny mezi jednotlivými grafity než v případě strojních časů. To může být zapříčiněno také tím, že se elektrody používaly na relativně krátký časový úkon.

Největší rychlost obrábění měl grafit HK-15, který vyhloubil dutiny v celkovém čase 4:09:59. Grafit HK-75 měl celkový čas 4:58:19. To je o 26,2 % kratší čas obrábění. V případě delších elektroerozivních operací, nebo většího počtu hrubovacích elektrod může volba tohoto grafitu ušetřit několik hodin, či dokonce dnů obrábění.

Nejmenšího opotřebení dosáhl grafit EDM 1, který byl favoritem a v testu se potvrdila jeho kvalita. Oproti HK-75 dosáhl na čelní ploše o 32,5 % menšího opotřebení. Takto malá hodnota čelního opotřebení může mít za následek potřebu menšího počtu elektrod pro dokončení dutiny v předepsané toleranci. I přes jeho vysokou cenu v porovnání s ostatními, se použití tohoto grafitu v některých případech může vyplatit. Cenu elektrody totiž ve většině případech tvoří nejvíce čas strávený její výrobou. Tento fakt nejvíce platí v případech složitých a geometricky náročných elektrod, které se dlouho obrábí.

Z kategorie jemnozrnných grafitů se v našem experimentu projevil R8710 jako přechod mezi dokončovacím a hrubovacím grafitem. Opotřeboval se více než HK-75, ale zato měl o 7,2 % rychlejší čas. Zároveň je zhruba dvakrát dražší, takže bych jeho následné použití pro dokončovací operace ve firmě nedoporučil. Jak jsem již avizoval grafit HK-15 vyhloubil dutiny nejrychleji. Ostatní dva grafity z kategorie hrubozrnných grafitů R8510 a EDM 180 měli téměř identické časy. Jejich strojní časy se lišily o dvě

minuty, což v sériové výrobě nehraje téměř žádnou roli. Větší rozdíly se daly pozorovat v jejich opotřebení, kde EDM 180 měla v porovnání s naším etalonem o 27 % lepší čelní opotřebení než R8510. Jelikož se jedná o hrubovací grafity, tak zde parametr opotřebení není tolik relevantní.

7 Závěr

V úvodních kapitolách se práce zaměřuje na základní problematiku EDM obrábění. Konkrétně popisuje princip elektroeroze, vlastnosti povrchové vrstvy po EDM obrábění, technologické aplikace a v neposlední řadě se věnuje materiálům používaných pro nástrojové elektrody. Cílem experimentu bylo porovnat různé druhy grafitu s aktuálně používaným a zjistit, zda by bylo vhodné nahradit jej jiným typem. Při tvorbě této práce jsem si uvědomil, že nelze vybrat pouze jeden typ grafitu, který je nejlepší na veškeré použití. Tato práce nakonec vytvořila jakousi „mapu“ toho, pro jaké aplikace je optimální použít konkrétní typ grafitu.

Z pohledu opotřebení elektrod nejlépe obstál grafit EDM 1, který oproti současně používanému grafitu HK-75 projevil o 32,5 % menší čelní opotřebení. Tento grafit je cca 4x dražší než náš etalon. Grafit EDM 1 je vhodný pro dokončovací a tvarově složitě elektrody, které se dlouho vyrábí. V těchto případech totiž cenu elektrody nejvíce ovlivňuje čas strávený její výrobou. Malá hodnota opotřebení může vyústit v menší počet potřebných elektrod na dokončení dutiny v předepsané toleranci, a tak místo toho, aby se vyrobily například elektrody tři, stačí pouze jedna. Naopak pro geometricky jednodušší elektrody se nejvíce vyplatí použít grafit HK-75. Právě v těchto případech se poměr ceny výroby elektrody přesune na stranu ceny polotovaru. V experimentu sice HK-75 prokázal horší opotřebení než EDM 1, nicméně s jeho čtvrtinovou cenou se velice osvědčil, a tak se potvrdilo, že jeho dosavadní používání nebylo velikou chybou.

Z hlediska rychlosti obrábění vyhrál grafit HK-15. Tři dutiny vyrobil za 4:09:59. Grafit HK-75 měl celkový čas 4:58:19. To je o 26,2 % kratší čas obrábění. V případech, kdy

se odebírání velké množství materiálu může použití tohoto grafitu ušetřit několik hodin, či dnů obrábění.

V případě výroby dutiny, kde je potřeba odebrání velkého objemu materiálu, je vhodné použít kombinaci hrubovacího grafitu HK-15 s větší GAP mezerou a dokončovacího EDM 1 s menší GAP mezerou. Naopak při dokončování předobrobené dutiny bych doporučil použít jemnozrnný grafit EDM 1, nebo HK-75. Výběr mezi těmito dvěma grafity bych volil především na základě počtu a složitosti vyráběných elektrod.

8 Bibliografie

- [1] A. G. Nipum Gautam, „Study of various optimization techniques for electric discharge,“ *Department of Mechanical Engineering Manipal University*, pp. 2-4, 2022.
- [2] P. Petr, „Elektroerozivní obrábění,“ 2006. [Online]. Available: <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-obrabeni>.
- [3] P. j. Kocman Karel, *Technologie obrábění*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001.
- [4] M. Rudolf, *Nekonvenční metody obrábění*, Plzeň: Západočeská univerzita, 1999.
- [5] B. Jaroslav, *Nekonvenční metody obrábění*, Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [6] E. C. Jameson, „Electrical discharge machining,“ *Society of Manufacturing Engineers*, č. 978-0-87263-521-0, 2001.
- [7] Z. K. Jaroslav Řasa, „Nekonvenční metody obrábění,“ 2007. [Online]. Available: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>.
- [8] www.vdi3400.com, „Making by EDM or Laser or Sandblasting or Etching on mold cavity surface to be achieved,“ [Online]. Available: <http://www.vdi3400.com/>.
- [9] www.ecomolding.com, „VDI 3400 Mold Texture and Drafting Angle,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.ecomolding.com/vdi-3400-texture/>.

- [10] L. L. d. L. A. L. U. B. J.A. Sanchez, „Dimensional accuracy optimisation of multi-stage planetary EDM,“ *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002.
- [11] D. D. Marco Boccadoro, „About the Application of Fuzzy Controllers in High-Performance Die-Sinking EDM Machines,“ 1995.
- [12] F. M. S. A. K. a. D. V. KLOCKE, „Analysis of material removal rate and electrode wear in sinking EDM,“ 2013.
- [13] M. Z. K. B. R. B. I. A. K. Sanjay Sundriyal, „Study on different types of electric discharge Machining Methods,“ 2021.
- [14] GF Machining Solutions, „www.gfsm.com,“ 2019. [Online]. Available: https://www.gfms.com/cs-cz/machines/edm/wire-cutting.html?gclid=CjwKCAjw9qiTBhBbEiwAp-GE0cjWSLGyApL0YwEavBP4i2FWC4a0Wmm2eG0ABEX2UQUI8wASnu6LDhoCAEEQAvD_BwE.
- [15] S. K. K. A. G. N. N. G. Naveen Kumar, „Study on various parameters of WEDM using different optimization techniques,“ 2022.
- [16] fanuc.eu, „Elektroerozivní drátová řezačka ROBOCUT,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/robocut-ib>.
- [17] B. Pfluger, „Makino EDM,“ 2014. [Online]. Available: https://www.metaalmagazine.nl/wp-content/uploads/2015/02/Makino_EDM_White_Paper_Final-1.pdf.
- [18] R. H. M. M. M. Risto, „Optimization of the EDM Drilling Process to Increase the Productivity and Geometrical Accuracy,“ *Procedia CIRP*, 2016.
- [19] „penta-edm,“ 2018. [Online]. Available: <https://penta-edm.cz/project/grafit/>. [Přístup získán 29 3 2022].
- [20] C. C. Ali Ozgedik, „An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining,“ 2003.

- [21] T. & H. C. & T. R. & L. C. & D. J. M. & L. A. & A. F. Czelusniak, „Materials used for sinking EDM electrodes: a review,“ *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019.
- [22] K. R. M. R. Bholá Jha, „An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining,“ 2011.
- [23] B. L. K. R. B. S. M. Kunieda, „Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process,“ *CIRP Annals*, 2005.
- [24] R. Kern, „ Sinker electrode material selection. EDM Today.,“ 2008.
- [25] S. S. Carl Sommer, *The complete EDM handbook*, 2017.
- [26] moldmakingtechnology.com, „moldmakingtechnology.com,“ 2014. [Online]. Available: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/graphite-or-copper-part-1>.
- [27] matweb.com, „Copper,“ [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9aeb83845c04c1db5126fada6f76f7e>. [Přístup získán 2022].
- [28] www.matweb.com, „Carbon,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3f64b985402445c0a5af911135909344&ckck=1>.
- [29] www.matweb.com, „Overwief of materials for brass,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d3bd4617903543ada92f4c101c2a20e5&ckck=1>.
- [30] Novick.eu, „Types od EDM electrode materials,“ [Online]. Available: <https://www.novick.eu/cs/noviform-cnc-die-sinking/key-factors-of-edm-electrode-selection>.
- [31] matweb.com, „Tungsten, W,“ [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=41e0851d2f3c417ba69ea0188fa570e3&ckck=1>.

- [32] matweb.com, „NAECO® ELKON® R25 Copper Tungsten RWMA Class 11,“ [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fffe3b75c87f4158b6b9046498928d89>.
- [33] www.matweb.com, „Silver, Ag,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=63cbd043a31f4f739ddb7632c1443d33&ckck=1https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=63cbd043a31f4f739ddb7632c1443d33&ckck=1>.
- [34] www.matweb.com, „Aluminium, Al,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=0cd1edf33ac145ee93a0aa6fc666c0e0&ckck=1>.
- [35] S. E. S. Ahsan Ali Khan, „WEAR CHARACTERISTICS OF COPPER AND ALUMINUM ELECTRODES DURING EDM OF STAINLESS STEEL AND CARBIDE,“ 2005.
- [36] „www.tedok.cz,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.tedok.cz/edm-grafity/tabulka-spravne-volby-grafitu/>.
- [37] „tokaicarbon.eu,“ 2019. [Online]. Available: <http://en.tokaicarbon.eu/applications/edm>. [Přístup získán 3 29 2022].
- [38] www.ops-ingersoll.de, „Gebrauchsmaschinen,“ [Online]. Available: <https://www.ops-ingersoll.de/-229.html>.
- [39] www.novick.eu, „Die Sinking electrical discharge machines,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.novick.eu/nl/noviform-cnc-die-sinking/noviform-cnc-series-die-sinking-machines>.
- [40] wedm.cz, „trubickove-elektrody,“ [Online]. Available: <https://www.wedm.cz/spotrebni-material/trubickove-elektrody/>.

9 Seznam obrázků

Obrázek 1 Jednotlivé fáze elektroeroze [5]	13
Obrázek 2 Tepelně ovlivněné vrstvy. [7]	15
Obrázek 3 Etalon drsností podle normy VDI3400 [8]	16
Obrázek 4 Proces hloubení [39]	19
Obrázek 5 Elektroerozivní hloubící stroj [11]	19
Obrázek 6 Proces řezu [vlastní zdroj]	20
Obrázek 7 Elektroerozivní drátová řezačka Fanuc Robocut [16]	20
Obrázek 8 Příprava na vrtání startovacích otvorů pro EDM řezání [Vlastní zdroj]	22
Obrázek 9 Vysokorychlostní EDM vrtačka-PENTA 2030 [19]	22
Obrázek 10 Trubičkové elektrody [40]	26
Obrázek 11 Vzorková deska	34
Obrázek 12 Model vzorkové desky	34
Obrázek 13 Pokusná elektroda	35
Obrázek 14 Model pokusné elektrody	35
Obrázek 15 Body snímané na elektrodě	38
Obrázek 16 Měření elektrody na CMM	38
Obrázek 17 Body snímané na bocích elektrod před EDM obráběním	38
Obrázek 18 Optické měření grafit HK-75	44
Obrázek 19 Optické měření grafit R8710	45
Obrázek 20 Optické měření grafit EDM 1	47
Obrázek 21 Optické měření grafit HK-15	48
Obrázek 22 Optické měření grafit R8510	50
Obrázek 23 Optické měření grafit EDM 180	51

10 Seznam tabulek

Tabulka 1 Převodní tabulka mezi VDI3400 a Ra [9]	17
Tabulka 2 Vlastnosti mědi [27]	25
Tabulka 3 Vlastnosti grafitu [28]	26
Tabulka 4 Vlastnosti mosazi [29].....	26
Tabulka 5 Vlastnosti wolframu	27
Tabulka 6 Vlastnosti CuW [30]	27
Tabulka 7 Vlastnosti stříbra [33]	277
Tabulka 8 Vlastnosti hliníku [30]	277
Tabulka 9 Vlastnosti grafitů podrobených testem [36][37][19]	31
Tabulka 10 Systém značení upínek	31
Tabulka 11 Nastavení obráběcích režimů	38
Tabulka 12 Ceny grafitu	39
Tabulka 13 Strojní časy jednotlivých grafitů	40
Tabulka 14 Výsledky měření na CMM, grafit HK-75	41
Tabulka 15 Výsledky měření na CMM, grafit R8710	43
Tabulka 16 Výsledky měření na CMM, grafit EDM 1	27
Tabulka 17 Výsledky měření na CMM, grafit R8510	46
Tabulka 18 Výsledky měření na CMM, grafit HK-15	47
Tabulka 19 Výsledky měření na CMM, grafit EDM 180.....	49