



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ELEKTROISKROVÉ DRÔTOVÉ REZANIE

WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Michal GVIZD

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Karel OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Michal Gvizard

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

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

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

Elektrojiskrové drátové řezání

v anglickém jazyce:

Wire electrical discharge machining

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešerše principu elektrojiskrového obrábění. Statistické porovnání naměřených rozměrových odchylek a kvality povrchu.

Cíle bakalářské práce:

Úvod.

Rozbor principu elektrojiskrového obrábění.

Experimentální získání rozměrových dat a údajů kvality povrchu.

Statistické vyhodnocení rozměrových údajů.

Statistické vyhodnocení kvality povrchu.

Výsledné doporučení uživateli.

Závěr.

Seznam odborné literatury:

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vydanie, Košice: Vienala, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

BARCAL, Jaroslav. Nekonenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT, Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989

KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 1. vydání Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 28.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto práca vypracovaná v rámci bakalárskeho štúdia sa zaoberá elektroiskrovým drôtovým rezaním nástrojovou elektródou a jeho využitím v priemysle. Práca je rozdelená do dvoch základných častí, a to teoretickej a experimentálnej.

Teoretická časť opisuje historický vývoj, vysvetľuje základný princíp a podstatu tohto nekonvenčného spôsobu obrábania s popisom metód, využívajúcich túto technológiu. Práca je zameraná na elektroiskrové drôtové rezanie, preto sú hĺbiace stroje spomenuté len okrajovo. V tejto časti sú následne podrobnejšie vysvetlené používané drôtové elektródy, hlavné časti stroja, rezné podmienky a výhody tejto technológie.

Experimentálna časť je zameraná na vyhodnotenie rezných plôch vzorových súčiastok, s ohľadom na rozmerovú presnosť, kvalitu povrchu a popis činiteľov, ktoré tieto charakteristiky ovplyvňujú. Dôraz je pritom kladený na obrábanie nástrojových ocelí.

Záver je venovaný rozboru zozbieraných meraní, ich technologicko-ekonomickému rozboru a načrtnutiu smeru vývoja možností tejto nekonvenčnej technológie delenia materiálu.

Kľúčové slová

EDM, WEDM, elektroerozívne obrábanie, elektroiskrové drôtové rezanie, drôtová elektróda, drôtová rezačka, nekonvenčné technológie, dielektrikum

ABSTRACT

Bachelor thesis elaborated during the bachelor study discusses the electrical discharge cutting of materials with a wire electrode and its usage in industry. The thesis is divided into two fundamental parts –the theoretical and the experimental one.

The theoretical part describes the historical development, explains the basic principle and fundamentals of this unconventional way of machining with the definition of methods using this technology. The thesis is focused on the electrical discharge machining, thus gougers are mentioned only peripherally. Afterwards, the wire electrodes used, main machine parts, cutting conditions and advantages of this technology are analyzed in detail.

The experimental part deals with the evaluation of cutting surfaces of the sample components with respect to dimension accuracy, surface quality and describes factors which affect these characteristics. The emphasis is put on the machining of the tool steel.

Conclusion discusses the analysis of the assembled measurements, their technological/economical analysis and outlines the direction of development in the possibilities of this unconventional technology of material separation.

Key words

EDM, WEDM, electrical discharge machining, wire electrical discharge machining, wire electrode, wire cutting machine, unconventional technologies, dielectric

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

GVIZD, Michal. *Elektroiskrové drôtové rezanie*. Brno 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 72 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Osička, Ph.D..

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Týmto prehlasujem, že predkladanú bakalársku prácu na tému Elektroiskrové drôtové rezanie som vypracoval samostatne, s využitím uvedenej odbornej literatúry a prameňov uvedených v priloženom zozname, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho bakalárskej práce.

Dňa 23.5. 2013

Michal Gvizard

POĎAKOVANIE

Ďakujem týmto **Ing. Karlovi Osičkovi, Ph.D** za profesionálne vedenie, cenné rady a odborné pripomienky a taktiež za čas, ktorý mi venoval pri tvorbe bakalárskej práce.

Taktiež ďakujem zamestnancom firmy **VN – Ú, s.r.o. Vsetín** za možnosť realizácie a podporu pri vypracovaní praktickej časti.

Ďalej ďakujem pracovníkom a zamestnancom spoločnosti **GF AgieCharmilles s.r.o.** za poskytnutie podkladov, informácií a konzultácií.

OBSAH

ABSTRAKT	4
ČESTNÉ PREHLÁSENIE	6
POĎAKOVANIE	7
OBSAH	8
ÚVOD	10
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ELEKTROISKROVÉHO DRÔTOVÉHO REZANIA	11
1.1 Nekonvenčné metódy	11
1.1.1 Rozdiely medzi konvenčnými a nekonvenčnými metódami	11
1.1.2 Rozdelenie a charakteristika nekonvenčných metód	11
1.2 Počiatky a vývoj elektroerózie	14
1.2.1 Vývoj EDM v Sovietskom zväze.....	14
1.2.2 Vývoj EDM v Spojených štátoch amerických.....	15
1.2.3 Stručný vývoj EDM v nasledujúcich rokoch.....	16
2 PRINCÍP ELEKTROISKROVÉHO DRÔTOVÉHO REZANIA	18
2.1 Princíp elektroerozívneho obrábania	18
2.1.1 Časový priebeh jednotlivých fáz.....	19
2.1.2 Charakteristika elektrických výbojov počas EDM obrábania	21
2.1.3 Generátory elektrických výbojov pre EDM obrábanie.....	23
2.1.4 Pracovné prostredie – dielektrikum	23
2.1.5 Nástrojové elektródy	25
2.2 Elektroiskrové drôtové rezanie	27
2.3 Fyzikálno – technologický princíp elektroiskrového drôtového rezania.....	27
2.4 Generátory pre WEDM rezanie	29
2.5 Pracovné prostredie – dielektrikum pri WEDM rezaní	29
2.6 Nástrojové elektródy pri elektroiskrovom drôtovom rezaní.....	31
2.7 Technické parametre elektroiskrového drôtového rezania	32
2.8 Podmienky elektroiskrového drôtového rezania.....	33
2.8.1 Materiál a výška polotovaru	33
2.8.2 Typ a priemer drôtu	33
2.8.3 Typ obrábania	34
2.8.4 Výsledná presnosť a kvalita.....	34
2.9 Stroje pre elektroiskrové drôtové rezanie	35
2.9.1 Rám stroja	36

2.9.2	Systém vedenia drôtovej elektródy.....	36
2.9.3	Upínací systém.....	37
2.9.4	CNC riadiaci systém a pohyb súradnicových osí	38
2.9.5	Systém dodávania, filtrácie a chladenia dielektrika.....	38
2.10	Zhrnutie výhod, možností a nevýhod WEDM rezania	39
3	EXPERIMENTÁLNE ZÍSKANIE ROZMEROVÝCH DÁT A ÚDAJOV KVALITY POVRCHU	42
3.1	WEDM rezanie pri získavaní experimentálnych vzoriek.....	42
3.2	Parametre obrábacieho stroja.....	42
3.3	Technológia rezania na stroji AGIECUT 200	43
3.4	Použitý materiál	44
4	ŠTATISTICKÉ VYHODNOTENIE ROZMEROVÝCH ÚDAJOV	47
4.1	Odchýľky obrábaných plôch.....	47
4.2	Vyhodnotenie experimentálnych vzoriek	47
4.3	Vyhodnotenie experimentálnych vzoriek pomocou metódy T_{km}	49
4.4	Štatistická interpretácia pri vyhodnotení experimentu	50
4.5	Štatistické spracovanie nameraných hodnôt rozmerov.....	52
5	ŠTATISTICKÉ VYHODNOTENIE KVALITY POVRCHU	55
5.1	Parametre štruktúry Ra a Rz	55
5.2	Výsledná kvalita povrchu	56
5.3	Štatistické spracovanie nameraných hodnôt Ra a Rz	56
	DISKUSIA.....	60
	ZÁVER	61
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	62
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	64
	ZOZNAM PRÍLOH.....	67

ÚVOD

Tradičné obrábacie metódy nie sú v mnohých prípadoch vhodné alebo sa vôbec nedajú použiť pri súčasných požiadavkách výroby. Rastúce nároky na konštrukciu súčiastok používaných v strojárskom priemysle, využívanie nových, ťažko obrábateľných materiálov a tvarová zložitosť foriem a nástrojov sú príčinou zavádzania a postupného rozširovania nekonvenčných metód obrábania.

Pod týmto zaužívaným súhrnným názvom rozumieme obrábacie spôsoby, ktoré na rozdiel od mechanickej práce k odberu materiálu používajú niektorý z fyzikálnych alebo fyzikálno-chemických princípov. Všeobecne platí, že materiál nástroja nemusí byť výrazne kvalitnejší než obrobok a tým rýchlosť a produktivita nezávisia na jeho mechanických parametroch.

Medzi nekonvenčné metódy zaraďujeme aj elektroiskrové drôtové rezanie. Tento výrobný spôsob je starý iba niekoľko desaťročí. Jeho hromadnejší rozmach nastal koncom 60. a v 70. rokoch 20. storočia. Zavádzanie drôtových rezačiek do vtedajších nástrojární viedlo k zjednodušeniu a zefektívneniu výroby strižných nástrojov. V súčasnosti zaujíma táto metóda 4. miesto vzhľadom na celkové množstvo obrábaných súčastí, a to za sústružením, frézovaním a brúsením.

Rýchly nárast produktivity tejto technológie je spomaľovaný niekoľkými limitujúcimi faktormi, ktorými sú napríklad potreba elektrickej vodivosti materiálu a aj napriek dlhoročnému znižovaniu nákladov finančná náročnosť strojov a výroby.

Napriek niekoľkým obmedzeniam je len veľmi málo aspektov, ktoré by prekážali vo využívaní tejto nekonvenčnej technológie obrábania pri výrobe širokého množstva súčastí. Aj to je dôvodom, prečo je táto metóda považovaná za jednu z najproduktívnejších a často nenahraditeľných. Rezanie drôtovou elektródou má mnoho výhod a to predovšetkým to, že rezným nástrojom je v tomto prípade tenký drôt, ktorý sa neustále odvíja a prechádza miestom rezu, čím nedochádza k zmene geometrie nástroja. Ďalšími výhodami tejto metódy sú rezanie veľmi zložitých tvarov, možnosť výroby malých rádiusov, najmä vnútorných a veľmi dobré výsledky pri rezaní nástrojových ocelí a spekaných karbidov.

Drôtové rezačky počas svojho vývoja prešli obrovským zdokonalením. Najvýraznejšie zefektívnenie nastalo so zavádzaním počítačovej techniky, a to z hľadiska presnosti rezných plôch a optimalizácie parametrov celého procesu. Od ich hromadného rozšírenia v 70. rokoch vzrástol ich výkon približne osemnásobne. Za týmto všetkým môžeme vidieť snahu výrobcov o zatraktívnenie ponúkaných produktov a konkurenčný boj medzi výrobcami. Na trhu je hneď niekoľko významných výrobcov: AgieCharmilles, Fanuc, Sodick, Ona, ale aj menej rozšírené Mitsubishi, Makino, Chmer a ďalší.

Zadanie tejto bakalárskej práce je zamerané na rozbor princípu elektroiskrového drôtového rezania, výrobu a technologické zhodnotenie experimentálnych vzoriek s cieľom overiť rozmerovú presnosť, odchýlky a povrchovú drsnosť, následne vytvoriť z týchto údajov štatistický súbor na určenie strednej hodnoty. Jeden z najdôležitejších parametrov výroby je rezná rýchlosť, čiže pre elektroiskrové drôtové rezanie rýchlosť posuvu drôtu v mieste vyiskrovania. Vyhodnotením jednotlivých časov a ich porovnaním so simulátorom môžeme určiť efektívnosť a ekonomickosť výrobného procesu.

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ELEKTROISKROVÉHO DRÔTOVÉHO REZANIA

1.1 Nekonvenčné metódy

V technológií obrábania sa pod prívlastky „nekonvenčný, netradičný“ zaraďujú technológie opracovania materiálov, ktoré nepoužívajú „klasický“ rezný nástroj s určitou alebo neurčitou reznou hranou (podľa toho či ide o rezanie alebo brúsenie), ale využíva k odberu materiálu pôsobenie rôznych fyzikálnych alebo chemických javov. Pri takomto odbere materiálu nevznikajú klasické triesky, ale pôsobenie obrábacieho stroja je bezsilové, čím nemôžeme používať pojem opotrebenie nástroja ako pri tradičných obrábacích metódach. Nekonvenčné metódy obrábania sa rozvíjajú najmä vďaka potrebe obrábať materiály s vysokou tvrdosťou, húževnatosťou, pevnosťou a inými parametrami, ktoré sú konevnčnými, klasickými metódami obrábania obrobiteľné len veľmi ťažko. [1]

1.1.1 Rozdiely medzi konvenčnými a nekonvenčnými metódami

Elektroiskrové drôtové rezanie sa zaraďuje medzi progresívne, resp. nekonvenčné metódy obrábania. Všeobecne do tejto skupiny zaraďujeme spôsoby výroby technológiami, ktoré sa rozvíjali v druhej polovici 20. storočia a ktorých nástroje nepôsobia na obrobok mechanicky, ale majú za úlohu produkovať špecifickú formu energie, ktorá v materiál obrobku vyvoláva erozívne účinky a tým spôsobuje oddelenie materiálu. [1]

Hlavné podmienky pre tradičné spôsoby obrábania sa dajú zhrnúť tromi základnými bodmi:

- materiál nástroja musí byť tvrdší ako materiál obrábaný,
- pri obrábaní sa používa mechanická energia na porušenie molekulárnej súdržnosti materiálu,
- aby bolo možné materiál obrábať, musí sa energia zdroja (napr. elektrický prúd) premeniť na mechanickú energiu. [1]

Na rozdiel od tradičných metód sa pri nekonvenčných spôsoboch obrábania využíva nasledovné:

- v mieste oddeľovania častíc materiálu nevzniká rezný odpor, rezná sila, obrobky sa nedeformujú vplyvom mechanickej energie,
- úbytok materiálu nezávisí na mechanických vlastnostiach materiálu ako tvrdosť, pevnosť, húževnatosť a klasický pojem obrobiteľnosť stráca svoj význam,
- úbytok materiálu – oddeľovanie častíc je počas jedného cyklu a dochádza k nemu na veľkom počte lokalít súčasne. [1]

1.1.2 Rozdelenie a charakteristika nekonvenčných metód

Nekonvenčné metódy delenia materiálu rozdeľujeme podľa ich podstaty na 3 základné skupiny:

a) *Oddelovanie obrábaného materiálu tepelným účinkom:*

1. Elektroerozivné obrábanie (Electro Discharge Machining – EDM):

- elektroerozivné hĺbenie,
- elektroiskrové drôtové rezanie,
- elektroerozivné mikrodierovanie,
- anodomechanické rezanie,
- elektrokontaktné rezanie,
- elektroerozivné nanášanie povlakov. [1, 2]

2. Obrábanie zväzkami lúčov plazmy (Plasma Beam Machining – PBM):

- základný princíp plazmového obrábania je založený na tavení a následnom odparovaní materiálu obrobku pri teplotách rádovo v rozmedzí 10 000 až 30 000 °C. Plazma je zložená z voľných mikročastíc. Ako pracovný plyn sa zvyčajne používa vzduch, argón, vodík, dusík a ich zmesi,
- *použitie*: najčastejšie k rozrezávaniu ťažkoobrobiteľných ocelí a zliatin neželezných kovov. [2, 3]

3. Obrábanie laserovým lúčom (Laser Beam Machining – LBM):

- k úbytku materiálu dochádza účinkom úzkeho lúča silného monochromatického svetla sústredeného na veľmi malú plošku. Svetelný lúč pri dopade na jednotlivé vrstvy materiálu premení svoju energiu na tepelnú, pričom dosahovaná teplota sa pohybuje rádovo okolo 10 000 °C,
- *použitie*: značenie a popisovanie materiálov a súčiastok, rozrezávanie ťažkoobrobiteľných ocelí a zliatin, výroba prievlekov pre ťahanie tenkých drôtov, rezania tenkostenných rúrok, výroba trysiek karburátorov, súčiastky mikroelektroniky. [2, 3]

4. Obrábanie zväzkom lúčov elektrónov (Elektron Beam Machining–EBM):

- k obrábaniu sa používa sústredený, urýchlený zväzok elektrónov, ktorý predáva svoju kinetickú energiu častíc pri dopade na materiál vo forme tepla. Dochádza k lokálnemu prehriatiu, nateniu a prípadne aj následnému odpareniu tohto materiálu,
- *použitie*: letecký a kozmický priemysel, zhotovovanie dier a štrbín v kovových fóliách, výroba polovodičov, vrstvových odporov a mikroelektronických súčiastok, výroba hubíc pre chemický priemysel, vŕtanie dier malých rozmerov. [2, 3]

b) Oddelovanie obrábaného materiálu elektrochemickým alebo chemickým účinkom:

1. Elektrochemické obrábanie (Electro Chemical Machining – ECM):

- k oddelovaniu materiálu dochádza anodickým rozpúšťaním v elektrolytickom roztoku, čiže elektrolýzou, kedy nástrojom je katóda a anóda je obrobok. Jednosmerný prúd o nízkom napätí rozpúšťa materiál obrobku,
- *použitie*: obrábanie ťažkoobrobiteľných ocelí (najmä kalených), žiaruvzdorných zliatin, tvarových plôch a hĺbenie dutín foriem a zápustkov. [2, 3]

2. Chemické obrábanie (Chemical Machining – CM):

- podstatou je riadené odleptávanie vrstiev materiálu o veľmi malej hrúbke s hodnotami pohybujúcimi sa od niekoľkých desiatok mikrometrov až po niekoľko milimetrov z povrchu obrobku. Proces je založený na využívaní vzájomných chemických reakcií materiálu obrobku a pracovného prostredia, ktorým najčastejšie býva kyselina alebo hydroxid,
- *použitie*: pri odbere malých vrstiev materiálu a veľkých plošných rozmeroch obrábaného polotovaru, časté využitie pri obrábaní hliníku a jeho zliatin, nehrdzavejúcich ocelí, mosadze, mede, titánu a iných materiálov. [2, 3]

c) Oddeľovanie obrábaného materiálu mechanickým účinkom:

1. Ultrazvukové obrábanie (Ultrasonic Machining – USM):

- k obrábaniu sa využíva energia ultrazvukových kmitov. Najčastejšími metódami sú ultrazvukové nárazové brúsenie a rotačné obrábanie ultrazvukom,
- *použitie*: ultrazvukové nárazové brúsenie – obrábanie tvrdých krehkých materiálov ako je sklo, keramika (rezné keramické doštičky), kremík, ferity, spekané karbidy, grafit apod.; rotačné obrábanie ultrazvukom – iba pre opracovávanie nekovových materiálov ako je guma, kremeň, sklo, zafír, keramika apod.. [2, 3]

2. Obrábanie vodným prúdom (Water Jet Machining – WJM):

- technológia obrábania je založená na využívaní abrazívnych účinkov vodného prúdu. Rezným nástrojom je prúd vody vstrekaný pod vysokým tlakom (až 350 MPa) a tým aj vysokou rýchlosťou (takmer 1500 m/s) vychádzajúci z dýzy nad obrobkom. Za najväčšiu výhodu môžeme považovať tepelne neovplyvnenú oblasť miesta rezu. Pre toto obrábanie sa niekedy používa pomenovanie hydrodynamické obrábanie,
- *použitie*: výrobky pre letecký a kozmický priemysel, rezanie čistým vodným prúdom na opracovávanie laminátov, sklotextilu, gumotextilu ai. a rezanie prúdom s abrazívnymi prímiesami na opracovávanie a rezanie nehrdzavejúcej ocele, titánu, wolfrámu, kobaltu, hliníku a rôznorodých zliatin, ale aj skla, keramiky, apod.. [2, 3, 4]

Metóda	Drsnosť Ra (μm)	Stupeň presnosti IT	Hĺbka ovplyvnenej vrstvy (μm)	Úbytok materiálu (cm ³ *min ⁻¹)	Merná spotreba energie (kWh*cm ⁻³)
EDM	50 ~ 0,1	6 ~ 12	10 ~ 300	10 ⁻⁴ ~ 2	0,1 ~ 1
PBM	50 ~ 6,3	32 ~ 63	500 ~ 800	100	9 ~ 19
LBM	50 ~ 6,3	3 ~ 12	100	10 ⁻⁴	8 ~ 13
EBM	50 ~ 6,3	3 ~ 8	bez zmien	10 ⁻² ~ 0,4	9 ~ 15
ECM	2,5 ~ 1,6	9 ~ 12	bez zmien	0,05 ~ 0,5	0,1 ~ 0,3
USM	6,3 ~ 0,4	7 ~ 9	bez zmien	10 ⁻⁴ ~ 10	0,07 ~ 0,8
WJM	3,2	7 ~ 9	bez zmien		

Tab.1.1 Technologické parametre nekonvenčných metód obrábania [2]

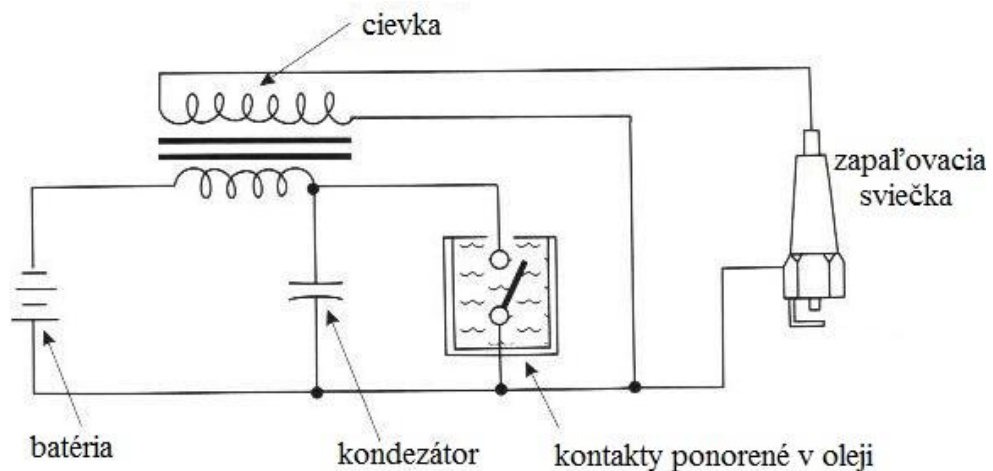
1.2 Počiatky a vývoj elektroerózie

Historické počiatky skúmania princípu elektroerózie siahajú až do druhej polovice 18. storočia, kedy v roku 1768 anglický vedec a chemik Sir Joseph Priestley (1733 - 1804) ako prvý na svete pozoroval pri pokusoch s plynmi, že na plochách vodivých kovov vznikajú počas elektrického výboja malé erózivne krátery. Týmto boli položené základy javu, ktorý sa neskôr začal označovať pojmom elektroerózia. Následné skúmanie prebiehalo najmä z dôvodu vývoja a konštrukcie kontaktných spínacích zariadení, kde tento fyzikálny jav vyvoláva rýchlejšie opotrebovanie, a tým je považovaný za nežiadúci. [5]

1.2.1 Vývoj EDM v Sovietskom zväze

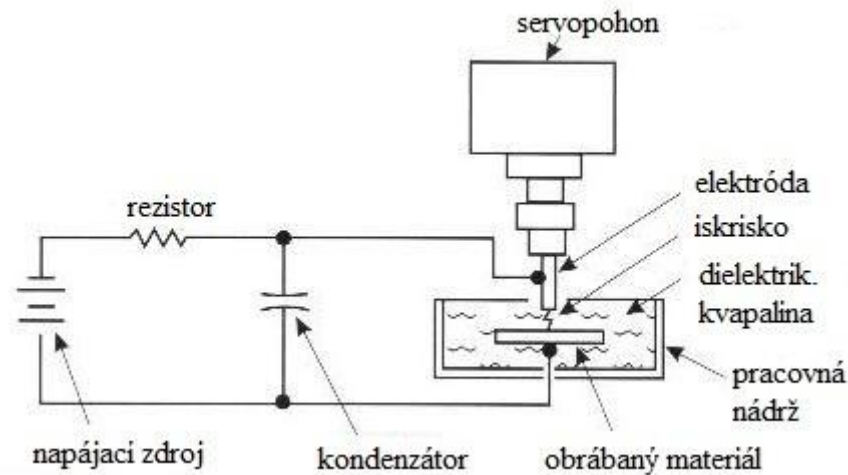
Za zakladateľov prvého technologického využitia elektroerózie sú považovaní manželia a profesori elektrotechniky Dr. Boris N. Lazarenko a Dr. Natália Lazarenková pôsobiaci na Moskovskej univerzite vo vtedajšom ZSSR. Ich prvotným záujmom na požiadavku vlády bolo skúmanie iskrenia medzi wolfrámovými kontaktmi v rozdeľovačoch spaľovacích zážehových motorov, ktoré spôsobovalo porušovanie, vydroľovanie v povrchových vrstvách a potrebné následné opravy u súdobých vojenských automobilov. Ich výskum sa zameril na predĺženie životnosti tejto súčiastky potlačením iskrenia, čím by sa znížil vplyv tohto nežiadúceho procesu. [5]

V časti svojich experimentov položili Lazarenkovci kontakty rozdeľovača do oleja (obr 1.1). Následne pozorovali, že olej čiastočne iskrenie potlačil, i keď nezastavil. Na základe týchto pokusov zistili, že v olejovom kúpeli je iskrenie pravidelnejšie a predvídateľnejšie ako vo vzduchu. Keďže ale úplne nezamedzili procesu iskrenia, výskum bol považovaný za neúspešný.



Obr. 1.1 Experiment manželov Lazarenkovcov [6]

Lazarenkovci následne pokračovali v pozorovaniach vyiskrovania a následným rozvojom položili základy elektroiskrového obrábania kovov. Pri ďalšom rozvoji tejto technológie manželia v roku 1943 vyvinuli riadený obrábací cyklus s elektrickým obvodom za použitia RC súčiastok a servo systému, ktorý udržiaval konštantnú vzdialenosť medzi obrábanym materiálom a elektródou (obr. 1.2). V nimi vytvorenom obvode bolo použitých veľmi veľa rovnakých súčiastok ako v zapalovacom systéme automobilov. [5]



Obr 1.2 RC obvod manželov Lazarenkovcov [6]

V súvislosti s výskumom manželia Lazarenkovci definovali hlavné zákonitosti elektroerózie:

- elektroerózií podliehajú všetky elektricky vodivé materiály,
- elektroerózia môže prebiehať ako v plynnom, tak v kvapalnom prostredí (dielektriku),
- vhodným zapojením obvodu a voľbou parametrov výboja môžeme doceliť dva druhy výbojov - stacionárne a nestacionárne: premena stacionárneho výboja (oblúka) na opakované nestacionárne výboje (iskry) umožňujúce výrazne presnejšie rozrušovanie materiálu, čím je proces vhodnejší pre praktické aplikácie. [5]

Navrhnuté zapojenie generátora, ktoré sa taktiež označuje ako Lazarenkovo zapojenie, bolo po veľmi dlhú dobu používané ako zdroj elektrických výbojov pre túto nekonvenčnú technológiu obrábania, čím boli položené základy EDM systémov a ich následné použitie v elektroerozívnych strojoch vyrábaných v Európe a Japonsku. [5]

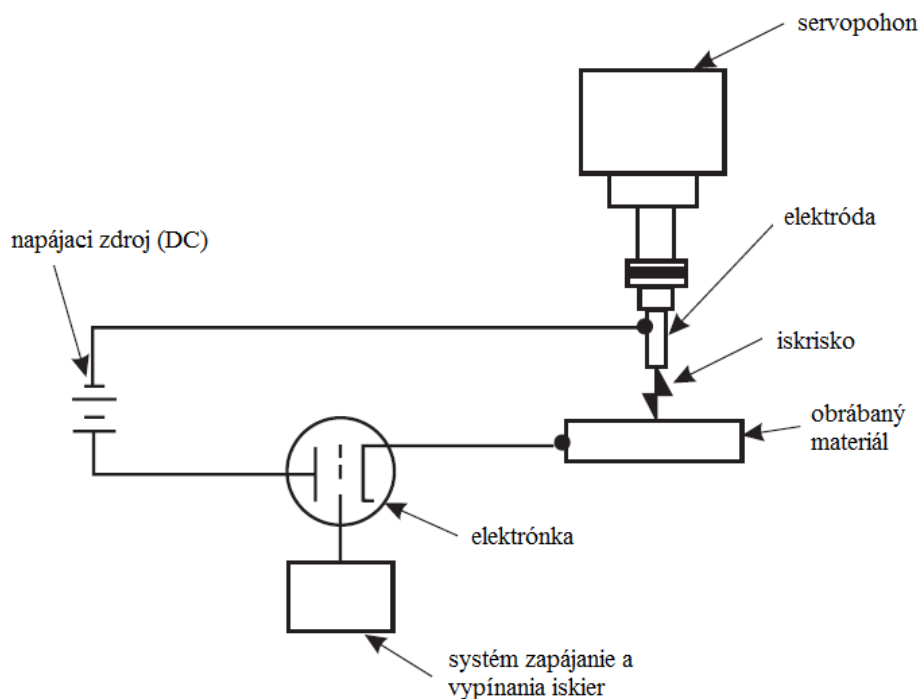
1.2.2 Vývoj EDM v Spojených štátoch amerických

Počiatky elektroerózie v Spojených štátoch amerických siahajú do približne rovnakého obdobia, v akom manželia Lazarenkovci vykonávali svoje pokusy, a sú spojené so spoločnosťou, ktorá vyrábala hydraulické ventily a rozvádzače pre letecký priemysel, najmä jej zamestnancami Heroldom Starkom, Victorom Gardinym a Jackom Beaverom. Veľkým problémom týchto hliníkových súčiastok bolo, že pri vyvrtávaní otvorov dochádzalo k zalamovaniu závitníkov a vrtákov. Tieto nedostatky značne predražovali výrobu, preto spoločnosť poverila spomínanú trojicu, aby prišla s riešením ako ulomené nástroje čo najlepšie odstraňovať z obrábaných dielov. [6]

Harding ako inžinier elektrotechniky prišiel s nápadom použiť elektrickú iskru k narúšaniu zničených závitníkov alebo vrtákov v telesách rozvádzačov. Nástrojovú elektrodu priložil na zalomený nástroj tak, aby pri priblížení preskočila iskra. Tá rozpustila malú povrchovú časť kovu, takže nástroj mohol byť následne postupne odstránený po malých častiach.

Fyzikálny princíp bol tým overený, avšak z praktického hľadiska bola metóda veľmi zdĺhavá a ekonomicky nevýhodná. [6]

Následný vývoj preukázal, že na zdokonalenie celého procesu je potrebné použiť výkonnejší generátor, aby bolo iskrenie silnejšie, čím sa zvýšila rýchlosť odoberania materiálu. Pri tom ale bolo potrebné zabezpečiť chladenie a odstraňovanie narušeného kovu z iskriacej oblasti. Pre tento účel sa spočiatku pokúšali vyvinúť chladenie stlačeným vzduchom, avšak, ako oveľa vhodnejšia sa ukázala voda, ktorá výrazne znížila čas pri odstraňovaní obrábacích nástrojov. Systém bol naďalej zdokonaľovaný a neskôr patentovaný. Pre jeho lepšiu využiteľnosť bolo nutné, aby celý proces prebiehal automatizovane. Po niekoľkých ďalších experimentoch bol vyvinutý systém využívajúci elektrického obvodu s elektrónkou a servopohonom (obr. 1.3). Elektrónka slúžila na zapínanie a vypínanie iskier, čím mnohonásobne zvýšila ich frekvenciu a servopohon automaticky reguloval medzeru medzi elektródou a obrobkom a tým optimalizoval proces vyiskrovania.



Obr. 1.3 Elektrický obvod s elektrónkou [6]

1.2.3 Stručný vývoj EDM v nasledujúcich rokoch

Masívnejší vývoj technológie elektroiskrového drôtového rezania sa datuje do obdobia 60. a počiatku 70. rokov 20. storočia. Hlavným impulzom bola potreba výrobcov nahradiť zložité a teda aj nákladne nástrojové elektródy hĺbiacich EDM strojov niečím jednoduchšie vyrobiteľným, resp. lacnejším. Najskôr sa inžinieri a vedci pokúšali použiť pevný drôt, ktorý sa však počas obrábania postupne stenčoval, až došlo k jeho pretrhnutiu. Postupne bol nahradený drôtom, ktorý sa kontinuálne posúval v mieste rezu, v oblasti okolo obrobku.

Pravdepodobne za ešte väčšiu udalosť 60. rokov vo vývoji drôtových rezačiek môžeme považovať pokrok, ktorý bol dosiahnutý vďaka využitiu numerického riadenia (NC) pre určenie presnej polohy obrobku a riadenia jednotlivých technologických operácií pomocou diernych štítkov a neskôr diernych pásov. Nevýhodami tohto prvého programovania boli zložitosť celého procesu a veľké rozmery médií, čiže pásov. Až v roku 1969 prichádza švajčiarska firma AGIE s prvými komerčne dostupnými strojmi s týmto spôsobom riadenia. [5, 7]

V Sovietskom zväze v roku 1967 skonštruovali a predstavili numericky riadenú drôtovú rezačku, ktorá pre presné polohovanie osí používala krokové motory. Tým sa zabezpečilo ešte presnejšie určenie polohy a znížil sa tak obrábací čas. Stroj dosahoval dovtedy nedosiahnuteľnej presnosti až 20 μm , pri pracovnej rýchlosti rezania 9mm² za minútu. [5]

Prvé CNC drôtové rezačky sa objavili v 70. rokoch, kedy boli nepraktické dierne pásky nahradené programovaním pomocou optických čítačiek, ktoré na základe nasnímaného výkresu previedli jeho parametre do súradnicového systému polohovacích osí. S príchodom počítačov a ich zavádzaním do priemyslu sa pre presné riadenie začali používať počítačové programy, ktoré výrazne uľahčili riadenie celého procesu. Tým sa obrábací proces drôtového rezania stal praktickejším a využiteľnejším pre výrobu jednotlivých súčiastok. [5]

Zavádzanie tejto nekonvenčnej metódy obrábania nebolo vo všetkých vyspelých krajinách z rôznych historických a priemyselných dôvodov rovnaké. Zavádzanie nielen drôtových rezačiek, ale EDM strojov vo všeobecnosti v USA nebolo jednoduché. Vtedajšia výrobná sféra využívajúca konvenčné stroje a metódy nemala potrebu nákladných inovácií. Naproti tomu Japonsko, ktoré počas Druhej svetovej vojny prišlo o všetok priemysel, prijalo a následne vyvíjalo EDM technológiu, čím sa výrobcovia z tejto krajiny aj dnes radia vo výrobe elektroerozívnych strojov k svetovej špičke. V Európe sa EDM technológia rozvíjala takmer od jej vzniku. Počiatok môžeme datovať do roku 1952, kedy Agie prevzala patent od Lazarenkovcov a následne začala vyvíjať vlastné aplikácie tohto fyzikálneho princípu. [5, 6, 7]

2 PRINCÍP ELEKTROISKROVÉHO DRÔTOVÉHO REZANIA

2.1 Princíp elektroerozívneho obrábania

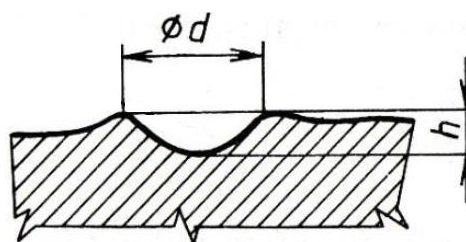
Elektroiskrové drôtové obrábanie patrí do skupiny obrábania elektrickým výbojom, známym pod označením EDM (Electrical Discharge Machining), ktoré spadá do nekonvenčných metód obrábania. Jeho základom je fyzikálny proces využívajúci na úbytok povrchových vrstiev materiálu tepelnú energiu výboja medzi anódou a katódou, pri ktorom na obrobok nepôsobia žiadne, resp. len minimálne mechanické sily na rozdiel od klasického trieskového obrábania. [1,5]

Pre využiteľnosť technológie je potrebné zabezpečiť rýchlo sa opakujúce periodické impulzy, ktoré sú rozložené po celej ploche nástroja, pričom iskrisko je ponorené v kvapaline s vysokým elektrickým odporom. Výboj vznikne privedením napätia na elektródy a jednosmerným elektrickým prúdom, ktorý je prenášaný elektrónmi a iónmi vznikajúcimi pri ionizácii medzi elektródami. Opätovná ionizácia vzniká zrážkami neutrálnych atómov dielektrickej kvapaliny so záporne nabitými elektrónmi. Elektricky nabité častice nadobúdajú vysokú rýchlosť a energiu, čím vytvoria ionizovaný, tj. vodivý kanál, ktorý umožňuje pretekanie elektrického prúdu medzi elektródami a ďalšie zrážky častíc – sekundárna lavína elektrónov. Veľkosť tohto napätia závisí na nasledujúcich faktoroch:

- vzdialenosti medzi elektródami,
- vodivosti dielektrickej kvapaliny,
- znečistení dielektrika.. [1, 5]

Výsledkom je vytvorenie plazmového pásma s veľmi vysokými teplotami, pohybujúcimi sa v závislosti na type výboja v intervale 3000–12000 °C. V mieste pôsobenia elektrického výboja sa na povrchu obrobku materiál prudko ohrieva, natavuje a následne odparuje. Súčasne vzniká odparovaním dielektrika bublina s vysokým tlakom, ktorá sa pri prerušení prívodu prúdu do obvodu ochladí, čím sa vyvolá jej implózia a preniknutie kvapaliny do tohto uzavretého priestoru. Následne je natavený kov odplavovaný z miesta výboja do priestoru medzi elektródami. Vďaka chladiacemu účinku dielektrika sa spätne schladzuje a tuhne do podoby malých guľôčok, ktoré sú prúdom odvádzané z iskriska, aby neovplyvňovali následnú tvorbu nového výboja. [1, 5]

Kráter vzniknutý jedným elektrickým výbojom môžeme považovať za guľový segment, ktorý je definovaný svojím priemerom a hĺbkou (obr 2.1), pričom tieto charakteristiky sú priamo úmerné veľkosti privedenej energie a dobe trvania impulzu. Jeho objem sa pohybuje v rozmedzí 10^{-3} až 10^{-5} mm³. Tieto charakteristiky majú zásadný vplyv na drsnosť obrábanej plochy, presnosť rozmerov a efektívnosť celého obrábacieho procesu. [5, 8]



Obr. 2.1 Kráter vzniknutý jedným výbojom [8]

Množstvo odoberaného materiálu pri jednom výboji je na jednej elektróde v oveľa väčšom pomere ako na elektróde druhej, z tohto dôvodu používame podmienku úspešnosti technológie, ktorá zaisťuje relatívny úbytok materiálu na obrobku aj nástroji. Tento parameter je jeden z určujúcich pre produktivitu elektroerozívneho obrábania. [5]

Základnou požiadavkou EDM obrábania je dosiahnutie maximálneho úbytku materiálu na obrobku a minimálneho na nástroji, teda opačnej elektróde. Nežiadúci úbytok nástrojovej elektródy je možné ovplyvniť zavedením niekoľkých podmienok:

- voľbou vhodného pracovného prostredia, čiže dielektrika,
- voľbou vhodného materiálu nástroja vzhľadom k materiálu obrobku,
- konštrukciou generátorov – jeho elektrické parametre ovplyvňujúce charakter výbojov a početnosť,
- polarita zapojenia nástroja a obrobku - odporúča sa zapojiť obrobok ako anódu pri krátkych výbojoch a ako katódu pri dlhých výbojových impulzoch. [3, 8]

Vhodným zapojením a voľbou pracovných parametrov elektrického obvodu môžeme dosiahnuť stacionárny výboj – elektrický oblúk alebo výboj nestacionárny – iskra. Výboje prebiehajú medzi elektródami vo vzdialenosti 5 až 400 μm . Charakter impulzov nám určuje polaritu zapojenia obrobku a nástroja. Na počiatku výboja vždy prevláda elektrónová vodivosť, ktorá postupne prechádza na iónovú vodivosť. Tento fyzikálny princíp má za následok, že pri kratších impulzoch sa viac energie uvoľňuje na katóde. Veľkosť úbytku materiálu je primárne závislá na veľkosti energie výboja, čo by sa dalo vysvetliť ako intenzívnejší úbytok materiálu v mieste, kde sa generuje väčšia energia. Z tohto dôvodu je pri krátkych impulzoch obrobok zapojený ako anóda a pri dlhších impulzoch ako katóda. [1]

Pri elektroiskrových výbojoch je doba impulzu krátka a pohybuje sa v intervale 10^{-4} až 10^{-6} sekundy pri relatívne malých hodnotách časového využitia periódy výboja o vysokých frekvenciách. Vo výbojovom kanále prevláda elektrónová vodivosť, čo má za následok väčšie opotrebovanie anódy oproti katóde z vyššie uvedeného dôvodu. Výboje s nižšou energiou sa preto využívajú predovšetkým na dokončovacie operácie, kde nie sú vyžadované veľké úbytky, ale práve naopak je kladený dôraz na vyššiu kvalitu povrchu, ktorá je dosiahnuteľná pri vzniku menších kráterov. [5]

Na rozdiel od elektroiskrových výbojov sú krátkodobé elektrické oblúky charakterizované dlhšou dobou impulzu, ktorá je spravidla dlhšia ako 10^{-6} sekundy a zároveň sú vyššie aj hodnoty časového využitia periódy výboja. Frekvencia tvorby výboja je naproti tomu nižšia a vo výbojovom kanály neprevláda elektrónová vodivosť, ale skôr iónová. Uvoľňuje sa väčší počet kladných mikročastíc zo zápornej elektródy, ktoré následne dopadajú na katódu, čím tento proces vyvoláva väčší tepelný účinok a následný úbytok tejto elektródy. Krátkodobé elektrické oblúky sú predurčené pre veľký úbytok materiálu, preto sa používajú predovšetkým pri hrubovacích operáciách. [5]

2.1.1 Časový priebeh jednotlivých fáz

Elektrický výboj je pre proces elektroerozívneho obrábania najkľúčovejší a až následne po jeho dostatočne podrobnom preštudovaní môžeme úplne pochopiť fyzikálny princíp elektroerózie. Časový priebeh elektrického výboja vrátane priebehu napätia a prúdu medzi

elektrodami získaného pomocou polovodičového generátora je možné rozdeliť do deviatich jednotlivých fáz (obr.2.2). [5]

Fáza 1: Po privedení napätia na nástrojovú elektrodu a obrobok sa medzi nimi začne vytvárať elektrické pole, ktoré zo znečisteného dielektrika priťahuje elektricky vodivé častice a kumuluje ich v mieste najmenej vzdialenosti elektrod. V tomto okamžiku napätie rastie a prúd je nulový.

Fáza 2: Privedené napätie dosahuje svojej najvyššej možnej hodnoty. Pôsobením elektrického poľa začínajú vodivé častice vytvárať mostíky, ktoré sú základom pre zapálenie výboja.

Fáza 3: Vplyvom pôsobenia elektrického poľa sa začínajú uvoľňovať elektróny zo záporne nabitých elektrod, tie sa následne zrážajú s neutrálnymi časticami dielektrika – neutrónmi a triešťa sa. Vďaka tomu vznikajú v iskrisku kladné a záporné ióny. Tento jav označujeme ako ionizácia prostredia.

Fáza 4: Ióny postupne obaľujú stred budúceho výbojového kanálu, čím klesá odpor. V priestore medzi elektrodami sa zvyšuje prúdová hustota. Vytvára sa vodivý kanál z plazmy, pričom narastá teplota na povrchu elektrod a naopak klesá napätie.

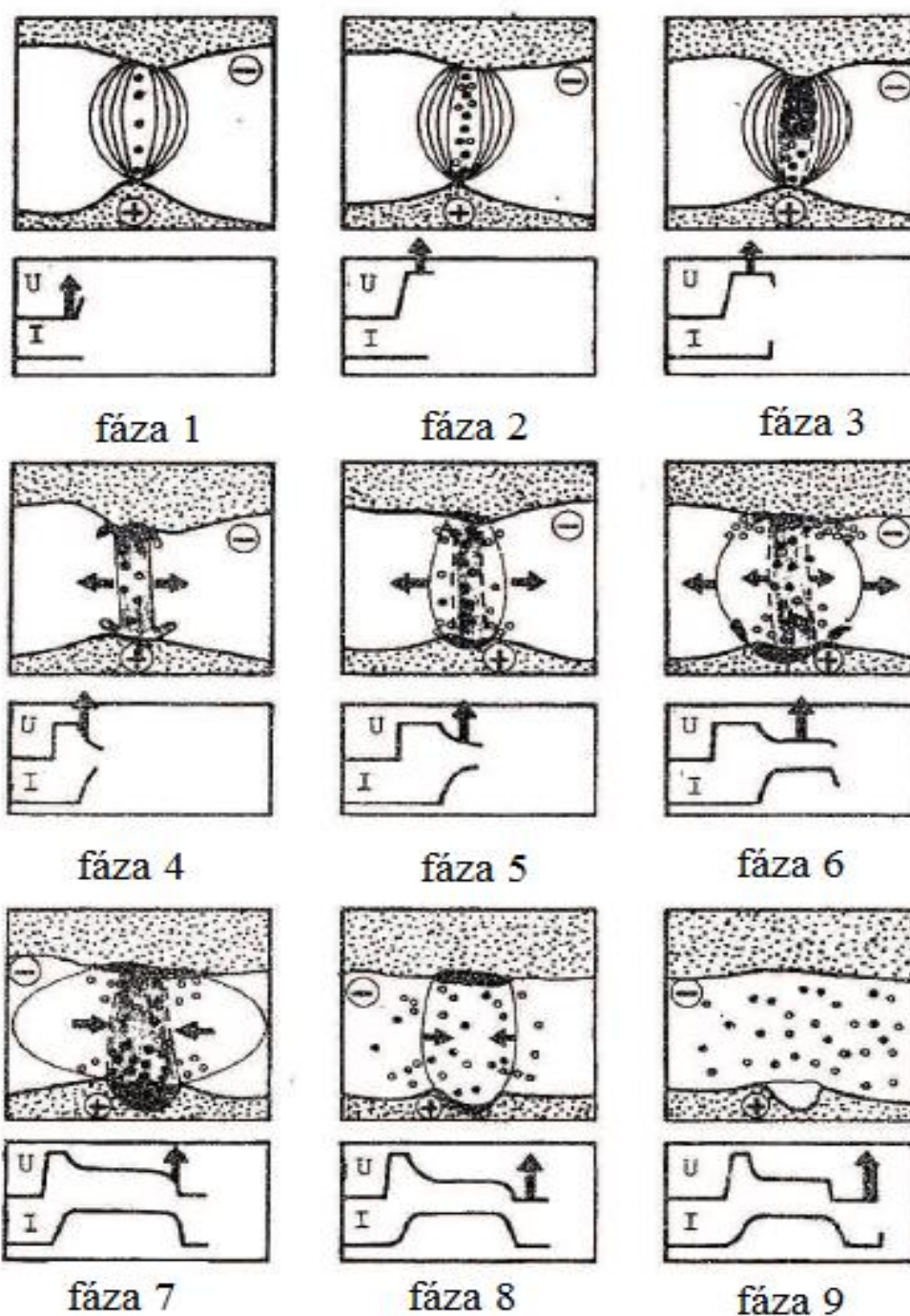
Fáza 5: V dôsledku nárazu elektrónov na anódu a iónov na katódu dochádza k lokálnemu ohrevu elektrod, ich natavovaniu a následnému odparovaniu dielektrika, pričom vzniká plynová bublina. Dôsledkom nárazu mikročastíc sa uvoľní veľké množstvo energie, ktoré zvýši teplotu až na 10 000°C (v niektorej literatúre sa dokonca uvádza 12 000°C). V tomto okamihu dosahuje elektrický prúd pretekajúci výbojovým kanálom maximálnu hodnotu a napätie sa ustáli na tzv. zápalnej hodnote výboja.

Fáza 6: Dochádza k intenzívnemu natavovaniu elektrod, a teda aj k expanzii bublín v blízkosti iskriska, čím dochádza k odparovaniu materiálu.

Fáza 7: V dôsledku prerušenia prívodu energie, čiže poklesom prúdu a napätia na nulovú hodnotu dochádza k poklesu teploty v pracovnej medzere, čo má za následok pokles tlaku a následnú implóziu plynovej bubliny. Nastáva porušenie materiálu, vytrhávanie taveniny a vznik krátera na povrchu elektrod. Vzniknutá tavenina sa dostáva do priestoru pracovnej medzery.

Fáza 8: Do vzniknutého krátera vniká pracovná látka a ochladzuje tak elektródy, čím zabraňuje prieniku tepla do hlbších vrstiev. Taktiež je ochladzovaný odoberaný materiál, ktorý zostáva v dielektriku vo forme spalín a mikročastíc v tvare guľôčok s objemom rádovo 10^{-3} až 10^{-5} mm³.

Fáza 9: Pracovná látka, dielektrikum, je znečistená produktmi elektroerózie a obsahuje zostávajúce voľné ióny, ktoré tvoria základ pre vznik nového výbojového kanála. Celý cyklus je na počiatku nového výboja. [5]



Obr. 2.2 Fázy elektrického výboja medzi elektródami [5]

2.1.2 Charakteristika elektrických výbojov počas EDM obrábania

Časový priebeh elektrického výboja môžeme charakterizovať niekoľkými parametrami:

- doba impulzu t_i - čas činnosti generátora, úsek medzi jeho zapojením a vypojením, je daná súčtom doby oneskorenia výboja a doby výboja, čiže $t_i = t_d + t_e$,

- doba pauzy t_0 - čas nečinnosti generátora, úsek medzi jeho vypojením a novým zapojením na vytvorenie ďalšieho impulzu,
- doba oneskorenia výboja t_d - čas medzi okamihom zapojenia generátora a prerazom dielektrika znamenajúcim nárast prúdu v pracovnej medzere,
- doba výboja t_e - časový úsek medzi zapálením výboja a vypnutím generátora, čiže skutočná činná doba elektrického výboja,
- doba periódy T - časový úsek daný dobou impulzu a pauzou, je daná súčtom doby impulzu a doby pauzy, čiže $T = t_i + t_0$, obrátená hodnota frekvencie výbojov,
- napätie naprázdno U_z - napätie, ktoré je vyvolané zapnutím generátora (zápalné napätie výboja),
- pracovný prúd výboja I - maximálny vybíjajúci prúd, ktorý preteká medzi elektródami v okamihu výboja,
- stredný vybíjajúci prúd I_e - stredná hodnota prúdu medzi okamihom zapálenia elektrického výboja a vypnutím generátora,
- stredné vybíjajúce napätie U_e - stredná hodnota napätia medzi okamihom zapálenia elektrického výboja a vypnutím generátora,
- napätie pri zhasnutí výboja U_k - hodnota napätia závislá na materiáli obrábaného polotovaru, dielektriku a jeho stave, nemôžeme ju ovplyvniť. [5]

Z uvedených charakteristických veličín elektrického výboja môžeme následne vypočítať jednotlivé veličiny ako:

- množstvo materiálu odobraného jedným výbojom podľa vzťahu (2.1) [5]:

$$Q_i = k \cdot W_e \quad (2.1)$$

kde: Q_i [mm³] - množstvo odobraného materiálu,
 W_e [J] - energia výboja,
 k [-] - súčiniteľ úmernosti pre katódu a anódu.

Pričom energia výboja sa dá vyjadriť odvođením integrálnej rovnice prúdu a napätia v čase, čím dostávame vzťah (2.2) [5].

$$W_e = I_e \cdot U_e \cdot t_i \quad (2.2)$$

kde: I_e [A] - stredný vybíjajúci prúd,
 U_e [V] - stredné vybíjajúce napätie,
 t_e [s] - doba výboja.

Na opis časového priebehu elektrického výboja, čo má veľký vplyv na intenzitu úbytku materiálu a kvalitu povrchu po obrábaní, bola zavedená veličina:

- časové využitie periódy výboja podľa vzťahu (2.3) [5]:

$$q = \frac{t_i}{T} = \frac{t_i}{t_i + t_o} \quad (2.3)$$

kde: q [-] - časové využitie periódy,
t_i [s] - doba impulzu,
t_o [s] - doba pauzy,
T [s] - doba periódy.

Podľa časového priebehu dodávanej energie do miesta elektrického výboja ich rozdeľujeme na:

- výboj elektrickou iskrou,
- výboj krátkodobým elektrickým výbojom. [5]

Podľa tvaru sú prúdové impulzy ďalej rozdeľované do troch skupín:

- striedavé nesymetrické – typické pre elektroiskrové obrábanie pomocou RC generátorov,
- jednopolové impulzy – pre elektroimpluzívne obrábanie, za použitia generátorov 2. generácie,
- dvojpolové symetrické impulzy – používané pri elektrokotaktnom obrábaní. [5]

2.1.3 Generátory elektrických výbojov pre EDM obrábanie

Zdrojom elektrickej energie je pri elektroerozívnom obrábaní generátor, kvôli čomu je jednou z najdôležitejších častí EDM strojov. Od jeho nastavenia a konštrukcie závisí celý rezný proces. Technologická aplikácia úbytku materiálu pomocou elektrického výboja, charakterizovaného napätím, prúdom a tvarom, využíva rôzne formy impulzov s určitou frekvenciou. Všetky tieto parametre majú vplyv najmä na rýchlosť, presnosť a kvalitu obrábanej plochy. Podľa konštrukcie a spôsobu zapojenia delíme generátory na dve základné skupiny:

- Závislé elektroiskrové generátory (RC a RLC),
- Nezávislé pulzné generátory (rotačné, polovodičové). [3]

2.1.4 Pracovné prostredie – dielektrikum

Voľba vhodného pracovného prostredia je jedným zo základných činiteľov ovplyvňujúcich vznik elektrického výboja. Dielektrikum má značný vplyv na bezproblémový priebeh elektroerózie, preto sú naň kladené vysoké požiadavky:

- dostatočný elektrický odpor, aby prierazom dielektrika vznikol elektrický výboj,

- nízka viskozita a dobrá zmáčanlivosť, aby dochádzalo k rýchlej obnove izolácie medzi jednotlivými výbojmi,
- dostatočne vysoká teplota vzplanutia, ako ochrana pred vznikom požiaru,
- chemická stálosť a neutrálnosť, aby sa zamedzilo vzniku korózie,
- hygienická a ekologická nezávadnosť, pri výboji nesmú vznikať jedovaté výpary a pre obsluhu nepríjemné zápachy,
- ekonomická výhodnosť, najmä z dôvodu ľahkej vyrobiteľnosti. [1, 5, 9]

Následne musí dielektrikum spĺňať tieto funkcie:

- pôsobiť ako izolant medzi elektródami a ohraničovať výbojový kanál,
- odvádzať teplo z pracovného priestoru, aby sa minimalizoval jeho vplyv na obrobok,
- odstraňovať odoberaný materiál z miesta výboja, aby sa zabránilo jeho usadzovaniu na elektródach a prípadnému vzniku skratu. [1, 5]

Ako dielektrické kvapaliny sa používajú ľahké strojné oleje, transformátorové oleje, petroleje, dielektriká na báze vody, kerozín, silikónový olej a iné špeciálne dielektriká dodávané výrobcami. V poslednom období sa často používa deionizovaná destilovaná voda, ktorá je vhodná najmä kvôli svojej nízkej cene, nízkej viskozite a požiarnej bezpečnosti. Druhým najpoužívanejším médiom sú látky na bázy roby, predovšetkým pre lepšiu kontrolu výboja. [1, 5]

Ďalšou požiadavkou je zaistiť správne dávkovanie dielektrickej kvapaliny s požadovaným tlakom, ale najmä čistotou a zaistiť tepelnú stabilitu stroja. Z tohto dôvodu sú stroje vybavené rôznymi špeciálnymi zariadeniami umožňujúcimi správny prívod a chladenie. Neodmysliteľnou súčasťou každého EDM stroja je filtračný aparát, ktorý zabezpečuje dostatočné vyčistenie dielektrika od nečistôt vznikajúcich počas obrábania a ďalšie jeho vlastnosti ako napríklad vodivosť. K tomu slúžia filtre v rôznych prevedeniach, ako napríklad prietokové papierové filtre, usadzovacie filtre a i. [5]

Prívod dielektrika do pracovného priestoru medzi elektródu a obrobok môže byť realizovaný niekoľkými spôsobmi. Najmä pri výrobe hlbokých a tvarovo zložitých dutín je dôležité neustále vyplachovanie obrábanej časti obrobku. Základné spôsoby vyplachovania sú:

- vonkajšie vyplachovanie – najjednoduchšia a zároveň najbežnejšia forma, pre vyplachovanie hlbokých dier je vhodné kombinovať s pulzným vyplachovaním,
- vnútorné tlakové vyplachovanie – dielektrická kvapalina je do pracovného priestoru privádzaná otvorom v nástrojovej elektróde, nevýhodou tejto metódy je sekundárna erózia, ktorá vzniká v dôsledku výbojov v postrannej medzere v dôsledku odvodu mikročastíc do tohto priestoru, čím sa zhoršuje tvarová presnosť týchto plôch,
- vyplachovanie odsávaním – dielektrická kvapalina je odsávaná otvorom v obrobku alebo nástrojovej elektróde, čím sa dosiahne lepšej tvarovej presnosti obrábanej dutiny,

- pulzné vyplachovanie – pri tomto spôsobe dochádza ku krátkemu prerušeniu elektroerózie, pri ktorom sa elektródy od seba oddialia a v niektorých prípadoch sa voči sebe pootočia, čím vznikne väčšia medzera pre dostatočné vypláchnutie nečistôt. Napájací prúd je počas tohto procesu vypnutý a spätne sa zapína až po priblížení na optimálnu vzdialenosť, tento spôsob je vhodný najmä pri použití tenkých elektród, výrobe hlbokých dutín alebo obrábaní na čisto,
- kombinované vyplachovanie – tento spôsob využíva kombináciu vnútorného tlakového vyplachovania spolu s odsávaním, čím sa vo väčšej miere odstraňujú nečistoty a dosahuje sa tak lepšia tvarová presnosť, jeho využitie je najmä pri výrobe tvarovo zložitých dutín. [5, 8]

2.1.5 Nástrojové elektródy

Nástrojové elektródy sú taktiež jednou z veľmi dôležitých súčastí elektroerozívneho procesu. Určujú presnosť rozmerov a najmä kvalitu obrábanej plochy. Ako bolo uvedené v kapitole 2.1, je jedným z rozhodujúcich faktorov úspešnosti procesu elektroerozívneho obrábania, pri ktorom je dôležité dosiahnutie minimálneho úbytku materiálu na nástrojovej elektróde a maximálneho úbytku na obrobku, preto sa nástrojové elektródy navrhujú a konštruujú samostatne pre každý spôsob obrábania, dokonca v prípade hĺbenia pre každú novo navrhovanú súčiastku. Pri návrhu elektród sa kladie veľký dôraz na voľbu vhodného materiálu, pretože náklady na ich zhotovenie tvoria rádovo desiatky percent celkových nákladov na výrobu a správnou voľbou sa môže značne znížiť opotrebovanie, a tým zvýšiť ekonomická návratnosť a ziskovosť. Aj preto sa vyberá materiál elektródy v návaznosti na materiál obrobku, tak aby spĺňal potrebné fyzikálne vlastnosti, ako sú okrem iného Youngov modul pružnosti a nižší koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti, čím je odolnosť elektródy počas procesu elektroerózie vyššia. [1, 5, 8]

Na vlastnosti nástrojových elektród sú kladené tieto základné požiadavky:

- vysoká elektrická vodivosť,
- dobrá tepelná vodivosť a kapacita,
- vysoký bod tavenia a varu,
- vysoká odolnosť voči elektrickej erózií,
- dostatočná mechanická pevnosť,
- dobrá obrábateľnosť,
- stálosť tvaru a malá tepelná rozťažnosť,
- prijateľná nákupná cena. [9]

Najpoužívanejšie materiály na výrobu nástrojových elektród pre EDM obrábanie sú:

- Grafit – najrozšírenejší materiál s vysokou teplotou tavenia (3000°C), je ľahko obrábateľný, vhodný na opracovávanie ocelí, nevýhodou je výrazné znečisťovanie stroja,

- Meď – druhý najrozšírenejší materiál, odolný voči elektroerózií, vhodný najmä na obrábanie karbidov, nitridov a na dokončovacie operácie,
- Mosadz – pomerne lacný, ľahko obrábateľný materiál, nevýhodou je rýchle opotrebovanie a teda vyššia nákladnosť celého procesu,
- Wolfrám-meď – drahý materiál, využívaný najmä pre hlboké drážky a jemné operácie s nepriaznivými výplachovými podmienkami, vyrába sa zapekaním bez ďalších úprav kvôli vysokej krehkosti,
- Wolfrám – materiál nástrojových elektród pri výrobe malých dier. [1, 3]

Pre jednoduchší výber vhodného materiálu elektródy sa zaviedla pomerná veličina pod označením relatívne objemové opotrebovanie nástrojovej elektródy, ktorá percentuálne vyjadruje pomer materiálu odobraného na obrobku a na nástroji. V praxi sa hodnoty pohybujú od desiatín až po desiatky percent v závislosti od mnohých parametrov elektroerozívneho procesu.

- Relatívne opotrebovanie nástrojovej elektródy podľa vzťahu (2.4) [5]:

$$\vartheta = \frac{V_N}{V_O} \cdot 100 \quad (2.4)$$

kde: ϑ [%] - relatívne opotrebovanie nástrojovej elektródy,
 V_N [J] - objemový úbytok nástrojovej elektródy,
 V_O [-] - objemový úbytok obrábaného materiálu.

Výsledné hodnoty sú v závislosti od polarít obrobka a nástrojovej elektródy, veľkosti pracovného prúdu, dobe trvania impulzov. Môžeme ale v zásade povedať, že čím väčšia je intenzita pretekajúceho prúdu, tým je výsledné opotrebovanie nástrojovej elektródy menšie. Mohlo by sa zdať, že aj efektívnejšie, ale v tomto prípade to znamená väčší úbytok materiálu počas jedného cyklu, a teda zhoršenie drsnosti výsledného povrchu obrobku.

V počiatočnom období rozvoja elektroerózie dosahovalo opotrebovanie nástrojových elektród 40 až 60% z celkového objemu materiálu. V súčasnom období sa na moderných EDM strojoch za predpokladu optimálnej voľby materiálu obrobka aj nástroja, ale aj ďalších parametrov dosahuje najmä pri hrubovacom reze hodnôt výrazne nižších ako jedno percento. V bežnej výrobe sa tieto hodnoty pohybujú pod 10%, pričom je veľký rozdiel medzi dokončovaním a predchádzajúcim obrábaním. [1, 5]

Hlavné faktory spôsobujúce s opotrebovaním nástrojových elektród:

- poruchy materiálu (pórovitosť, poškodenie štruktúry),
- kolísanie prúdu v elektrickom výboji počas procesu elektroerózie,
- vysoká hustota elektrónov, pri ktorej dochádza k oddeľovaniu jednotlivých iónov z povrchových vrstiev alebo prípadne aj celých častíc kovu,

- termické vplyvy (nepravidelné ohrievanie elektród, veľmi vysoká teplota v elektrickom výboji),
- mechanické nárazy (kavitácia v dielektriku, čiastočky materiálu uvoľnené z obrobku),
- nepriaznivé pracovné podmienky (nevhodné prúdenie dielektrika, vysoká hustota elektrického prúdu). [2]

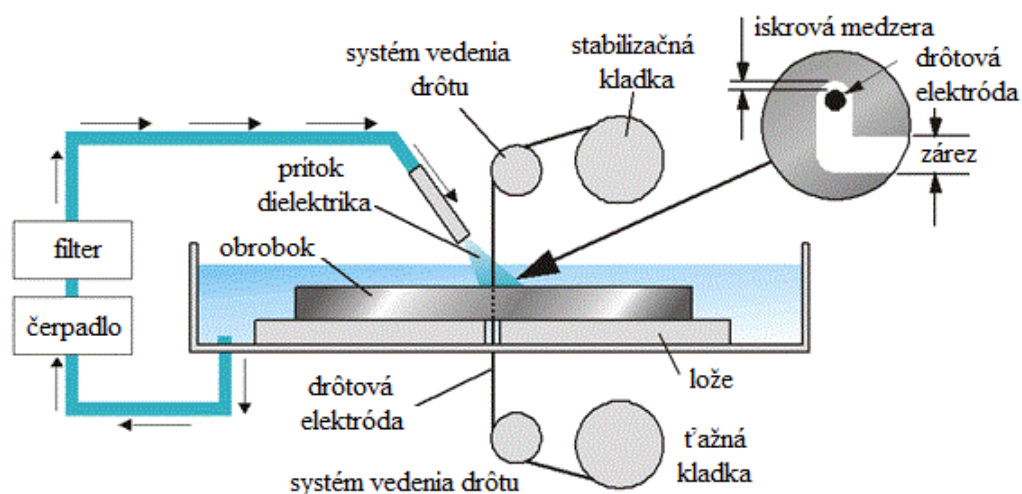
2.2 Elektroiskrové drôtové rezanie

Elektroiskrové drôtové rezanie (WEDM – Wire electrical discharge machining) je progresívnou modifikáciou elektroiskrového obrábania. Počiatky tejto metódy siahajú do 60. rokov 20. storočia, pričom jej zavedenie a následný rozvoj znamenali výrazný pokrok vo výrobe tvarovacích nástrojov, predovšetkým strižných a lisovacích a umožnili delenie veľmi tvrdých a pevných materiálov. S prvými strojmi pre drôtové rezanie prišla na trh švajčiarska firma AGIE, ktorá taktiež ako prvá na svete použila NC riadenie, čím sa celý rezný proces zefektívnil a spresnil. Elektroiskrové drôtové rezanie v súčasnosti patrí k najviac rozšíreným nekonvenčným metódam obrábania. Tento spôsob obrábania sa vyznačuje minimálnou šírkou rezu, čím sa minimalizuje objem odpadového materiálu a umožňuje výrobu súčiastok, ktoré by konvenčnými metódami boli vyrobiteľné len veľmi ťažko. Typickým príkladom je rezanie malých vnútorných rádiusov. [1, 5, 9]

V dnešnej dobe je už neodmysliteľnou súčasťou každého moderného elektrozacieho stroja CNC riadiaci systém. Pri tejto metóde rezania sa jedná o riadenie smeru a rýchlosti pohybu a polohy pracovného stola, riadenie rýchlosti odvíjania drôtu, sledovanie pracovných parametrov generátora, prívodu dielektrika a sledovania jeho fyzikálnych vlastností a o kontrolu prebiehajúcej elektroerózie. Riadiacim systémom je možné jednoduché naprogramovanie obrábaného tvaru súčiastky, ktorá bude danou nástrojovou elektródou opisovaná, pričom sú zisťované informácie z iskriska pre riadenie ďalšieho priebehu rezného cyklu. Jednotlivé technologické aplikácie vyžadujú rôzne formy elektrických výbojov, ktoré sú na drôtovú elektródu a na obrábaný materiál privádzané z generátora vo forme impulzov s určitou frekvenciou a napäťovými charakteristikami. Vysoko efektívne je využitie integrácie technológie do systémov CAD/CAM, čím sa výrazne skracuje proces od návrhu požadovanej súčiastky až po jej samotnú výrobu. [1, 8]

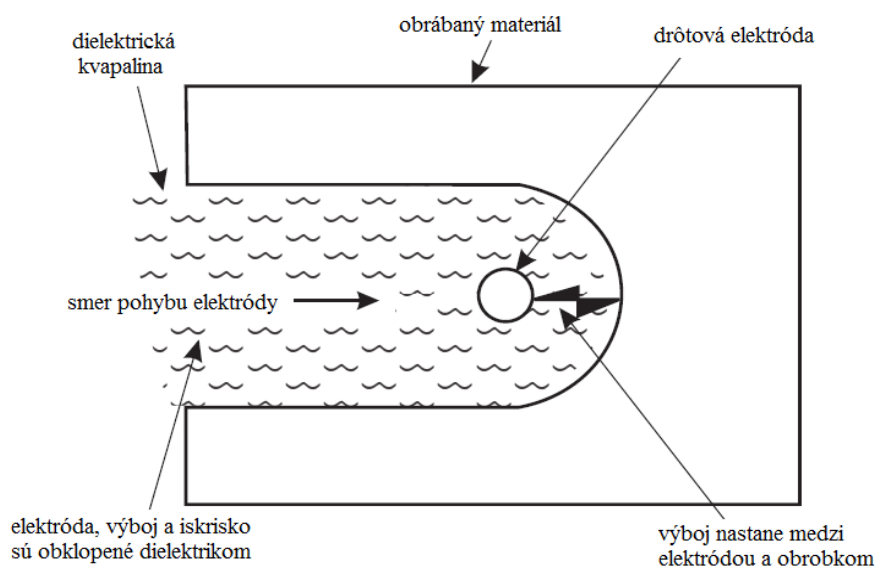
2.3 Fyzikálne – technologický princíp elektroiskrového drôtového rezania

Elektroiskrové drôtové rezanie sa riadi všetkými zákonitosťami elektroerózie uvedenými v kapitole 2.1. Nástrojovou (drôtovou) elektródou je pri tomto spôsobe obrábania tenký drôt, ktorý sa neustále odvíja z cievky v zásobníku za pomoci špeciálneho zariadenia tak, aby nedochádzalo k lokálnemu opotrebovaniu a k jeho následnému pretrhnutiu. Aby sa zabránilo väčším nepresnostiam, ktoré by mohli vzniknúť predpätím, tak sa drôt musí neustále napínať konštantnou ťahovou silou pomocou sústavy kladiiek (obr. 2.3). Pohyb drôtu je veľmi pomalý, pohybuje sa v rozmedzí 2,5 až 300 mm/s, je riadený NC alebo CNC systémom stroja, podľa požadovaného tvaru súčiastky, vlastností materiálu a celkových parametrov rezu. V dôsledku opotrebovania v priebehu vyiskrovania je nástrojová elektróda použiteľná iba jedenkrát. Následne ako odpad končí v zbernom mieste drôtovej rezačky. [1, 8]



Obr. 2.3 Princíp elektroiskrového rezania drôtovou elektródou [15]

Požadovaný rez sa tvorí úbytkom materiálu obrobka pred drôtovou elektródou pomocou elektrických výbojov prebiehajúcich v iskrovej medzere. Rýchlosť úbytku materiálu sa uvádza ako plošný úbytok za jednotku času, najčastejšie v milimetroch štvorcových za minútu. Do elektrického obvodu s tranzistorovými generátormi je drôtová elektróda a obrábaný materiál zapojený tzv. priamou polaritou, kedy obrobok je anóda, má teda plusový náboj, a nástroj je katóda, má teda záporný náboj. Dôležitým faktorom, ktorý ovplyvňuje kvalitu rezu je neustále prúdenie dielektrika v priestore medzi drôtovou elektródou a obrobkom, vďaka čomu sa zabezpečuje dobré chladenie a odvod nečistôt z miesta rezu (obr. 2.4). Výsledkom nevhodného prúdenia dielektrickej kvapaliny, ktorou zvyčajne býva deionizovaná voda, môže byť pretrhnutie drôtu. Pre presné rezanie je taktiež dôležité udržiavanie konštantnej vzdialenosti medzi elektródami, v závislosti na druhu rezu a jeho ostatných parametroch. Rýchlosť úbytku materiálu je u rezania drôtovou elektródou veľmi odlišná, pretože značne závisí na mnohých ovplyvňujúcich faktoroch, ako sú najmä druh rezaného materiálu, typ používanej drôtovej rezačky, typ elektródy, množstvo rezov a zvolená technológia daného rezu. [1, 10]



Obr. 2.4 Schéma priestoru iskriska [6]

2.4 Generátory pre WEDM rezanie

V súčasnosti existuje veľké množstvo zapojení a konštrukcií generátorov pre elektroiskrové drôtové rezanie. Keďže prúdová a napäťová charakteristika elektrických výbojov, a teda parametre generátora sú jedným z rozhodujúcich činiteľov celého procesu, sú možnosti uvádzané výrobcami elektroiskrových drôtových rezačiek veľmi široké. Vďaka podpore riadiaceho systému, prínosu elektroniky a prenosu dát sa v dnešnej dobe nevyhodnocuje riadenie výbojov meraním efektívneho napätia, ale meria sa dĺžka trvania každej iskry, čím sa celý proces spresňuje a umožňuje riadenie servosystémov len s minimálnym časovým posunom, čiže takmer v reálnom čase. Týmto je celý proces oveľa plynulejší, keďže softwarová a mechanická reakcia stroja nesmie prekročiť 3ms. Predchádzajúce generácie generátorov boli zamerané iba na rezanie konkrétneho materiálu. Drôtová rezačka mohla mať napríklad dva generátory, každý na iný druh práce – hrubovací rez a rez dokončovací. V súčasnom období sú generátory univerzálne pre všetky druhy materiálov a druhy rezu. [1, 5]

Charakteristika elektrických výbojov drôtových rezačiek:

- prúdové impulzy v rozmedzí 1 až 1000 ampérov,
- dĺžka trvania jednotlivých impulzov 0,2 až 5000 μ s,
- napätie privádzané na elektródy v rozmedzí 30 až 300 Voltov,
- účinnosť rezného procesu približne 85%. [11]

Parametre ovplyvňujúce technológiu elektroiskrového drôtového rezania:

- prúdový výboj – čím väčší je prúdový výboj, tým väčší je úbytok materiálu, iskrová medzera a taktiež drsnosť obrábaného povrchu,
- dĺžka impulzu – čím kratšia, tým je úbytok materiálu na jeden elektrický výboj menší a kvalita povrchu vyššia, súvisí s technikou generátora,
- frekvencia výbojov – podľa podmienok požadovanej technológie a vzdialenosti medzi obrábaným materiálom a nástrojovou elektródou,
- zapínacie napätie – čím je zapínacie napätie vyššie, tým väčšia je medzera medzi obrobkom a drôtom, a teda lepší výplach nečistôt z priestoru iskriska,
- polarita elektródy – pre hlavný rez a prvý dorez je drôt zapojený ako záporný pól, na posledný dorez je polarita elektródy rozdielna v závislosti na viacerých rezných podmienkach a nastaveniach technológie. [11]

2.5 Pracovné prostredie – dielektrikum pri WEDM rezaní

Použitie dielektrickej kvapaliny, čiže kvapaliny s veľmi malou elektrickou vodivosťou, má pri elektroiskrovom drôtovom rezaní zásadný vplyv na kvalitu obrábanej plochy, podobne ako tomu bolo pri EDM obrábaní. Všeobecne môžeme povedať, že dielektrikum slúži na vytvorenie izolácie vonkajšieho elektrického poľa, ktoré pri WEDM rezaní je tvorené nástrojovou elektródou a obrábaným materiálom. Statické elektrické pole pri použití dielektrika zostane zachované aj bez neustáleho prívodu elektrického náboja. [1, 5]

Najčastejším médiom využívaným v praxi je deionizovaná voda, označovaná taktiež ako demineralizovaná alebo skrátene demi voda. Získava sa odstránením iónov rozpustených látok v bežne používanej vode, čo znižuje, resp. odstraňuje jej vodivosť. Ďalším odstraňovaným prvkom z dielektrika je kremík, zvyčajne sa vyskytujúci vo forme oxidu kremičitého. Fyzikálna veličina, ktorá popisuje schopnosť látky viesť elektrický prúd sa nazýva konduktivita alebo iným názvom elektrická vodivosť. Z definície je zrejmé, že látky s vysokou hodnotou konduktivity sú dobrými vodičmi a naopak látky s nízkou konduktivitou sú zlé vodiče alebo dokonca izolanty. Konduktivita deionizovanej vody býva nižšia ako $1\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a je teda vhodnou dielektrickou kvapalinou pre drôtové rezanie. Deionizovaná voda je podstatne kvalitnejšia než destilovaná voda a spĺňa najprísnejšie kritéria, avšak neustále si zachováva jednu výrazne negatívnu vlastnosť – chemickú agresivitu voči rezanému povrchu, ale aj ostatným plochám obrábaného materiálu, čím dochádza k vzniku korózie. Aby sa tento proces minimalizoval, pridáva sa do dielektrika antikoročný prostriedok na zníženie korózneho účinku. [8, 12, 13]

Ak použijeme ako dielektrickú kvapalinu vodu, musia byť splnené nasledovné zásady a požiadavky:

- kontrolovať kyslosť vody, aby sa jej pH pohybovalo v rozmedzí 7,5 až 8,5,
- zamedziť prístupu organických častíc, pretože môžu spôsobovať hnilobný zápach,
- vodivosť znižovať pomocou deionizačnej živice,
- musí sa vykonávať kontrola obsahu síranov, chloridov a uhličitanov, z dôvodu zabezpečenia prijateľnej tvrdosti, čím sa predchádza usadzovaniu vodného kameňa na častiach stroja,
- pri obrábaní tvrdokovov a hliníka je potrebná častejšia výmena média, pretože počas obrábania týchto materiálov výraznejšie rastie vodivosť. [14]

Dielektrikum je do priestoru rezania privádzané dvomi spôsobmi, ktoré sa dajú opísať nasledovne:

- Rezanie pri ponorení v dielektriku s prídavným výplachom – obrábaný materiál sa úplne ponorí do nádoby s dielektrikom, počas procesu rezania sa vykonáva prídavné vyplachovanie pod tlakom dvoma vodnými lúčmi, čím sa docieli intenzívnejšieho ochladzovania v iskrisku; ak to dovoľujú rozmery stroja a obrobka, tak je ponorenie vždy výhodnejšie, pretože zabezpečuje účinnejšie čistenie iskrovej medzery a lepšiu teplotnú stabilitu, čím sa zvyšuje presnosť a kvalita obrábaného povrchu,
- Koaxiálny výplach – tento spôsob umožňuje použitie dielektrika s vyššou vodivosťou, pričom je priamo do miesta rezu privádzané pozdĺž nástrojovej elektródy vyplachovacím systémom, čiže horným a dolným vodným lúčom z trysiek; tento spôsob vyžaduje prívod pod oveľa vyšším tlakom, čo má negatívny vplyv na kvalitu povrchu, preto sa pri najjemnejších technologických operáciách výrazne znižuje, aby sa zamedzilo hydrodynamickým vplyvom a erózia prebieha pomocou chladenia a odvádzania nečistôt vodným kúpeľom. [8]

Okrem toho sa dielektrická kvapalina používa na prídavné funkcie, ako je namáčanie kontaktov alebo obmývanie drôtu pri jeho nasatí a vedení.

2.6 Nástrojové elektródy pri elektroiskrovom drôtovom rezaní

V technológií elektroiskrového drôtového rezania predstavuje drôtová elektróda nástroj, ktorý nie je orientovaný a môže odoberať materiál v každom smere. V reznom procese sú na drôt kladené vysoké požiadavky z hľadiska presnosti a rýchlosti úberu materiálu. Spočiatku bol výber vhodného drôtu veľmi jednoduchý, pretože zahŕňal voľbu medenej alebo mosadznej elektródy od niekoľkých vtedajších výrobcov. Dnes je ale situácia na trhu značne odlišná a voľba vhodného materiálu a typu drôtovej elektródy vyžaduje oveľa väčšiu pozornosť. Správny výber úzko súvisí s reznými podmienkami a požadovanou presnosťou, ktorá je v priamej náväznosti na priemer použitého drôtu a jeho kruhovitosť. V súčasnosti sú na trhu drôty s priermi od 0,02 do 0,33 milimetra. Požiadavky na drôtovú elektródu sú predovšetkým:

- vysoká elektrická vodivosť – určuje veľkosť prenášaného prúdu do iskriska, vplyvom čoho je drôt vysoko zaťažovaný a následne sa zahrieva, čo umožňuje zvýšenie reznej rýchlosti; ak by drôtová elektróda nemala dostatočnú elektrickú vodivosť malo by to za následok pokles napätia, ktoré určuje energiu výboja medzi elektródou a obrobkom; dôsledkom poklesu energie by bolo nedostatočné natavovanie obrábaného materiálu,
- mechanická pevnosť a odolnosť voči pretrhnutiu – súvisí hlavne s odolnosťou drôtovej elektródy voči ťahovému napätiu, pretože je potrebné zabezpečiť napínanie na požadované predpätie, aby sa predchádzalo vzniku nepresností počas rezania; naproti tomu mechanická pevnosť nesmie byť príliš vysoká, pretože by pri značnom ťahovom namáhaní dochádzalo k nežiadúcej rozťažnosti; drôty dosahujú pevnosť 400 až 2000 N.mm⁻²; požiadavky na mechanickú pevnosť súvisia s polohou drôtu počas rezného cyklu – v zvislej polohe alebo maximálnom naklonení 5° by hodnoty mohli presahovať 900 N.mm⁻², pri miernom naklonení nad 500 N.mm⁻² a pri veľkom naklonení od 400 do 500 N.mm⁻²,
- vysoký bod tavenia – taktiež je považovaný za veľmi dôležitú vlastnosť, pretože zaručuje odolnosť drôtovej elektródy voči natavovaniu vplyvom elektrických výbojov a tým jej prispieva k rýchlejšiemu rezaniu obrábaného materiálu,
- prijateľná cena – ekonomickosť celého rezného procesu je primárna požiadavka každej strojárkej výroby a keďže náklady na drôty tvoria nezanedbateľnú časť nákladov na elektroiskrové drôtové obrábanie je správny výber a veľmi dôležitý; drôt sa v priebehu rezania použije iba raz a následne je odvádzaný ako nežiadúci materiál do zbernej nádoby. [16, 17]

Rozdelenie drôtových elektród z hľadiska použitých materiálov je nasledovné:

- nepovlakované - sú to drôtové elektródy zložené z jedného homogénneho materiálu bez žiadneho povlaku; hlavnými predstaviteľmi tejto skupiny sú mosadzné elektródy, ale v praxi sa môžeme stretnúť aj s inými materiálmi ako sú meď, wolfrám a molybdém,
- povlakované - homogénne elektródy nie sú vždy vzhľadom na obrábaný materiál veľmi praktické, preto sa vyvinuli povlakované elektródy, ktoré pri zachovaní homogénneho jadra zaručujú vysokú pevnosť pri zvýšení ťažnej sily počas obrábania,

- difúzne povlakované - pri použití zinkovaných povlakovaných elektród dochádzalo pri výboji k odpadávaniu tejto povrchovej vrstvy, čoho dôsledkom bola potreba zvýšiť jeho obsah na povrchu elektródy; zvýšenie sa podarilo dosiahnuť vďaka difúznemu žihaniu, ktoré zaisťuje, aby sa atómy dostali do miest s nižšou koncentráciou,
- kompozitné - kompozitné drôtové elektródy umožňujú kombinovať tradičné materiály s netradičnými, vďaka čomu je možné dosiahnuť výrazne odlišné vlastnosti,
- s gama povlakom - gama povlaky sa vyznačujú vysokým obsahom zinku; povrch je veľmi krehký, z toho dôvodu je hrúbka tejto vrstvy maximálne niekoľko mikrometrov; po dokončení výroby nie je jeho vrstva súvislá, ale mierne popraská vďaka čomu sa zvyšuje rýchlosť obrábania; nevýhodou je mierne znečistenie obrábaného povrchu. [17]

2.7 Technické parametre elektroiskrového drôtového rezania

Celkové parametre elektroiskrového drôtového rezania sú ovplyvnené mnohými faktormi vyplývajúcimi z podmienok rezania drôtovou elektródou, uvedenými v nasledujúcej kapitole 2.8. Okrem už spomínaných ovplyvňujúcich parametrov má významný vplyv aj kvalita vedenia rezacej hlavy pomocou guľôčkových skrutiek a rýchlosť celého procesu, ktorá závisí na dĺžke rezu a hrúbke opracovávaného materiálu. Avšak, aj vysoko presné guľôčkové skrutky sa mnohonásobným používaním opotrebovávajú, čím dôjde k zväčšeniu vŕlí a zhoršeniu presnosti polohovania. Použitím lineárnych pohonov v najmodernejších strojoch sa zaručuje dosahovanie vysokej presnosti po celú dobu životnosti stroja. Ďalším ovplyvňujúcim činiteľom presnosti je kmitanie drôtovej elektródy, ktoré je možné obmedziť stálym napínaním drôtu. [5, 8]

Pomocou moderných riadiacich systémov a použitím viacosých drôtových rezačiek s až piatimi osami je možné vytvoriť zložité tvary, ktoré by pri rezaní v základných X-Y osách nebolo možné. Pri týchto rezačkách je X-Y rovina rovinou spodného vedenia drôtovej elektródy a U-V rovina je rovinou horného vedenia drôtovej elektródy. Nastavenie v osi Z sa vykonáva za pokoja stroja, v mimoprevádzkovom režime, podľa hrúbky obrábaného materiálu. Veľkosť uhla nastavenia drôtovej elektródy býva $0^\circ - 45^\circ$. Na týchto najmodernejších strojoch pre elektroiskrové drôtové rezanie je možné rezanie kónických a úkosových tvarov. [8]

Prehľad základných technologických parametrov:

- rozsah používaných priemerov drôtov – 0,02 až 0,33 mm,
- veľkosť vnútorných rádiusov – 0,02 až 0,3,
- rovnobežnosť rezu – do 1,5 μm na 100 mm hrúbky materiálu,
- drsnosť povrchu R_a – 0,8 μm (po druhom reze)/0,07 μm (po viacnásobnom reze),
- úbytok materiálu – 25 až 500 $\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$,
- hrúbka obrábaných materiálov – 0,02 až 520 mm,
- presnosť rezania - 5 $\mu\text{m}/1\mu\text{m}$ (pri teplotnej stabilizácii stroja do 1°C),

- výplach pod tlakom – 0,2 až 18 bar. [18, 19]

2.8 Podmienky elektroiskrového drôtového rezania

Na programovanie moderných elektroiskrových drôtových rezačiek môžeme využiť generátor pracovných podmienok, ktorý na tvorbu technológie rezu využíva zadané štyri základne vstupné parametre:

- materiál a výška polotovaru,
- typ a priemer drôtu,
- typ obrábania,
- výsledná presnosť a kvalita povrchu.

Výber vhodných vstupných podmienok pre tvorbu technológie je čiastočne zovšeobecnený. Ako dobrý príklad je možné uviesť výber materiálu. Keďže pre každý obrábaný materiál nie je potrebné mať samostatnú technológiu, databáza materiálov v programe neobsahuje každý používaný druh materiálu, ale len typových predstaviteľov. Preto pri zadávaní parametrov používame materiál, ktorý je čo najviac podobný skutočne obrábanému. [20]

2.8.1 Materiál a výška polotovaru

Pri príprave technológie je najskôr vybraný materiál rezanej súčiastky, pretože podľa neho sú ovplyvňované niektoré vnútorné parametre generátora výbojov. Ako naznačuje kapitola 2.5, v nastavení rezného procesu má obsluha možnosť výberu z rôznych druhov materiálov ako napríklad mosadz, oceľ, spekané karbidy, meď, uhlík, keramický a polykryštalický materiál, hliník. Aby sa docielilo čo najväčšej zhody medzi požiadavkami na vyrobenú súčiastku a nastavením elektroerozívneho procesu je potrebné vybrať čo najvhodnejší materiál. [20]

Voľba výšky obrábaného dielca má taktiež zásadný vplyv na celkové parametre technológie rezania drôtovou elektródou, predovšetkým na rýchlosť posunu drôtu, kvalitu povrchu a rýchlosť rezania. Jednotlivé drôtové rezačky majú rôzne možnosti rezania maximálnej výšky materiálu v závislosti na ich rozmeroch a parametroch celého procesu. Zvyčajne sa v praxi obrábajú výšky od 10 do 400 mm, ale schopnosti tejto technológie sú aj mimo tohto intervalu. [20]

2.8.2 Typ a priemer drôtu

Typ vhodného drôtu je potrebné zvoliť podľa typu zariadenia, ktoré budeme používať. Ako je uvedené v kapitole 2.6, v súčasnej dobe je možné vykonávať rezy rôznymi priermi drôtu bez výmeny vodítok, alebo je dokonca drôtová rezačka vybavená dvoma cievkami. Priemer použitého drôtu je stanovený na základe hodnoty minimálneho vnútorného polomeru, ktorý má byť vyrobený na obrábanej súčiastke. Drôt pre prípravu technológie sa vyberie v priebehu opisu kontúr súčiastky. Vybraný drôt, ktorý bol určený pri príprave technológie a zvolení obrábaného materiálu vo väčšine prípadov zodpovedá drôtu, ktorý použijeme u samotnej rezačky. V prípade, že sa tak nestane, je potrebné

definovať priemer drôtu v každom pracovnom kroku určitej technológie, napríklad zmeniť priemer drôtu v hrubovacom a dokončovacom reze. Existujú dve základné možnosti výberu priemeru drôtu a to pre jednotlivý pracovný krok alebo výber drôtu určený priamo pomocou technológie. Pri programovaní technológie rezu umožňuje program výber buď použitia drôtu, ktorý bol definovaný pri voľbe technológie, alebo iný drôt špecifikovaný v jednotlivých pracovných krokoch. [20]

2.8.3 Typ obrábania

Medzi dôležité podmienky charakterizujúce zvolenú technológiu rezu patrí typ obrábania, pretože určuje nastavenie parametrov generátora elektrických výbojov a má vplyv na výber iných pracovných krokov. Ide hlavne o rezy, ktoré sa v praxi využívajú menej často, avšak pri výrobe niektorých súčiastok je ich použitie potrebné. Jedná sa najmä o vyrezávanie úkosom, rezanie premenlivej výšky a bezodpadové rezanie („kapsovanie“). [8, 20]

2.8.4 Výsledná presnosť a kvalita

Výsledná kvalita súčiastky pozostáva z dvoch parametrov, ktoré sa vyberajú pri tvorení požadovanej technológie. Jedná sa o parameter štruktúry povrchu a o parameter presnosti obrábaných plôch. Obe podmienky určujú počet vykonávaných pracovných krokov, ktoré sa musia uskutočniť, aby sa dosiahlo požadovaných hodnôt. [8, 20]

Kvalita štruktúry povrchu je jednou z najdôležitejších technologických charakteristík elektroiskrového drôtového rezania, ktorá vymedzuje oblasť použitia tejto technológie. Kvalita povrchu je úzko spätá s parametrami jednotlivých elektrických výbojov, ako je uvedené v kapitole 2.4. Tie určujú rozmery vytvoreného kráteru po jednom výboji, čo má za následok, že so zvyšujúcou sa energiou vzrastá hĺbka a priemer kráteru, a tým klesá celková kvalita povrchu. Výsledná kvalita štruktúry povrchu sa preto nedosahuje pomocou jedného rezu, ale spravidla postupným opracovaním – hrubým opracovaním a záverečným dokončovaním. Ako už bolo uvedené, všeobecne platí, že vyššej kvality povrchu sa dosahuje pri nižších hodnotách prúdu, krátkych impulzoch a vysokých frekvenciách elektrických výbojov. [20]

Do prípravy technológie vyberáme parameter drsnosti R_a (strednej aritmetickej odchýlky profilu) podľa požadovanej hodnoty z výkresovej dokumentácie vyrábanej súčiastky. Parameter drsnosti R_a je štandardne prednastavený pri programovaní požiadaviek, avšak, môže byť užívateľom, obsluhou, zmenený na parameter R_z (najvyššia výška profilu). Vzhľadom na konkrétnu požiadavku konečnej štruktúry sa určuje počet krokov a najmä parametre posledného, dokončovacieho rezu. [20]

Presnosť vyrezávaných tvarov je daná viacerými podmienkami rezania, ako sú technické vlastnosti drôtovej rezačky, presnosť a spoľahlivosť riadiaceho systému, kvalitou prívodu a čistotou dielektrika a stabilita nastavených pracovných parametrov generátora. Na presnosť rezania má veľký vplyv, aby drôt vstupoval do miesta rezu dokonale napnutý a vyrovnaný. Počas priebehu výroby má na drôt vplyv niekoľko faktorov, ktoré spôsobujú geometrické nepresnosti:

- elektrostatické sily,
- vplyv predpätia drôtu,

- procesné sily,
- vibrácie drôtu,
- dynamické vplyvy počas rezu. [8, 20]

Drôtová elektróda vplyvom týchto faktorov nie je dokonale kolmá, alebo sa v niektorých typických miestach vychýľuje z reznej dráhy kontúr súčasti, a to najmä v rohoch a rádiusoch. Súbor chýb, ktoré majú za následok nepresný prechod drôtu v mieste rezu kvôli tzv. vlečeniu drôtu, vedie najčastejšie k vzniku súdkovitosti obrábaných plôch. [20]

2.9 Stroje pre elektroiskrové drôtové rezanie

Stroje pre elektroiskrové drôtové rezanie sú vyrábané v rôznych veľkostiach a dvoch základných prevedeniach – stojanovom a portálovom. U všetkých dnes vyrábaných drôtových rezačiek je celý proces riadený automaticky pomocou CNC systému. Aby sa skrátil celkový čas potrebný na výrobu, poprední výrobcovia dodávajú WEDM stroje vybavené automatickým vŕtaním zavádzacích dier alebo túto úlohu vykonávajú samostatné EDM vrtačky, ďalej systémom pre automatické navliekanie drôtu, automatickou reguláciou napínania drôtu a iným príslušenstvom.

Všetky stroje pre elektroiskrové drôtové rezanie majú svoje špecifické technické parametre, ktoré rozhodujú o ich možnostiach pri výrobe. Tieto parametre sú udávané výrobcami a určujúce pri výbere najvhodnejšieho stroja v závislosti na požiadavkách výroby. Tieto špecifiká je možné rozdeliť do niekoľkých kategórií, ku ktorým sa prihliada približne v takto uvedenom poradí:

- presnosť stroja a dosiahnuteľná drsnosť povrchu,
- maximálna rýchlosť rezania,
- veľkosť pracovného stola a maximálne rozmery upnutého polotovaru,
- maximálny uhol rezu,
- príkon stroja,
- váha a rozmery stroja,
- spôsob a náročnosť riadenia,
- spôsob navliekania drôtu,
- systém vedenia drôtu – potreba výmeny pre rôzne priemery drôtu,
- ostatné – rozsah priemeru drôtov, maximálna veľkosť použitej cievky s drôtom, systém výplachu, atď..

Stroje pre elektroiskrové drôtové rezanie sa skladajú z niekoľkých hlavných častí. Patria sem najmä:

- rám stroja,
- systém vedenia drôtovej elektródy,
- generátor elektrických impulzov (opísaný v kapitole 2.4),

- upínací systém,
- CNC riadiaci systém a pohyb súradnicových osí,
- systém dodávania, filtrácie a chladenia dielektrika. [1]

2.9.1 Rám stroja

Rám stroja má najčastejšie tvar písmena C, pričom musí spĺňať dostatočnú geometrickú presnosť, tuhosť a stabilitu. Aj keď počas elektroiskrového drôtového rezania nepôsobia žiadne mechanické sily ani zaťaženia, musíme brať na zreteľ odolnosť voči hydraulickým silám, ktoré vznikajú pri kontinuálnom prúdení dielektrika medzi nástrojom a obrobkom, ako aj pri jeho prečerpávaní zo zásobníka pomocou čerpadiel. Tieto sily závisia od parametrov daných podmienkami obrábania, presnejšie od potrebného tlaku pri výplachu. Rámy sa najčastejšie vyrábajú zo šedej liatiny, pretože tento materiál dokáže dobre tlmiť nárazy a chvenie. Veľmi dôležitou vlastnosťou rámu je jeho teplotná stabilita, pretože má priamy vplyv na presnosť dosiahnutú pri vyrezávaní súčiastky. Ako bolo uvedené v kapitole 2.7, aby sa presnosť pohybovala v rozsahu menšom ako 1 μm, musí byť teplotná stabilizácia 1°C. Teplotná stabilizácia je zabezpečovaná vhodnou cirkuláciou dielektrickej kvapaliny tepelne namáhanými časťami rezačky v kombinácii s riadeným obehom atmosférického vzduchu v jej najbližšom okolí. Pre dostatočnú tepelnú stabilizáciu je taktiež potrebné použiť izolačné materiály, ktoré pokrývajú rám stroja a zakrytie pracovného priestoru. Najdôležitejšie je zabezpečiť tepelnú stabilizáciu pracovného stola a hnaných mechanizmov ako sú napríklad skrutky. V ráme stroja sú uložené dôležité časti – support s nástrojom, pracovný stôl na upínanie obrobka, nádrž na dielektrikum, prečerpávacie čerpadlá, riadiace centrum. [1, 3]

2.9.2 Systém vedenia drôtovej elektródy

Systém vedenia drôtovej elektródy zabezpečuje plynulé odvíjanie drôtu zo zásobníka cievky a jeho následné navliekanie. Cievka býva umiestnená v prednej alebo zadnej časti drôtovej rezačky v závislosti od výrobcu a typu stroja. Rýchlosť odvíjania je riadená pomocou riadiaceho systému, ktorý reguluje otáčky motora. Drôt je vedený cez systém vyrovnávacích kladiek, kde je pomocou stlačeného vzduchu privádzaný až do hornej rezacej hlavy, presnejšie na horné vodítko. V tejto časti je väčšina moderných drôtových rezačiek vybavená automatickým navliekaním drôtu, vďaka čomu je možná bezobslužná prevádzka. Systém automatického navliekania drôtu nie je jednotný a vďaka rôznym spôsobom od jednotlivých výrobcov ponúka viacero možností:

- prúdom dielektrickej kvapaliny, ktorá je prúdom hnaná cez technologický otvor z horného vodítka na vodítko dolné,
- mechanickým podávacím systémom, kde sa pomocou podávacích kladiek cez vysunutú trubičku cez štartovací otvor vedie voľný koniec drôtu k odoberacím kladkám spodného vodítka. [3]

Po navlečení prechádza drôtová elektróda spodnou hlavou, kde je za sadou ťažných kladiek odvádzaná do zbernej nádoby. V tomto priestore môže byť zbytkový drôt pomocou deliaceho zariadenia rozsekaný na niekoľkomilimetrové kusky. Pri samotnom reznom procese je na drôtovú elektródu kladená požiadavka plynulého odvíjania a potrebného predpätia. Predpätie vyvoláva brzdové koliesko ovládané pomocou riadiaceho systému

stroja. Nepravidelnosti v odvíjaní a chybné predpätie môžu viesť k častému pretŕhaniu drôtu, čím sa predlžuje rezný proces a spotreba drôtovej elektródy. V prípade ak dôjde k pretrhnutiu počas rezu, tak riadiaci systém odstrihne zbytkový drôt alebo ho navinie späť, následne vráti vodítka späť do počiatočného bodu, opätovne navlečie drôt a pomocou predprogramovanej dráhy sa vráti späť do pozície, v ktorej došlo k pretrhnutiu. Následne pokračuje v reznom procese bez ďalších korekcií.

Veľmi dôležitú úlohu taktiež zabezpečujú vodítka drôtovej elektródy. Tie zaisťujú presnú polohu drôtu pri priechode miestom rezu. Vodítka musia byť vyrobené z nevodivého materiálu s veľkou odolnosťou proti odieraniu. Zaoblený tvar vodítok uľahčuje pri vstupe navliekanie v prípade pretrhnutia a ich sklon pri výstupe umožňuje rezanie pod uhlom v prípade opracovávania kónických plôch. Keďže počas obrábania podliehajú opotrebovaniu sú konštruované ako vymeniteľná súčiastka, aby sa v prípade ich opotrebovania zabránilo nepresnostiam počas rezu. [13, 14]

Vedenie drôtovej elektródy zabezpečuje okrem jej plynulého odvíjania dodržiavanie nasledujúcich podmienok:

- vhodná rýchlosť rezania – maximálna vzpriamenosť drôtu, ktorý sa deformuje vplyvom mechanických a hydraulických síl pôsobiacich na drôt, a tým zníženie pravdepodobnosti nebezpečenstva pretrhnutia drôtovej elektródy,
- správne mechanické napínanie drôtu – opotrebovanie drôtu nesmie byť príčinou nadmerného rozdielu priemeru drôtu na hornej a dolnej strane obrobku, pretože tým stráca požadovanú pevnosť v ťahu a taktiež má za následok zvýšenie nebezpečenstva pretrhnutia drôtu spôsobeného týmto rozdielom,
- udržiavanie iskrovej medzery - vytvorenie elektrického napätia medzi drôtom a obrobkom pre elektroiskrové obrábanie prostredníctvom priblíženia na ideálnu vzdialenosť pre vznik elektrického výboja, zhotovenie plôch podľa zadaných tvarov prostredníctvom vedenia drôtu nad a pod obrábaným materiálom. [13]

2.9.3 Upínací systém

Upínací systém je ďalšou dôležitou súčasťou drôtovej rezačky, pretože od správneho upnutia a ustabilizovania obrábaného materiálu závisí presnosť rezania. Tento systém zaisťuje polohu obrobku tak, aby nedošlo k jeho posunutiu, ktoré môže byť vyvolané reznými silami alebo tlakovým účinkom dielektrickej kvapaliny pri vyplachovaní. Keďže pri elektroiskrovom drôtovom obrábaní nepôsobia žiadne výrazné mechanické sily od nástroja ako pri trieskovom obrábaní, nie sú naň kladené tak vysoké nároky.

Základom upínacieho systému je pracovný stôl, ktorý je tvorený dvoma lištami alebo pevným rámom a po stranách vybavený sústavou závitových dier pre zaistenie upínacieho zariadenia. Upínanie obrobku na starších typoch strojov bolo pomocou zveráku a svoriek. V dnešnej dobe je možné na upínanie využiť niekoľko variant v závislosti od požiadavkách výroby. Upínanie sa vykonáva pomocou referenčných pravítok, lišt alebo iných segmentov, ktoré sú dostupné od rôznych výrobcov. Samotné zaistenie polohy obrábaného materiálu je pomocou trecej sily medzi polotovarom a upínacím segmentom, na ktorý je vyvíjaný potrebný tlak. Na pracovný stôl je taktiež možné upnúť niekoľko odlišných obrobkov a následne ich rezať v ľubovoľnom poradí, prípadne meniť poradie obrábaných súčiastok v priebehu rezného procesu. Moderné typy upínacích prostriedkov dovoľujú

vykonať celý proces upínania mimo pracovný priestor stroja, čím sa výrazne znižuje čas potrebný na prípravu ďalšieho rezného cyklu. Toto zefektívnenie zlepšuje časovú využiteľnosť stroja, najmä ak sa jedná o výrobu v stredných a väčších sériách. Využitím uvedeného systému upínania je možné v popoludňajšej zmene pripraviť niekoľko upínacích rámov a v nočnej zmene znížiť počet potrebných pracovníkov na minimum, alebo dokonca docieľiť bezobslužnú prevádzku na určitý čas. [13, 21]

2.9.4 CNC riadiaci systém a pohyb súradnicových osí

Riadiaci systém umožňuje ovládať zariadenie pomocou počítača, kontroluje a koordinuje celý rezný proces. Zaisťuje predovšetkým presnosť a požadovanú kvalitu povrchu dosiahnutú elektroiskrovým drôtovým obrábaním. Pomocou neho môže obsluha opakovať predchádzajúce pracovné úkony, vykonávať zložité programovacie operácie, a tým zabezpečiť samostatnú prevádzku stroja. Hlavné súčasti riadiaceho systému sú:

- obrazovka – vďaka nej prebieha komunikácia a najmä kontrola a upozornenie obsluhy, dnes sú najpoužívanejšie dotykové TFT farebné obrazovky; slúži na zobrazenie parametrov, programov, tabuliek, hlásení, výkresu obrobná a grafického znázornenia prebiehajúceho rezného procesu,
- ovládacia klávesnica – vďaka nej obsluha zadáva alebo môže pozmeniť už zadaný program, prípadne jeho vstupné podmienky a tým parametre elektrického výboja, primárne slúži na zadávanie príkazov určených pre stroj,
- riadiaci procesor – slúži na preklad zadaných údajov z vykonávaného programu do jednotlivých pohybov a nastavení stroja, pomocou prednastavených výpočtov riadi podľa potreby pohyb jednotlivých osí; v dnešnej dobe používajú moderné stroje viacnásobné súradnicové systémy, pričom štyri osi sú vodorovné, X-Y v rovine stola a U-V v rovine hornej vodiacej hlavy drôtovej elektródy a jedna zvislá os Z, v ktorej sa vykonáva výškové nastavenie hornej rezacej hlavy v závislosti od hrúbky obrábaného materiálu; ďalšou z možností je pracovanie v absolútnom alebo prírastkovom súradnicovom systéme,
- centrálna pamäť – slúži na ukladanie programov, parametrov, tabuliek, predchádzajúcich obrábaných súčiastok so stanovenými charakteristikami, ďalej na zálohovanie a prípadnú výmenu dát medzi pracoviskami,
- rozhranie stroja – jeho účelom je zisťovanie meraných údajov, ich vyhodnotenie v riadiacom procesore a následné predávanie povelov stroju; jednou z najdôležitejších úloh je dodržiavanie vzdialenosti medzi elektródami potrebnej k vzniku elektrického výboja, pričom mechanizmus regulácie pohybu elektródy umožňuje dodržiavať veľmi úzku medzeru medzi materiálom a drôtom, vďaka čomu je možné dosahovať takej vysokej kvality povrchu a skrátiť celkový rezný čas. [3, 14]

2.9.5 Systém dodávania, filtrácie a chladenia dielektrika

Čerpací a filtračný systém zabezpečuje dodávanie dielektrika do miesta rezu, jeho správnu cirkuláciu a požadovanú kvalitu z hľadiska čistoty a teplotných výkyvov. Celý tento systém pozostáva z nádrže, filtračného systému, deionizačného systému, chladiacej

jednotky, vysokotlakových čerpadiel určených na dostatočný výplach, prečerpávacích čerpadiel a potrubí. Tieto časti bývajú zvyčajne uložené v základoch stroja, pretože je dôležité minimalizovať vplyv vibrácií na rezný proces. [10, 14]

Pri elektroiskrovom drôtovom obrábaní je najskôr čisté dielektrikum nasávané pomocou čerpadla z nádrže a privádzané do pracovnej vane, kde následne prebieha proces obrábania. Podľa výšky obrábaného materiálu je nastavená výška vane tak, aby celý rezný proces prebiehal pod hladinou dielektrika. Počas celej doby vyiskrovania je znečistené dielektrikum odvádzané do zásobníka so znečistenou kvapalinou. Z tejto nádrže je prečerpávané cez systém filtrov, kde sa zbavuje produktov elektroerózie a následne opäť do nádrže s čistou dielektrickou kvapalinou. Ako náhle sú filtre príliš znečistené, aby plnili svoju čistiacu funkciu, systém na tento problém upozorní. Ak sú použité papierové filtre, tak je potrebné, aby ich obsluha vymenila za nové. Ak sú použité usadzovacie filtre, tak systém automaticky privedie stlačený vzduch na ich povrch a tlakom ich vyčistí. Nečistoty, ktoré počas tohto tlakového čistenia odpadnú sú odplavené do kalovej nádrže. Na filtráciu dielektrika je možné použiť aj iné systémy, ako je napríklad systém s olejovým filtrom alebo filtrami s obalovou vrstvou. Kvalita dielektrika je počas jeho prečerpávania neustále meraná, pretože počas rezania sa strácajú jeho dielektrické vlastnosti. Ak sa zvýši jeho vodivosť na kritickú hranicu je automaticky presmerované cez zásobník deionizačnej živice, kde opäť nadobúda požadované dielektrické vlastnosti. Dielektrická kvapalina je súčasne s uvedeným cyklom hnaná na vodítka drôtu, aby sa zaistilo vyplachovanie. [10, 14]

2.10 Zhrnutie výhod, možností a nevýhod WEDM rezania

Rozvoj technológie elektroiskrového rezania drôtovou elektródou priniesol niekoľko výhod, vďaka ktorým zastáva významné postavenie v oblasti strojárkej výroby. Tieto výhody posúvajú WEDM technológiu na popredné priečky najmä v oblasti obrábania tvrdých, avšak, vodivých materiálov. V porovnaní s tradičnými metódami obrábania poskytuje niekoľko výhod, ktoré znamenali efektívnejší spôsob výroby najrôznejších súčiastok:

- možnosť obrábať veľmi tvrdé materiály – pri obrábaní veľmi tvrdých materiálov tradičnými konvenčnými metódami dochádza k rýchlemu opotrebovaniu rezného nástroja, ktorý musí byť značne pevnejší ako materiál obrobka, v niektorých prípadoch je veľmi náročné alebo dokonca nemožné takto tvrdý materiál vôbec obrábať; pri rezaní drôtovou elektródou nedochádza ku kontaktu nástroja a obrábaného materiálu, preto môže byť materiál drôtovej elektródy nižšej kvality ako obrobok,
- nemenná geometria nástroja – vďaka tomu, že sa pri elektroiskrovom drôtovom rezaní rovnako ako pri EDM obrábaní všeobecne nevyskytujú klasické rezné sily ale len sily počas elektroerózie, nedochádza k opotrebovaniu nástroja, ako je tomu počas trieskového obrábania; drôt sa neustále odvíja, aby sa zachovali čo najkonštantnejšie parametre počas elektrického výboja, pričom reže neustále rovnakým prierezom daným zvolenou technológiou; kvôli tomuto dôvodu nie je nutná postupová korekcia, ako je tomu pri obrábaní pomocou britov, ktoré sa opotrebovávajú; príčinou zmeny priemeru drôtu môže byť potreba obrábania jednej z plôch obrobka s vyššou kvalitou, avšak, v praxi je to výnimka,

- vysoká presnosť a kvalita povrchu – drôtová elektróda sa pohybuje po dopredu presne určenej dráhe riadenej pomocou CNC systému . Ako bolo v tejto kapitole spomenuté, nástroj neprichádza do kontaktu s obrábanym materiálom, preto naň nepôsobia žiadne silové účinky vyvolané vibráciami alebo dotykom, vďaka tomu je opakovane možné dosiahnuť vynikajúcej presnosti, navyše na povrchu obrábanej súčiastky nevznikajú žiadne ostriny a výsledná kvalita povrchu najmä po viacnásobnom reze zodpovedá brúsenej ploche, kvôli čomu môžeme WEDM rezanie drôtovou elektródou považovať za dokončovaciu operáciu; ďalším dôvodom vynikajúcich konečných vlastností je, že materiál obrobka sa opracováva na konečné rozmery spravidla až po tepelnom spracovaní, čím je možné vyhnúť sa objemovým a rozmerovým zmenám súčiastky pri dodatočnom tepelnom spracovaní,
- obmedzenie tepelných deformácií – pri rezaní materiálu obrobka drôtovou elektródou nevzniká na povrchu nástroja a obrobka tak vysoká teplota ako pri trieskovom obrábaní, ktorej vplyv spôsobuje deformácie, tie sa následne najčastejšie odstraňujú žihaním k zníženiu vnútorného napätia; ako bolo uvedené v kapitole 2.5, pri elektroiskrovom drôtovom rezaní je obrobok zvyčajne ponorený vo vodnom kúpeli, čím sa zabezpečuje dostatočné chladenie, vďaka čomu sa takmer obmedzuje tepelný vplyv na vyrábanú súčiastku, čím je hrúbka tepelne deformovanej vrstvy veľmi malá,
- rezanie zložitých geometrických tvarov – za jednu z najväčších výhod elektroiskrového rezania drôtovou elektródou môžeme považovať výrobu tvarovo veľmi zložitých súčiastok, ktoré by nebolo možné vyrobiť konvenčnými metódami v jednom kuse, okrem toho drôtové rezačky umožňujú vyrezávať veľmi malé vnútorné rádiusy, ktoré napr. kvôli polomeru nástroja nie je možné vyrobiť frézovaním; u moderných WEDM strojov sa horná a dolná vodiaca hlava pohybujú nezávisle na sebe, čím je možné vyrezávať tvarové plochy s úkosmi,
- rezanie viacerých súčiastok súčasne – keďže pri elektroiskrovom rezaní elektródou je drôt vedený vo vertikálnom smere a maximálna opracovávaná hrúbka môže v závislosti na parametroch stroja dosahovať až 520 mm, je možné rezať viac rovnakých súčiastok naraz v jednom reznom procese, čo sa v praxi často využíva pri výrobe razníkov alebo nástrojových elektród pre elektroerozívne hĺbenie,
- ekonomická výhodnosť WEDM rezania – všetky uvedené výhody elektroiskrového drôtového rezania, ale aj niekoľko ďalších zaručujú, že obrobený materiál je z ekonomického hľadiska výhodnejšie obrábať práve touto metódou, než pri rovnakých pracovných podmienkach využiť tradičné, konvenčné metódy; použitím viaczložkových drôtov s gamma povlakom je možné dosahovať výrazne vyšších obrábacích rýchlostí, a tým rapídne znížiť obrábacie časy; ďalšou nespornou výhodou je, že vzniká oveľa menší odpad ako pri trieskovom obrábaní, čo opäť znižuje náklady na celkovú výrobu; za zmienku stojí aj takmer bezobslužný režim, kedy vďaka naprogramovaniu dokáže drôtová rezačka vyrezávať bez zásahu obsluhy do celého procesu niekoľko súčiastok, napríklad razníkov. [22, 23]

Z hľadiska obrábaných materiálov sa elektroiskrové drôtové rezanie využíva najmä na:

- rezanie vysoko tvrdých elektricky vodivých keramických materiálov, ako sú SiC, TiN, Si₃N₄,
- delenie nástrojových a chirurgických ocelí,
- obrábanie ocelí v zakalenom stave,
- delenie a opracovávanie rezných doštičiek zo spekaných karbidov, kubického nitridu bóru a polykrištálického diamantu,
- obrábanie duralu, titánu, karbidov wolfrámu a tvrdých zliatin niklu.

Z hľadiska používania vo výrobe sa technológia elektroiskrového drôtového rezania využíva na:

- výroba razníkov a komponentov pre strižné a lisovacie nástroje – tvarovacie strižníky, otvory pre tvarovacie strižníky v kotviacej doske,
- výroba meradiel – šablóny, etalóny, kalibre pre ozubenia,
- výroba malých súčiastok pre kardiostimulátory a hodinárstvo,
- výroba elektród z grafitu alebo medi pre EDM obrábanie,
- výroba súčiastok pre elektrotechnický a letecký priemysel,
- výroba medicínskych nástrojov,
- výroba tvarovo zložitých súčiastok alebo súčiastok s vysokou presnosťou pre široké spektrum priemyselných odvetví. [10]

Ako každá technológia, tak aj elektroerozívne drôtové rezanie má svoje nevýhody. Jednými z najväčších sú:

- neschopnosť obrábať elektricky nevodivé materiály,
- obrobok musí byť počas celého priebehu ponorený v dielektriku alebo musí byť zabezpečený dostatočný výplach v mieste rezu,
- znížená produktivita pri obrábaní menej tvrdých materiálov,
- obrábaný polotvar musí mať rozmery upnutelné v stroji,
- vysoké prvotné náklady na zakúpenie stroja,
- nepriama úmera produktivity obrábania v kombinácii s výslednou kvalitou povrchu.

3 EXPERIMENTÁLNE ZÍSKANIE ROZMEROVÝCH DÁT A ÚDAJOV KVALITY POVRCHU

3.1 WEDM rezanie pri získavaní experimentálnych vzoriek

Cieľom experimentálnej časti tejto bakalárskej práce bolo získanie vzoriek, zistenie ich presných rozmerov a hodnôt drsnosti povrchu. Zo získaných dát boli následne zostavené štatistické súbory, ktorých cieľom bolo komplexné zhodnotenie zozbieraných dát. Rozmery, materiál a spôsob výroby experimentálnych súčiastok boli volené vzhľadom na obmedzené možnosti, ktoré som mal počas tvorby práce k dispozícii.

Skúšobné obrobky predstavujú jednoduché hranoly s výškou 50 mm a hranami o rozmeroch 10 mm. Polotovar na výrobu vzoriek je zvyšok po vyrezaných štyroch kusoch razníkov. Výška bola volená vzhľadom na získaný materiál, aby nebolo potrebné obrábanie predchádzajúce samotným rezom. Celkové rozmery experimentálnych vzoriek boli kvôli finančnej nákladnosti elektroiskrového drôtového rezania volené čo možno najjednoduchšie, avšak za účelom získať dostatočný počet vzoriek, respektíve dostatočný počet obrábaných plôch. Dôvodom bolo zostavenie štatistických súborov, na čo bol minimálny postačujúci počet vzoriek stanovený na štyri kusy a tým 12 plôch obrobených dokončovacími rezi.

3.2 Parametre obrábacieho stroja

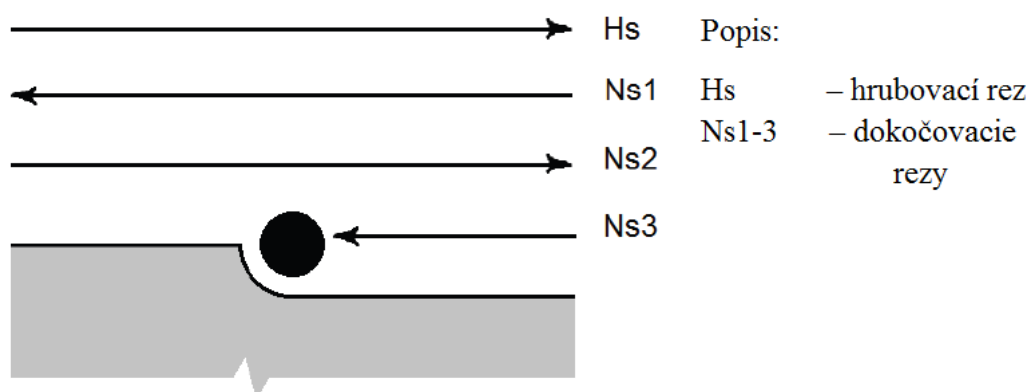
Experimentálne vzorky boli pomocou príslušnej technológie vyrezané na drôtovej rezačke AGIECUT 200 od švajčiarskeho výrobcu, firmy AGIE. Základné parametre tohto obrábacieho stroja sú uvedené v tabuľke 3.1.

Opisovaný parameter	Jednotka parametra	Hodnota/popis
Pojazd osí X, Y, Z	[mm]	400×250×256
Pojazd osí U,V	[mm]	±30
Max. uhol rezu	[°/mm]	±30/45
Max. rozmery obrobka	[mm]	580×860×250
Max. hmotnosť obrobka	[kg]	400
Rozmery stroja	[mm]	160×2000×2380
Hmotnosť stroja	[kg]	4180
Rok výroby stroja	[-]	1988
Max. rýchlosť obrábania	[mm ² /min.]	120
Presnosť rezu	[µm]	±3
Min. osové rozlíšenie	[µm]	1
Min. dĺžka kroku	[µm]	1
Drsnosť Ra pre NO	[µm]	0,35
Drsnosť Ra pre tvrdokovy	[µm]	0,4
Priemery drôtov	[mm]	0,1 až 0,3
Hmotnosť cievky	[kg]	16
Objem nádrže s dielektrikom	[l]	870
Objem deionizačnej nádrže	[l]	25
Systém filtrov	[-]	2×4 papierové
Systém deionizácie	[-]	deionizačná patróna
Systém polohovania	[-]	krokové motory
Systém kontroly teploty	[-]	kompresorové chladenie
Pracovný mód	[-]	rezanie pod hladinou

Tab.3.1 Parametre stroja AGIECUT 200 [24]

3.3 Technológia rezania na stroji AGIECUT 200

Aby sme pri rezaní experimentálnych vzoriek dosiahli vysokých rozmerových presností a čo najvyššiu kvalitu obrábaných plôch použili sme technológiu niekoľkých rezov (obr 3.1). Výsledné parametre obrábaných plôch sú ovplyvnené mnohými faktormi. Prvý rez je hrubovací, reže plný materiál, takže má mierne odlišné nastavenie parametrov ako rezy nasledujúce. Je rýchlejší, ale najmenej presný pretože jeho účelom je opis kontúry vyrábanej súčiastky. Po tomto reze nasledovali 3 dokončovacie, pri ktorých sa využívajú nižšie energetické parametre a tým sa dosahuje lepšia drsnosť povrchu a vyššia presnosť obrábania. Pri dokončovaní neodoberá drôtová elektróda celý svoj priemerom, ale len časťou. Úbytok materiálu sa s každým nasledujúcim rezom znižuje v závislosti od nastavení technológie. Týmto spôsobom sa dosiahnu konečné tvarové kontúry bez ďalších prídavkov na dokončovanie. Viac rezov výrazne predlžuje obrábací čas, čím sa úmerne zvyšuje cena na výrobu jednej súčiastky. Aby sa obmedzilo viacnásobné navliekanie a polohovanie drôtu vykonávajú sa rezy vždy v opačnom smere ako bol smer predchádzajúceho.



Obr. 3.1 Zobrazenie postupnosti rezov [10]

Pri rezaní uzavretých kontúr, ako je tomu v prípade výroby experimentálnych vzoriek, je potrebné počítať s tým, že ak dorežeme obrys súčiastky do konca stredová časť vypadne a môže spôsobiť problémy v ďalšom priebehu rezania. Z tohto dôvodu nerezeme kontúru do konca, ale nechávame nedorezanú časť, ktorá sa nazýva mostík. Jeho rozmery sa volia v dostatočnej veľkosti, aby pri dokončovacích rezoch nedošlo k deformáciám obrobka. Ak je to možné, volí sa jeho miesto na nefunkčnej ploche, kde je možné vykonať zabrúsenie pomocou rovinatej brúsky.

Pre samotný proces elektroerózie počas elektroiskrového drôtového rezania je najdôležitejšie nastavenie obrábacích podmienok (tab. 3.2). Ide predovšetkým o parametre generátora elektrických výbojov, tlaky výplachov, rýchlosti odvíjania drôtu a rýchlosti posuvov. Systém pre drôtovú rezačku AGIECUT 200 má tabuľky obrábacích podmienok integrované a ich priradenie na základe výšky obrábaného materiálu, druhu materiálu a priemeru drôtovej elektródy vykonáva obsluha z výrobcom priložených manuálov. Ukážka použitej technológie v návaznosti na zadané vstupné podmienky je uvedená v prílohe číslo 1. [24]

Nástrojom pri vyrezávaní experimentálnych vzoriek bol mosadzný drôt Berco Cut, ktorý je finančne dostupnejší ako technológiou doporučený Cobra cut A. Jeho základná vlastnosť zodpovedajú odporúčanému drôtu – priemer je 0,25 milimetra a mechanická pevnosť

900 N.mm⁻². Napriek predpokladanej dostatočnej pevnosti došlo počas obrábania štyroch experimentálnych vzoriek k jeho pretrhnutiu, čím sa rezný čas predĺžil o opätovné navlečenie a posuny do nulového bodu.

H [mm] – výška obrábaného polotovaru	50			
	Hs	Ns1	Ns2	Ns3
M – modul generátora	5	5	2	2
t – čas impulzu	5	8	26	30
I – vybíjací prúd	15	4	5	3
Pr – výkon počas kroku	10	1	1	1
P (P _{tab}) – vybíjací výkon	26	32	20	20
t _d – modul nečinných impulzov	25	47,5	30	30
HC – výšková kompenzácia	6	1	0	0
Cw – trieda drôtu	2			
Fw – napnutie drôtu	18	19	19	19
Aw [mm·s ⁻¹] – rýchlosť odvíjanie drôtu	120	120	90	90
B – modul zaplavenia	1			
K – vodivosť dielektrika	10			
Q – modul vyplachovania	4	1	1	1
Q _o [bar] – horný výplach	5			
Q _{on} [bar] – horný aj dolný výplach	0,2			
d [μm] – offsety (nastavenie iskrovej medzery)	198	157	136	131
P – stredná hodnota výkonu	24,5	25	18	17
v _s [mm·min ⁻¹] – stredná rýchlosť posuvu	1,2	2	1,6	1,8
v _{sm} [mm·min ⁻¹] – str. rýchlosť posuvu pre celé obrábanie	0,4			

Tab. 3.2 Parametre technológie použitej pri výrobe experimentálnych vzoriek [24]

Tabuľka 3.2 uvádza presné hodnoty nastavených veličín len v prípadoch niekoľkých parametrov, pri ktorých sú uvedené jednotky. Zostávajúce parametre sú definované pomocou číslíc, ktoré zodpovedajú rôznym režimom. Príkladom je modul generátora, pri ktorom údaj 1 a 2 poukazuje na dokončovacie parametre privádzaných prúdov a napätí a údaj 3 až 6 na parametre výkonovo vyššie. Ďalším príkladom je modul výplachu, pri ktorom údaj 4 znamená pri danom reze použitie vysokého horného výplachu a dolného odsávania a údaj 1 použitie horného a dolného výplachu súčasne, ale o menšom tlaku. Všetky tieto informácie sú uvedené v technických manuáloch priložených výrobcom pre daný obrábací stroj. [20, 24]

3.4 Použitý materiál

Ako materiál pre výrobu experimentálnych vzoriek bola použitá vysokolegovaná ledeburitická chrómová nástrojová oceľ 19 573 (1.2379) od švédskej firmy Uddeholm. s nasledujúcimi charakteristickými vlastnosťami:

- dobrá obrobitelnosť po opotrebovaní,
- dobrá odolnosť voči vyštíepovaniu strižných hrán,
- veľmi vysoká odolnosť proti abrazívnemu opotrebovaniu,
- vyššia pevnosť v tlaku,
- vysoká húževnatosť,

- vyššia tvrdosť dosahujúca po vysokoteplotnom popúšťaní až hodnôt viac ako 60 HRC,
- veľmi dobrá prekaliteľnosť,
- dobrá odolnosť voči popúšťaniu,
- veľmi dobrá stabilita na drôtovej rezačke,
- vhodnosť pre povrchové úpravy – nitridovanie, PVD, CVD,
- veľmi dobrá rozmerová stálosť pri kalení,
- veľmi dobrá opracovateľnosť a brúsiteľnosť. [25]

Pre použitú oceľ udáva výrobca tieto percentuálne hodnoty chemického zloženia:

- chróm – 12%,
- uhlík – 1,55%,
- vanád – 0,8%,
- molybdén – 0,7%,
- mangán – 0,3%,
- kremík – 0,3%,
- nikel – 0,18%,
- wolfrám – 0,13%,
- síra – 0,013%. [25]

Spomínaná oceľ sa najčastejšie používa pre výrobu činných častí lisovacích strojov, ktoré pracujú za studena. Kvôli svojej životnosti sú používané najmä ocele s obsahom chrómu, pretože ponúkajú dostatočnú odolnosť, a to hlavne proti abrazívnemu opotrebovaniu. Dôvodom je vysoký podiel karbidov chrómu, ktoré sú usporiadané do typickej riadkovej štruktúry. S príchodom kvalitnejších pracovných materiálov, ako sú napríklad vysokopevné plechy pre automobilový priemysel, sa austenitické nerezové a povlakované pásy s obsahom chrómu 12% dostávajú na limit svojich akostných možností preto môže dôjsť k neočakávaným výpadkom krehkým porušením, hlavne na strižných hranách. [25]

Použitá nástrojová oceľ 19 573 od výrobcu Uddeholm Sleipner s uvádzaným obsahom chrómu 12% poskytuje pri rovnakej alebo lepšej odolnosti proti opotrebovaniu v adhézných alebo zmiešaných adhézno-abrazívnych podmienkach (len veľmi malý podiel strižných operácií sa vyznačuje čisto abrazívnym typom opotrebovania) podstatne vyššiu stabilitu strižných hrán, čo je z hľadiska použitia vyrábaných strižných nástrojov podstatný faktor. [25]

Typickým použitím nástrojových ocelí s týmito vlastnosťami a chemickým zložením môže byť:

- strihanie a presné strihanie ocelí so stredným obsahom uhlíka alebo valcovaných za studena,

- nože nožníc,
- tvarovanie za studena,
- rezanie mincí a iných ozdobných predmetov,
- pretláčanie za studena,
- valcovanie závitov,
- ťahanie a hlboké ťahanie,
- lisovanie práškov. [25]

Pre oceľ použitú na výrobu experimentálnych vzoriek udáva výrobca tepelné spracovanie:

- žihanie na mätko - účelom tohto procesu je chrániť povrch nástroja pred oduhličiením a zohriať materiál v celom priereze na teplotu 830 - 860°C a následne pomaly ochladzovať poklesom teploty v peci 10°C za hodinu až na hranicu 650°C a ďalej voľne na vzduchu,
- žihanie na odstránenie vnútorných pnutí - po hrubom opracovaní sa polotovar zahrieva na 650 - 680 °C v celom svojom priereze a táto hodnota sa udržiava po dobu dvoch hodín, následne sa nástroj pomaly v peci ochladzuje na teplotu 500°C a ďalej voľne na vzduchu,
- kalenie - prebieha v troch stupňoch, spočiatku sa materiál predhrieva na teplotu tesne pod 500°C, následne sa zahrieva na teplotu tesne pod 900°C a v poslednej fáze na teplotu v rozmedzí 1060 - 1080°C. Výdrž na kaliacej teplote po vyrovnaní teploty povrchu a jadra je stanovená na čas 30 minút. Táto procedúra taktiež chráni nástroj pred oduhličiením, ale ešte aj pred oxidáciou. Ako kaliace médium sa používa olej,
- popúšťanie - tento proces nasleduje ihneď po dosiahnutí 50 - 70°C z kaliacej teploty; vo všeobecnosti sa popúšťacia teplota volí z popúšťacieho diagramu v závislosti od požadovanej výslednej tvrdosti materiálu; popúšťanie prebieha trikrát s medzichladením na teplotu 25°C, prvé dve popúšťania dosiahli teplotu 560 °C, záverečné tretie 540°C a čas výdrže na požadovanej hodnote je stanovený na dve hodiny; po tomto procese by podiel zbytkového austenitu nemal presiahnuť 1%. [25]

4 ŠTATISTICKÉ VYHODNOTENIE ROZMEROVÝCH ÚDAJOV

4.1 Odchýľky obrábaných plôch

Pri elektroiskrovom drôtovom obrábaní je odchýľka obrábaných rozmerov a tvarov oproti požadovaným rozmerom daná vzťahom (4.1).

$$\delta = \delta_{ESF} + \delta_{PD} + \delta_{PF} + \delta_{VD} + \delta_D + \delta_T \quad (4.1)$$

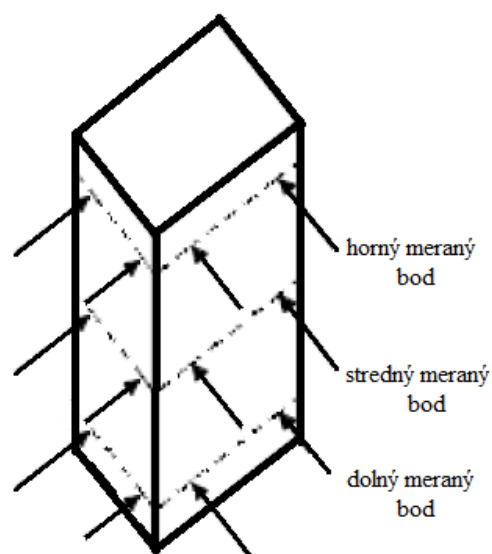
kde:	δ [μm]	-	celková odchýľka rozmerov a tvarov,
	δ_{ESF} [μm]	-	odchýľka vplyvom elektrostatických síl,
	δ_{PD} [μm]	-	odchýľka vplyvom predpätia drôtu,
	δ_{PF} [μm]	-	odchýľka vplyvom procesných síl,
	δ_{VD} [μm]	-	odchýľka vplyvom vibrácií drôtu,
	δ_D [μm]	-	odchýľka vplyvom dynamických činiteľov,
	δ_T [μm]	-	odchýľka vplyvom teplotnej nerovnováhy.

4.2 Vyhodnotenie experimentálnych vzoriek

Vyhodnotenie obrábaných plôch bolo vykonané na trojosovom meracom stroji ZEISS Prismo 5. Samotné meranie v jednotlivých bodoch experimentálnych vzoriek vykonáva dotyková sonda. Pomocou softwaru dodávaného k tomuto stroji boli vypracované štyri meracie protokoly, z ktorých jeden je na ukážku uvedený v prílohe číslo 2. Keďže experimentálne vzorky slúžili len k vypracovaniu bakalárskej práce neboli vyrábané podľa technickej dokumentácie, preto ako horná a dolná medza odchýľky boli zvolené parametre 50 μm . Zo získaných dát boli následne zostavené tabuľky 4.1 až 4.4 (tab 4.1 až tab. 4.4) pre jednotlivé experimentálne vzorky. Údaje uvedené v týchto tabuľkách sú uvedené po nasledujúcimi skratkami:

- menovitý rozmer MR – rozmer predpísaný výrobným výkresom alebo požadovaný zadávateľom pri výrobe, hodnota ležiaca medzi dvoma medznými rozmermi, ktorá sa v technickej dokumentácii uvádza ako horná a dolná medzná úchylka,
- horná medzná úchylka súčasti HMO – rozdiel medzi horným medzným rozmerom a menovitým rozmerom obrábanej súčasti,
- dolná medzná úchylka súčasti DMO – rozdiel medzi dolným medzným rozmerom a menovitým rozmerom obrábanej súčasti,
- odchýľka rozmerov o_n – nameraná hodnota predstavujúca rozdiel medzi menovitým rozmerom súčasti a skutočným rozmerom.

Meranie vzoriek prebiehalo za stálej teploty prostredia a experimentálnych vzoriek, aby sa zamedzilo vplyvu tepelnej nestability. Hodnoty boli získané na dvoch na seba kolmých, niekoľkonásobne obrábaných plochách, na každej v šiestich bodoch, vždy 3 milimetre od horného a dolného okraja a v strede obrobka ako názorne vidieť na (obr. 4.1).

Obr. 4.1 Miesta merania parametrov T_{km}

Meraná hrana	Poloha merania:	MR[mm]	ZR[mm]	HMO[mm]	DMO[mm]	σ_n [mm]
A	na vrchu	10	9,968	0,050	- 0,050	- 0,032
	uprostred	10	9,982	0,050	- 0,050	- 0,018
	dole	10	9,984	0,050	- 0,050	- 0,016
B	na vrchu	10	9,976	0,050	- 0,050	- 0,024
	uprostred	10	9,985	0,050	- 0,050	- 0,015
	dole	10	9,984	0,050	- 0,050	- 0,016
C	na vrchu	10	9,966	0,050	- 0,050	- 0,034
	uprostred	10	9,982	0,050	- 0,050	- 0,018
	dole	10	9,982	0,050	- 0,050	- 0,018
D	na vrchu	10	9,963	0,050	- 0,050	- 0,037
	uprostred	10	9,980	0,050	- 0,050	- 0,020
	dole	10	9,983	0,050	- 0,050	- 0,017

Tab.4.1 Hodnotenie vzorky číslo 1

Meraná hrana	Poloha merania:	ZR[mm]	ZR[mm]	HMO[mm]	DMO[mm]	σ_n [mm]
A	na vrchu	10	9,975	0,050	- 0,050	- 0,025
	uprostred	10	9,986	0,050	- 0,050	- 0,014
	dole	10	9,988	0,050	- 0,050	- 0,012
B	na vrchu	10	9,978	0,050	- 0,050	- 0,022
	uprostred	10	9,987	0,050	- 0,050	- 0,013
	dole	10	9,984	0,050	- 0,050	- 0,016
C	na vrchu	10	9,983	0,050	- 0,050	- 0,017
	uprostred	10	9,991	0,050	- 0,050	- 0,009
	dole	10	9,988	0,050	- 0,050	- 0,012
D	na vrchu	10	9,978	0,050	- 0,050	- 0,022
	uprostred	10	9,988	0,050	- 0,050	- 0,012
	dole	10	9,987	0,050	- 0,050	- 0,013

Tab.4.2 Hodnotenie vzorky číslo 2

Meraná hrana	Poloha merania:	MR[mm]	ZR[mm]	HMO[mm]	DMO[mm]	o_n [mm]
A	na vrchu	10	9,976	0,050	- 0,050	- 0,024
	uprostred	10	9,985	0,050	- 0,050	- 0,015
	dole	10	9,984	0,050	- 0,050	- 0,016
B	na vrchu	10	9,980	0,050	- 0,050	- 0,020
	uprostred	10	9,986	0,050	- 0,050	- 0,014
	dole	10	9,983	0,050	- 0,050	- 0,017
C	na vrchu	10	9,980	0,050	- 0,050	- 0,020
	uprostred	10	9,988	0,050	- 0,050	- 0,012
	dole	10	9,987	0,050	- 0,050	- 0,013
D	na vrchu	10	9,979	0,050	- 0,050	- 0,021
	uprostred	10	9,985	0,050	- 0,050	- 0,015
	dole	10	9,984	0,050	- 0,050	- 0,016

Tab.4.3 Hodnotenie vzorky číslo 3

Meraná hrana	Poloha merania:	MR[mm]	ZR[mm]	HMO[mm]	DMO[mm]	o_n [mm]
A	na vrchu	10	9,982	0,050	- 0,050	- 0,018
	uprostred	10	9,988	0,050	- 0,050	- 0,012
	dole	10	9,986	0,050	- 0,050	- 0,014
B	na vrchu	10	9,985	0,050	- 0,050	- 0,015
	uprostred	10	9,989	0,050	- 0,050	- 0,011
	dole	10	9,983	0,050	- 0,050	- 0,017
C	na vrchu	10	9,982	0,050	- 0,050	- 0,018
	uprostred	10	9,990	0,050	- 0,050	- 0,010
	dole	10	9,984	0,050	- 0,050	- 0,016
D	na vrchu	10	9,984	0,050	- 0,050	- 0,016
	uprostred	10	9,994	0,050	- 0,050	- 0,006
	dole	10	9,989	0,050	- 0,050	- 0,011

Tab.4.4 Hodnotenie vzorky číslo 4

4.3 Vyhodnotenie experimentálnych vzoriek pomocou metódy T_{km}

Hodnoty presnosti T_{km} podľa firmy AGIE sú maximálne hodnoty tolerancie obrysov. Je to sada hrubých meraní mikrometrom v istých predurčených bodoch v niekoľkých rôznych rovinách, zvyčajne na hornej a dolnej časti obrábanej súčiastky a v jej strede. Celkovo sa získava minimálne 12 meraní v dvoch rovinách. Na základe týchto meraní je možné určiť chybu tvaru od požadovaného v technickej dokumentácii. Táto hodnota spravidla zodpovedá najväčšej nameranej odchýlke a preto je jedným z kľúčových parametrov pri hodnotení elektroiskrového drôtového rezania. Jej nevýhodou je, že neberie do úvahy prípadné chyby v spojovacom polomere a ani nesprávne sklony tvarových prvkov. Preto sa táto metóda hodnotenia používa pri súčiastiach, ktoré nemajú stanovené tolerancie zaoblovacích polomerov alebo u tých, kde sú zaoblovacie polomery väčšie ako priemer použitého drôtu. Meranie T_{km} by sa malo vykonávať vidlicovým mikrometrom s priemerom 5 milimetrov. Výpočet parametrov T_{km} je uvedený vzt'ahom (4.2). [20]

$$T_{km} = \frac{T_{km \max} - T_{km \min}}{2}$$

(4.2)

kde: $T_{km \max}$ [μm] - odchýlka max. nameraného rozmeru vzhľadom k MR,
 $T_{km \min}$ [μm] - odchýlka min. nameraného rozmeru vzhľadom k MR.

Vzorka číslo	Poloha merania	A [μm]	B [μm]	C [μm]	D [μm]
1.	na vrchu	- 32	- 24	- 34	- 37
	uprostred	- 18	- 15	- 18	- 20
	dole	- 16	- 16	- 18	- 17
2.	na vrchu	- 25	- 22	- 17	- 22
	uprostred	- 14	- 13	- 9	- 12
	dole	- 12	- 16	- 12	- 13
3.	na vrchu	- 24	- 20	- 20	- 21
	uprostred	- 15	- 14	- 12	- 15
	dole	- 16	- 17	- 13	- 16
4.	na vrchu	- 18	- 15	- 18	- 16
	uprostred	- 12	- 11	- 10	- 6
	dole	- 14	- 17	- 16	- 11

Tab.4.5 Tabuľka pre výpočet hodnôt T_{km}

Vzorka číslo	Max. hodnota [μm]	Min. hodnota [μm]	Hodnota T_{km} [μm]
1.	- 15	- 37	- 26
2.	- 9	- 25	- 17
3.	-12	- 24	- 18
4.	- 6	- 18	- 12

Tab.4.1 Tabuľka výsledných hodnôt T_{km}

4.4 Štatistická interpretácia pri vyhodnotení experimentu

Pri štatistickom vyhodnotení technológie elektroiskrového drôtového rezania sa vychádza z predpokladu, že merané veličiny (v našom prípade rozmerové odchýlky a parametre drsnosti povrchu R_a a R_z) majú spojitý náhodný charakter a riadia sa normálovým rozdelením technologických veličín. V bežnej praxi sa stretávame s týmto rozdelením najčastejšie a má veľmi široké uplatnenie v najrôznejších oblastiach, kde je potreba spracovávať štatistické súbory dát. [26]

Pri štatistických výpočtoch na určenie príslušných veličín vychádzame zo štyroch matematických predpokladov:

- poznáme technologické veličiny x_1, x_2, \dots, x_n , ktoré boli získané pri obrábaní n skúšobných obrobkov alebo v našom prípade plôch, ďalej je vykonaný náhodný výber z normálne rozdelenia daného štatistického súboru,

- charakteristikami normálneho rozdelenia súboru sú stredná hodnota \bar{x} a smerodatná odchýlka s ,
- stredná hodnota a ani smerodatná odchýlka nie sú z prvotne zistených údajov známe, preto je potrebné dopočítať štatistický odhad,
- pre dané technologické veličiny kvalifikujeme nasledovné štatistické hodnoty:
 - a) odhady parametrov normálneho rozdelenia
 - b) konfidenčný interval strednej hodnoty
 - c) štatistický tolerančný interval.

a) Odhady parametrov normálneho rozdelenia

- odhad strednej hodnoty podľa vzťahu (4.3),

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum x_i \quad (4.3)$$

kde: \bar{x} [-] - stredná hodnota,
 x_i [-] - jednotlivé namerané hodnoty,
 n [-] - počet hodnotených prvkov.

- odhad smerodatnej odchýlky podľa vzťahu (4.4). [26]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.4)$$

kde: s [-] - smerodatná odchýlka,

b) Konfidenčný interval strednej hodnoty

- medze pre jednostranný konfidenčný interval strednej hodnoty podľa vzťahu (4.5). [26]

$$m_{D1} = \bar{x} - t_{1-\alpha, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} ; m_{H1} = \bar{x} + t_{1-\alpha, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.5)$$

kde: m_{D1} [-] - dolná medza pre jednostranne konfidenčný interval,
 m_{H1} [-] - horná medza pre jednostranne konfidenčný interval,
 $t_{1-\alpha, n-1}$ [-] - kvantil Studentovho rozdelenia.

c) *Štatistický tolerančný interval*

- jednostranný štatistický tolerančný interval podľa vzťahu (4.6). [26]

$$L_{s1} = \bar{x} - k_1 \cdot s ; L_{s1} = \bar{x} + k_1 \cdot s \quad (4.6)$$

kde: L_{s1} [-] - medza pre jednostranný interval,
 k_1 [-] - súčiniteľ pre stanovenie jednostranného intervalu,

4.5 Štatistické spracovanie nameraných hodnôt rozmerov

Pri štatistickom spracovaní nameraných hodnôt odchýlok rozmerov sa vychádza z dvoch nasledujúcich predpokladov:

- Vzhľadom na hodnoty nameraných odchýlok rozmerov na všetkých štyroch súčiastkach sa konfidenčný interval stanoví ako jednostranný pre konfidenčnú úroveň $(1-\alpha) = 0,95$,
- Štatistický tolerančný interval sa stanoví obdobne ako jednostranný pre konfidenčnú úroveň $(1-\alpha) = 0,95$ a podiel súboru hodnôt $p = 0,95$.

Pri iných prípadoch je možné použiť obojstranný konfidenčný interval, avšak vzhľadom na zistené hodnoty úchyliet, ktoré vychádzajú všetky záporne je jeho použitie nadbytočné. Pomocou výpočtu teda stanovíme iba dolnú medzu intervalu. Aby bol celý výpočet prehľadnejší boli všetky hodnoty prevedené z milimetrov na mikrometre. Hodnoty štatistického súboru boli nadobudnuté z tabuliek 4.1 až 4.4.

a) *Odhady parametrov normálového rozdelenia:*

- odhad strednej hodnoty vyplývajúci zo vzťahu (4.7),

$$\begin{aligned} \bar{o}_n &= \frac{1}{n} \cdot \sum o_n = \frac{1}{48} \cdot (o_{n1} + \dots + o_{n48}) = \frac{1}{48} \cdot (-32 - 18 - \dots - 11) \\ &= \frac{1}{48} \cdot (-819) = -17,0625 \mu m \end{aligned} \quad (4.7)$$

kde: \bar{o}_n [μm] - stredná hodnota odchýlky,
 o_{ni} [μm] - odchýlky jednotlivých rozmerov.

- odhad smerodatnej odchýlky vyplývajúci zo vzťahu (4.8).

$$s_{o_n} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (o_{ni} - \bar{o}_n)^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{48-1} \cdot \sum (32 - 17,0625)^2 + \dots + (11 - 17,0625)^2} = 6,0191 \mu\text{m} \quad (4.8)$$

kde: s_{o_n} [μm] - smerodatná odchýlka,

b) *Konfidenčný interval strednej hodnoty:*

Pri výpočte je potrebné poznať hodnotu $(1-\alpha)$ kvantilov Studentovho t rozdelenia pre $v = n - 1$ stupňov voľnosti. Z toho vyplýva nasledujúci postup:

$$\alpha = 0,05 \Rightarrow 1 - \alpha = 0,95$$

$$v = n - 1 \Rightarrow v = 48 - 1 = 47$$

Následne pomocou interpolácie najbližších hodnôt zo štatistických tabuliek pre Studentovo rozdelenie určíme hodnotu t (príloha číslo 3):

$$t_{1-\alpha, n-1} = t_{0,995, 47} = 1,6772$$

- jednostranne konfidenčný interval strednej hodnoty vyplývajúci zo vzťahu (4.9).

$$m_{D1} = \bar{o}_n - t_{1-\alpha, n-1} \cdot \frac{s_{o_n}}{\sqrt{n}} = -17,0625 - 1,6772 \cdot \frac{6,0191}{\sqrt{48}} = -18,51962 \mu\text{m} \quad (4.9)$$

kde: m_{D1} [μm] - jednostranne konfidenčný interval,

n [-] - počet nameraných hodnôt.

c) *Štatistický tolerančný interval:*

Pri výpočte jednostranného štatistického tolerančného intervalu je potrebné poznať koeficient k_1 . Keďže štatistické tabuľky obsahujú len koeficienty k_1 pre maximálne tridsaťprvkovú množinu údajov bolo potrebné hodnotu pre $n = 48$ dopočítať. Na tento výpočet som použil dostupné údaje z tabuliek (príloha číslo 4), ktoré som v programe Microsoft Excel preložil polynómom šiesteho stupňa. Po získaní potrebnej rovnice som dosadil hodnotu $n = 48$ a získal potrebný koeficient. Postup bol nasledovný:

$$n = 48$$

$$p = 0,95$$

$$(1 - \alpha) = 0,95$$

$$k_1 = 2,045$$

- jednostranný štatistický tolerančný interval vyplývajúci zo vzťahu (4.10).

$$L_{s1} = \bar{o}_n + k_1 \cdot s_{o_n} = -17,0625 - 2,045 \cdot 6,0191 = -29,40166 \mu\text{m} \quad (4.10)$$

- kde: L_{s1} [μm] - jednostranný statistický tolerančný interval,
 s_{o_n} [μm] - smerodatná odchýlka,
 \bar{o}_n [μm] - stredná hodnota odchýlky,
 k_1 [-] - koeficient.

Zaujímavými údajmi z pohľadu technológie elektroerozívneho drôtového rezania sú aj štatistické hodnoty T_{km} . Keďže z ekonomického hľadiska a z dôvodu vyťaženia výroby, kde boli experimentálne vzorky rezané by získanie ďalších nebolo možné je pre vyhodnotenie rozmerových tolerancií podľa T_{km} použitý aritmetický priemer podľa vzťahu (4.11).

$$\begin{aligned}\overline{T_{km}} &= \frac{1}{n} \cdot \sum T_{km} = \frac{1}{4} \cdot (T_{km1} + \dots + T_{km4}) = \frac{1}{4} \cdot (-26 - 17 - 18 - 12) \\ &= \frac{1}{4} \cdot (-73) = -18,25\mu\text{m}\end{aligned}\quad (4.11)$$

- kde: $\overline{T_{km}}$ [μm] - aritmetický priemer T_{km} ,
 T_{kmi} [μm] - jednotlivé hodnoty T_{km} .

Z vypočítaných hodnôt vyplýva, že namerané hodnôty rozmerových odchýlok a s nimi súvisiace parametre T_{km} nedosahujú úroveň uvádzanú v príslušnej technológii. Podľa materiálov spoločnosti AGIE by pri tomto reze mala byť dosahovaná hodnota T_{km} približne $\pm 3\mu\text{m}$. Pre štyri experimentálne vzorky táto hodnota dosahuje približne štvornásobok uvádzaný výrobcom stroja. Príčiny takýchto výrazných odchýlok oproti predpokladu sú podrobnejšie rozobrané v kapitole Diskusia.

5 ŠTATISTICKÉ VYHODNOTENIE KVALITY POVRCHU

5.1 Parametre štruktúry Ra a Rz

Štruktúra povrchu predstavuje opakované alebo náhodné odchýlky od geometricky presného povrchu, ktoré vznikajú vplyvom rezného procesu. Pri elektroiskrovom drôtovom rezaní majú na výslednú kvalitu povrchu najväčší vplyv parametre jednotlivých elektrických výbojov, ako bolo spomenuté v kapitole 2.4. Pôsobením elektroerozívneho procesu na obrábaný materiál vzniká trojrozmerná topografia, ktorú je možné vyhodnotiť viacerými charakteristikami. V každodennej praxi strojárskkej výroby sa najčastejšie využíva technicky známy parameter drsnosti Ra. Keďže je priamo naviazaný na parameter Rz v tejto kapitole budú pre vyhodnotenie experimentálnych vzoriek uvádzané oba. [27]

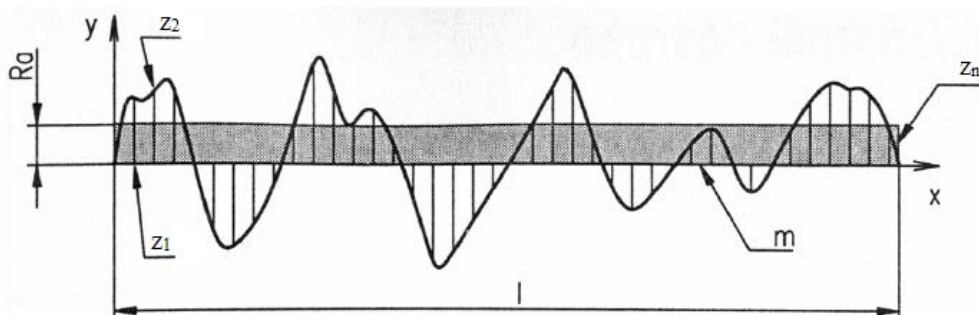
Parameter štruktúry povrchu Ra je stredná aritmetická odchýlka profilu (obr 5.1) a charakterizuje nerovnosti povrchu ako priemer absolútnych hodnôt súradníc $Z(x)$ v rozsahu základnej meranej dĺžky l_r podľa vzťahu (5.1). Keďže výsledná hodnota sa získava spriemerovaním nameraných hodnôt podľa vzťahu (5.2), ide o veličinu štatistickú. Integrálne získanú hodnotu Ra zobrazujú elektrické dotykové profilomery. [27]

$$Ra = \frac{1}{l_r} \cdot \int |Z(x)| dx \quad (5.1)$$

kde: Ra [μm] - stredná aritmetická odchýlka profilu,
 l_r [μm] - základná dĺžka.

$$Ra = \frac{1}{n} \cdot \sum |z_i| = \frac{|z_1| + |z_2| + |z_3| + \dots + |z_n|}{n} \quad (5.2)$$

kde: n [-] - počet nameraných hodnôt,
 z_i [μm] - odchýlky jednotlivých rozmerov.



Obr. 5.1 Stredná aritmetická odchýlka profilu Ra

Parameter štruktúry povrchu Rz je stredná hodnota výšok piatich najvyšších výstupkov obrábaného povrchu a piatich najnižších prehĺbení profilu v rozsahu základnej meranej dĺžky. Obdobne ako parameter Ra sa udáva v μm a určuje sa podľa vzťahu (5.3). [27]

$$Rz = \frac{\sum |z_{pmi}| + \sum |z_{vmi}|}{5}$$

(5.3)

- kde: Rz [μm] - stredná hodnota najväčších rozdielov profilu,
 z_{pmi} [μm] - výška jednotlivých najvyšších výstupkov,
 z_{vmi} [μm] - hĺbka jednotlivých najhlbších priehlbín.

5.2 Výsledná kvalita povrchu

K meraniu štruktúry povrchu bol použitý moderný, prenosný, kompaktný profilomer Taylor Hobson udávajúci parametre R_a a R_z v μm . Štruktúra povrchu bola meraná na každej viacnásobne obrábanej ploche všetkých štyroch experimentálnych vzoriek približne v jej strede, kolmo k smeru odvíjania drôtovej elektródy v dĺžke 4,1 milimetra.

Tabuľka hodnôt drsnosti R_a a R_z (tab 5.1) bola zostavená z protokolov o meraní drsnosti, z ktorých jeden je uvedený v prílohe číslo 5.

Vzorka číslo	Meraná hrana číslo	Hodnota R_a [μm]	Hodnota R_z [μm]
1.	1.	0,6669	4,1559
	2.	0,5836	3,7219
	3.	0,6515	4,1056
2.	1.	0,6263	3,9641
	2.	0,6709	4,1750
	3.	0,6586	4,1577
3.	1.	0,7059	4,3785
	2.	0,5961	3,7788
	3.	0,6025	4,2513
4.	1.	0,6210	3,9267
	2.	0,6370	4,0303
	3.	0,6256	3,5758

Tab 5.1 Namerané parametre R_a a R_z experimentálnych vzoriek

5.3 Štatistické spracovanie nameraných hodnôt R_a a R_z

Pri vyhodnocovaní nameraných hodnôt štruktúry povrchu postupujeme obdobne ako pri výpočte štatistických údajov pre rozmerové tolerancie. Preto opäť vychádzame z dvoch nasledujúcich predpokladov:

- Vzhľadom na hodnoty nameraných hodnôt R_a a R_z na všetkých štyroch súčiastkach sa konfidenčný interval stanoví ako jednostranný pre konfidenčnú úroveň $(1-\alpha) = 0,95$,
- Štatistický tolerančný interval sa stanoví obdobne ako jednostranný pre konfidenčnú úroveň $(1-\alpha) = 0,95$ a podiel súboru hodnôt $p = 0,95$.

Obe hodnoty parametrov štruktúry povrchu nemôžu nadobudnúť zápornú hodnotu, preto sa opäť stanovujú jednostranné intervaly, avšak s malým rozdielom, že namiesto dolnej

medze intervalu sa nasledujúcimi výpočtami určuje horná medza intervalu. Hodnoty štatistického súboru predstavujúce hodnoty Ra a Rz boli nadobudnuté z tabuľky 5.1.

a) *Odhady parametrov normálneho rozdelenia:*

- odhad strednej hodnoty vyplývajúci zo vzťahov (5.4) a (5.5),

$$\begin{aligned}\bar{Ra} &= \frac{1}{n} \cdot \sum Ra_i = \frac{1}{12} (Ra_1 + \dots + Ra_{12}) = \frac{1}{12} (0,6669 + 0,5836 + \dots + 0,6256) \\ &= \frac{1}{12} \cdot 7,6459 = 0,6372 \mu m\end{aligned}\tag{5.4}$$

kde: \bar{Ra} [μm] - stredná hodnota odchýlky Ra,
 Ra_i [μm] - odchýlky jednotlivých meraní Ra.

$$\begin{aligned}\bar{Rz} &= \frac{1}{n} \cdot \sum Rz_i = \frac{1}{12} (Rz_1 + \dots + Rz_{12}) = \frac{1}{12} (4,1559 + 3,7219 + \dots + 3,5758) = \\ &= \frac{1}{12} \cdot 48,2216 = 4,0185 \mu m\end{aligned}\tag{5.5}$$

kde: \bar{Rz} [μm] - stredná hodnota odchýlky Rz,
 Rz_i [μm] - odchýlky jednotlivých meraní Rz.

- odhad smerodatnej odchýlky vyplývajúci zo vzťahov (5.6) a (5.7).

$$\begin{aligned}s_{Ra} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (Ra_i - \bar{Ra})^2} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{48-1} \cdot \sum (0,6669 - 0,63716)^2 + \dots + (0,6256 - 0,63716)^2} = 0,0353 \mu m\end{aligned}\tag{5.6}$$

kde: s_{Ra} [μm] - smerodatná odchýlka pre Ra,

$$\begin{aligned}s_{Rz} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (Rz_i - \bar{Rz})^2} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{48-1} \cdot \sum (4,1559 - 4,01847)^2 + \dots + (3,5758 - 4,01847)^2} = 0,2350 \mu m\end{aligned}\tag{5.7}$$

kde: s_{Rz} [μm] - smerodatná odchýlka pre Rz.

b) *Konfidenčný interval strednej hodnoty:*

Pri výpočte je potrebné poznať hodnotu $(1-\alpha)$ kvantilov Studentovho t rozdelenia pre $v = n - 1$ stupňov voľnosti. Z toho vyplýva nasledujúci postup:

$$\alpha = 0,05 \Rightarrow 1 - \alpha = 0,95$$

$$v = n - 1 \Rightarrow v = 12 - 1 = 11$$

Následne je možné priamo zo štatistických tabuliek pre Studentovo rozdelenie vybrať hodnotu t (príloha číslo 3):

$$t_{1-\alpha, n-1} = t_{0,995,11} = 1,796$$

- jednostranne konfidenčný interval strednej hodnoty vyplývajúci zo vzťahov (5.8) a (5.9).

$$m_{H1} = \bar{Ra} + t_{1-\alpha, n-1} \cdot \frac{s_{Ra}}{\sqrt{n}} = 0,63716 + 1,796 \cdot \frac{0,035268}{\sqrt{12}} = 0,6554 \mu m \quad (5.8)$$

kde: m_{H1} [μm] - jednostranne konfidenčný interval,
 n [-] - počet nameraných hodnôt.

$$m_{H1} = \bar{Rz} + t_{1-\alpha, n-1} \cdot \frac{s_{Rz}}{\sqrt{n}} = 4,01847 + 1,796 \cdot \frac{0,234921}{\sqrt{12}} = 4,1402 \mu m \quad (5.9)$$

c) *Štatistický tolerančný interval:*

Pri výpočte jednostranného štatistického tolerančného intervalu je potrebné poznať koeficient k_1 . Nakoľko štatistické tabuľky obsahujú len koeficienty k_1 pre maximálne tridsaťprvkovú množinu údajov bolo potrebné hodnotu pre $n = 48$ dopočítať. Na tento výpočet som použil dostupné údaje z tabuliek (príloha číslo 4), ktoré som v programe Microsoft Excel preložil polynómom šiesteho stupňa. Po získaní potrebnej rovnice som dosadil hodnotu $n = 48$ a získal potrebný koeficient. Postup bol nasledovný:

$$n = 12$$

$$p = 0,95$$

$$(1 - \alpha) = 0,95$$

$$k_1 = 2,74$$

- jednostranný štatistický tolerančný interval vyplývajúci zo vzťahov (5.10) a (5.11).

$$L_{s1} = \bar{Ra} + k_1 \cdot s_{Ra} = 0,63716 + 2,74 \cdot 0,035268 = 0,733794 \mu m \quad (5.10)$$

kde: L_{s1} [μm] - jednostranný štatistický tolerančný interval,
 s_{Ra} [μm] - smerodatná odchýlka,
 \bar{Ra} [μm] - stredná hodnota odchýlky,
 k_1 [-] - koeficient.

$$L_{s1} = \overline{Rz} + k_1 \cdot s_{Rz} = 4,01847 + 2,74 \cdot 0,234921 = 4,662154\mu m \quad (5.11)$$

Parametre štruktúry povrchu podľa dosiahnutých hodnôt nedosahujú úroveň uvádzanú v príslušnej technológii. Podľa materiálov spoločnosti AGIE by pri tomto reze mala byť dosahovaná drsnosť povrchu Ra približne $0,35\mu m$. Pre štyri experimentálne vzorky táto hodnota dosahuje takmer dvojnásobok. Príčiny takýchto výrazných odchýlok oproti predpokladu sú podrobnejšie rozobrané v nasledujúcej kapitole Diskusia.

DISKUSIA

Ako bolo v kapitole 4.5 a 5.3 uvedené experimentálne vzorky nespĺňajú predpoklady pre stanovenú technológiu použitého rezného cyklus. Výrazné odchýlky od udávaných hodnôt budú s najväčšou pravdepodobnosťou výsledkom súčtu chýb, ktoré nastali počas ich výroby a samotnej prípravy experimentu. V technológii od výrobcu elektroiskrovej rezačky, spoločnosti AGIE je uvedené, že pri rezaní nástrojovej ocele o výške 50 milimetrov pomocou drôtovej elektródy Cobra cut A s priemerom 0,25 milimetra by hodnoty T_{km} vyrobenej súčiastky mali dosahovať $\pm 3 \mu\text{m}$ a drsnosť povrchu R_a by mala byť $0,35 \mu\text{m}$. Zo štatistických výpočtov k daným veličinám vyplýva, že na experimentálnych vzorkách bola dosiahnutá hodnota odchýlok rozmeru stanovená pomocou $T_{km} - 18,25 \mu\text{m}$, pričom stredná hodnota rozmerových odchýlok je $- 17,0625 \mu\text{m}$ a hodnota drsnosti povrchu R_a dosiahla $0,6372 \mu\text{m}$, pričom hodnota R_z je $4,1402 \mu\text{m}$.

Dôvody spôsobených nepresností by sa dali zhrnúť do niekoľkých bodov:

- zvyčajné využitie stroja – v podmienkach spoločnosti VN – Ú, s.r.o. sa elektroiskrová rezačka AGIECUT 200 využíva na výrobu razníkov a komponentov pre strižné a lisovacie nástroje, avšak s toleranciami rádovo v desiatkach mikrometrov, zvyčajne za účelom zrýchlenia výroby a zníženia finančných nákladov sa tieto súčiastky vyrábajú iba hrubovacím rezom, bez potreby rezov dokončovacích,
- nevykonanie testovacieho rezu – z dôvodu časovej vyťaženia stroja a obmedzených možností pri vyrezávaní experimentálnych vzoriek nebolo možné uskutočniť testovací rez na zistenie odchýlok, vďaka ktorému by sa dali určiť ich presné hodnoty a skorigovať ich, aby nemali vplyv pri nasledujúcom obrábaní vzoriek,
- nedostatočná údržba – vzhľadom na požiadavky výroby nie je majiteľom alebo objednávatelmi vyrábaných súčiastok požadovaná stanovená pravidelná údržba elektroiskrového stroja, ktorá by zabezpečovala celkové zvýšenie kvality produkcie,
- použitie iného drôtu – na vyrezanie experimentálnych vzoriek nebola použitá nástrojová elektróda Cobra cut A stanovená technológiou, ale menej kvalitná a dostupnejšia Berco Cut s rovnakým priemerom, 0,25 milimetra,
- nepostačujúca teplotná stabilizácia – na dosiahnutie technológiou udávaných parametrov je potrebná teplotná stabilizácia stroja, ktorú zabezpečuje cirkulácia dielektrika; teplota dielektrika je v priamej návaznosti na teplotu okolia, čiže v miestnosti, kde je stroj umiestnený; na dostatočnú teplotnú stabilizáciu stroja je potrebné, aby bol umiestnený v klimatizovaných priestoroch; túto podmienku elektroiskrová rezačka, na ktorej boli obrábané experimentálne vzorky nespĺňala.

ZÁVER

Bakalárska práca sa zaoberá technológiou elektroiskrového drôtového rezania. V úvodnej časti sa zameriava na opis historického vývoja a technologickú charakteristiku princípu elektroerózie. V jednotlivých kapitolách je rozoberaný princíp WEDM obrábania s dôrazom na faktory a podmienky ovplyvňujúce rezný proces. V nasledujúcej časti je rozbor experimentálnych vzoriek, zameraný na zistenie rozmerových tolerancií a kvality štruktúry povrchu s ich štatistickým spracovaním. Účelom tejto časti bolo zistenie technologicky dôležitých parametrov po viacnásobnom opracovaní nástrojovej ocele pomocou technológie elektroiskrového drôtového rezania.

V rámci spracovania bakalárskej práce nebolo možné z časových a ekonomických dôvodov vykonať rozsiahlejšie experimentálne merania, zo získaných údajov je možné vyvodit', že elektroiskrové drôtové rezanie sa radí medzi veľmi presné metódy obrábania a jeho prínos v bežnej praxi je nenahraditeľný. Táto vysoko progresívna technológia dosahuje vynikajúce výsledky rozmerových presností a taktiež akosti opracovaného povrchu oproti iným metódam. Tiež umožňuje širokú aplikáciu vo výrobných procesoch, najmä v prípadoch, kedy je opracovávaný materiál veľmi tvrdý a konvenčnými metódami len veľmi nákladne opracovateľný, čo zaisťuje jej stále väčšie využitie v strojárskom priemysle.

Dlhodobým trendom strojárskej výroby je ekonomické hľadisko celého výrobného procesu. Vďaka stále sa zlepšujúcim materiálom drôtových elektród, novým generátorom a iným technologickým vylepšeniam popredných svetových výrobcov elektroiskrových drôtových rezačiek sa darí tento cieľ splňať. Jednoznačným ukazovateľom je stále sa zvyšujúci celkový objem súčiastok vyrobených touto metódou.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technologie*. 1.vyd. Košice: Viena 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
2. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Tiskové středisko ZČU, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
4. *Wikipedia.cz*. [online]. 2013 [cit. 2013-04-25]. Obrábanie vodným prúdom. Dostupné na WWW: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Obr%C3%A1banie_vodn%C3%BDm_pr%C3%BAd_om>.
5. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1989. 122 s.
6. ELMAN, Jameson. *Electrical discharge machining* [online]. Dearborn, USA: Society of Manufacturing Engineers, 2001 [cit. 2013-04-25]. Dostupné na WWW: <<http://lab.fs.uni-lj.si/lat/uploads/ebooks/edmBook.pdf>>.
7. *GF AgieCharmilles* [online]. 2009 [cit. 2013-04-25]. Dostupné na WWW: <<http://www.gfac.com/gfac/company/history.html>>
8. ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3 – 2. díl .Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. 1. vyd. Praha: Scientia 2001. 221 s. ISBN 80-7183-227-8.
9. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění – 3. část* [online]. Interaktivní studijní text pre bakalársky a magisterský studijný program. VUT v Brne, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 57 s. Dostupné na WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/Dokoncovaci_a_nekonvencni_medy_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf>.
10. *EDM teorie – CZ*. Prezentácia. GF AGIECHARMILLES. Brno. 2009.
11. *When to EDM*. [online]. 2008. [cit. 2013-04-30]. Dostupné na WWW <http://www.charmillesus.com/products/edm/When_to_EDM_JULY08.pdf>
12. *Wikipedia.cz*. [online]. 2013 [cit. 2013-04-25]. Demineralizovaná voda. Dostupné na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Deionizovan%C3%A1_voda>.
13. *Elektroerozivní drátové obrábění*. CHARMILLES. 2005. Referenčný manuál 205 971 030/de/06.2005, ver. C.
14. *AGIE training center: AGIECUT 100D, 200D, 300D*. Switzerland: AG für industrielle Elektronik. Losone, 506 s.

15. *Mechanical Design Forum*. [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. WEDM process. Dostupné na WWW: <[http://www.mechanicaldesignforum.com/content.php?16-Electro-discharge-wire-cutting-\(EDWC\)](http://www.mechanicaldesignforum.com/content.php?16-Electro-discharge-wire-cutting-(EDWC))>.
16. A Reference to Understanding, Selecting and Using Wire on Wire-cut EDM Machines. 1995. [online]. [cit. 2013-05-02]. Dostupné na WWW: <<http://us.gfac.com/intech/shop/documents/wirebook.pdf>>.
17. EDM TODAY MAGAZINE. *EDM Wire* [online]. 2009 [cit. 2013-05-09]. Dostupné na WWW: <http://www.edmtodaymagazine.com/AAweb2_2010/TechTips2010/TechTips2009/TechTipsJlyAug09.pdf>.
18. *CUT 2000/3000. User manual*. GF AgieCharmilles – AGIE. Losone 2011.
19. *AC Progress 2/3 Focus/ AC Progress VP 2/3/4 – User manual*. GF AgieCharmilles – AGIE. Losone 2011.
20. *Agiecut Agievision 5. Návod k obsluze zařízení – C5 technologie*. GF AgieCharmilles – AGIE. Losone 2006.
21. W-Technology. [online]. 2011 [cit. 2013-05-02]. Dostupné na WWW: <http://www.w-technology.cz/PDF/wedm_cz.pdf>.
22. Benefits of Wire EDM. *Reliable EDM* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné na WWW: <<http://www.reliableedm.com/Benefits-of-Wire-EDM%20.html>>.
23. Wire EDM: Features & Benefits. *Precision Micro* [online]. ©2012 [cit. 2013-05-14]. Dostupné na WWW: <<http://www.precisionmicro.com/74/features-&-benefits/processes/wire-edm>>.
24. *AGIECUT 120..370. Sicherheit, Austellen, technische Daten*. AGIE. Losone 1987.
25. *Nástrojové oceli – katalog*. Böhler UDDEHOLM CZ s.r.o., divize Böhler. Praha: 2008
26. PROKOP, Jaroslav. *Statistická interpretace technologických veličin. Vybrané tabelované hodnoty – příloha k přednášce*. VUT v Brně, FSI, Ústav strojírenské technologie.
27. SVOBODA, Pavel, KOVAŘÍK Robert a Jan BRANDEJS. *Základy konstruování*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 186 s. ISBN 80-7204-212-2.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratka	Jednotka	Popis
B	[-]	Bath
CAD	[-]	Computer Aided Design
CAM	[-]	Computer Aided Manufacturing
CM	[-]	Chemical Machining
CNC	[-]	Computer Numerical Control
CVD	[-]	Povlakovanie metódou chemického nanášania z pár
DMO	[mm]	Dolná medzná odchýlka
ECM	[-]	Electro Chemical Machining
EBM	[-]	Elektron Beam Machining
EDM	[-]	Electro Discharge Machining
HC	[-]	High Control
HMO	[mm]	Horná medzná odchýlka
HRC	[-]	Hodnota tvrdosti podľa Rocwella
IT	[-]	Stupeň presnosti
LBM	[-]	Laser Beam Machining
M	[-]	Modul generátora
MR	[mm]	Menovitý rozmer
NC	[-]	Numerical Control
PBM	[-]	Plasma Beam Machining
PVD	[-]	Povlakovanie metódou fyzikálneho nanášania z pár
Q	[-]	Quantity
RC	[-]	Obvod s odporom a kondenzátorom
RLC	[-]	Obvod s odporom, cievkou a kondenzátorom
SiC	[-]	Karbid kremíka
Si₃N₄	[-]	Nitrid kremíka – neoxidická keramika
TFT	[-]	Thin Film Tranzistor
TiN	[-]	Nitrid titánu
USA	[-]	Spojené štáty Americké
USM	[-]	Ultrasonic Machining
WEDM	[-]	Wire Electrical Discharge Machining
WJM	[-]	Water Jet Machining
ZR	[mm]	Zmeraný rozmer
ZSSR	[-]	Sovietsky zväz

Symbol	Jednotka	Popis
A_w	[mm·s ⁻¹]	Rýchlosť odvíjania drôtu
C_w	[-]	Trieda drôtu
F_w	[-]	Napínanie drôtu
H	[mm]	Výška obrábanej súčiastky
I	[A]	Elektrický prúd
I_e	[A]	Stredný vybíjací prúd
L_{s1}	[-]	Jednostranný štatistický interval
K	[-]	Súčiniteľ úmernosti pre katódu a anódu

P	[W]	Výkon pri vybíjaní
P_r	[-]	Výkonnostný krok
Q_i	[mm ³]	Množstvo odobraného materiálu
Q_o	[bar]	Horný výplach
Q_{ou}	[bar]	Horný a dolný výplach
R_a	[μm]	Priemerná aritmetická odchýlka profilu
\overline{Ra}	[μm]	Stredná hodnota priemerných aritmetických odchýlok profilu
R_{a_i}	[μm]	Priemerná aritmetická odchýlka profilu jednotlivých meraní
R_z	[μm]	Najväčšia výška profilu
\overline{Rz}	[μm]	Stredná hodnota najväčších výšok profilu
R_{z_i}	[μm]	Najväčšia výška profilu jednotlivých meraní
T	[s]	Doba periódy
T_{km}	[μm]	Tolerancie podľa AGIE
$\overline{T_{km}}$	[μm]	Stredná hodnota tolerancií podľa AGIE
T_{kmi}	[μm]	Tolerancie podľa AGIE jednotlivých meraní
T_{kmax}	[μm]	Odchýlka maximálneho nameraného rozmeru vzhľadom k MR
T_{kmin}	[μm]	Odchýlka minimálneho nameraného rozmeru vzhľadom k MR
U	[V]	Napätie
U_e	[V]	Stredné vybíjacie napätie
U_k	[V]	Napätie pri zhasnutí výboja
V_N	[mm ³]	Objemový úbytok nástrojovej elektródy
V_O	[mm ³]	Objemový úbytok obrábaného materiálu
W_e	[J]	Energia výboja
k	[-]	súčiniteľ úmernosti pre katódu a anódu
k_1	[-]	Koeficient pre určenie jednostranného štat. tolerančného intervalu
l_r	[μm]	základná dĺžka
m_{D1}	[-]	dolná medza pre jednostranný konfidenčný interval str. hodnoty
m_{H1}	[-]	horná medza pre jednostranný konfidenčný interval str. hodnoty
n	[-]	Počet meraných plôch/obrobkov/ hodnotených prvkov
o_n	[μm]	Odchýlka meraných rozmerov
$\overline{o_n}$	[μm]	Stredná hodnota odchýlok meraných rozmerov
o_{ni}	[μm]	Odchýlka jednotlivých meraných rozmerov
p	[-]	Pravdepodobnosť
q	[-]	Časové využitie periódy
s	[-]	Odhad smerodatnej odchýlky
s_{o_n}	[μm]	Odhad smerodatnej odchýlky pre odchýlku meraných rozmerov
s_{Ra}	[μm]	Odhad smerodatnej odchýlky priem. aritmetickej odchýlka profilu
s_{Rz}	[μm]	Odhad smerodatnej odchýlky najväčšej výška profilu
t	[s/min]	Čas
$t_{1-\alpha;n-1}$	[]	1-α kvantilov Studentovho t rozdelenia pre ν stupňov volnosti
t_d	[s]	Doba oneskorenia výboja
t_e	[s]	Doba výboja
t_i	[s]	Doba impulzu
t_o	[s]	Doba pauzy
v_s	[mm·min ⁻¹]	Stredná rýchlosť posuvu
v_{sm}	[mm·min ⁻¹]	Stredná rýchlosť posuvu pre celé obrábanie

\bar{x}	[-]	Odhad strednej hodnoty
x_i	[-]	Hodnota jednotlivých parametrov
z_i	[μm]	Odchýlka jednotlivých rozmerov s smere osi z
z_{pmi}	[μm]	Výška jednotlivých najvyšších výstupkov
z_{vmi}	[μm]	hĺbka jednotlivých najhlbších priehlbín
θ	[%]	Relatívne opotrebovanie nástrojovej elektródy
δ	[μm]	Celková odchýlka rozmerov a tvarov
δ_D	[μm]	Odchýlka vplyvom dynamických činiteľov
δ_{ESF}	[μm]	Odchýlka vplyvom elektrostatických síl
δ_{PD}	[μm]	Odchýlka vplyvom predpätia drôtu
δ_{PF}	[μm]	Odchýlka vplyvom procesných síl
δ_T	[μm]	Odchýlka vplyvom teplotnej nerovnováhy
ν	[-]	Počet stupňov voľnosti

ZOZNAM PRÍLOH

- Príloha 1 Použitá technológia pre elektroiskrový stroj AGIE CUT 200 pri výrobe experimentálnych vzoriek
- Príloha 2 Štatistické tabuľky – vybrané hodnoty q – kvantilov Studentovho t rozdelenia pre ν stupňov voľnosti
- Príloha 3 Štatistické tabuľky – vybrané hodnoty súčiniteľov k_1 ($n, p, 1 - \alpha$) pre stanovenie jednostranného štatistického intervalu
- Príloha 4 Protokol z merania rozmerových rozmerových tolerancií experimentálnej vzorky
- Príloha 5 Protokol z merania drsnosti povrchu experimentálnej vzorky

PRÍLOHA 1

AGIECUT 100,200

X 210 Cr 12

Cobra cut A ø 0,25

Hs, Ns1, Ns2, Ns3

Feinschnitt
Fine cut
Coupe fin
Taglio fine



$T_{Km} \pm 3\mu m$

T_{Km} erreicht mit ASA
 T_{Km} optened with ASA
 T_{Km} optenu avec ASA
 T_{Km} ottenuto con ASA

$R_a = 0,35\mu m$

Rauheit nach Glasstrahlen (ohne Strahlen 100 % höher)
Roughness after glass bead blasting (without g. b. 100 % higher)
Rugosité après microbillage (sans microbillage 100 % plus élevée)
Rugosità dopo pallinatura (senza pallinatura 100 % più alta)

H (mm)	50				70				100			
	Hs	Ns 1	Ns 2	Ns 3	Hs	Ns 1	Ns 2	Ns 3	Hs	Ns 1	Ns 2	Ns 3
M	5	5	2	2	5	5	2	2	5	5	2	2
t	5	8	26	30	5	8	26	30	5	8	20	30
l	15	4	5	3	15	4	5	3	15	6	5	3
Pr	10	1	1	1	10	1	1	1	10	1	1	1
P (P _{Tab})	26	32	20	20	26	32	25	20	26	32	30	20
td	25	47,5	30	30	25	47,5	30	30	25	40	30	30
HC	6	1	0	0	7	1	0	0	8	1	0	0
Cw	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Fw	18	19	19	19	18	19	19	19	19	19	19	19
Aw	120	120	90	90	120	120	90	120	120	120	120	120
B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Q	4	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1
Qo (bar)	5				5				5			
Qu (bar)												
Qou (bar)	0,2				0,3				0,6			
d (µm)	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄
	198	157	136	131	198	157	136	131	212	162	139	136
P	24,5	25	18	17	27	26	20	20	28	26	28	21
td	17	40	25	29	17	42,5	25	28	17	38	25	25
V _s (mm/min)	1,2	2	1,6	1,8	0,9	1,8	0,9	0,9	0,61	1,5	0,8	0,7
VSM(mm/min)	0,4				0,25				0,2			

PRÍLOHA 2



2. Kvantily t_P Studentova rozdění $S(k)$

$k \backslash P$	0,95	0,975	0,99	0,995	0,999	0,9995
1	6,314	12,706	31,821	63,656	318,289	636,578
2	2,920	4,303	6,965	9,925	22,328	31,600
3	2,353	3,182	4,541	5,841	10,214	12,924
4	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610
5	2,015	2,571	3,365	4,032	5,894	6,869
6	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959
7	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785	5,408
8	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041
9	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781
10	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144	4,587
11	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437
12	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318
13	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221
14	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140
15	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073
16	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686	4,015
17	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646	3,965
18	1,734	2,101	2,552	2,878	3,610	3,922
19	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579	3,883
20	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552	3,850
21	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527	3,819
22	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505	3,792
23	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485	3,768
24	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467	3,745
25	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450	3,725
26	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435	3,707
27	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421	3,689
28	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408	3,674
29	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396	3,660
30	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385	3,646
35	1,690	2,030	2,438	2,724	3,340	3,591
40	1,684	2,021	2,423	2,704	3,307	3,551
45	1,679	2,014	2,412	2,690	3,281	3,520
50	1,676	2,009	2,403	2,678	3,261	3,496
60	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232	3,460
70	1,667	1,994	2,381	2,648	3,211	3,435
80	1,664	1,990	2,374	2,639	3,195	3,416
90	1,662	1,987	2,368	2,632	3,183	3,402
100	1,660	1,984	2,364	2,626	3,174	3,390
120	1,658	1,980	2,358	2,617	3,160	3,373
140	1,656	1,977	2,353	2,611	3,149	3,361
160	1,654	1,975	2,350	2,607	3,142	3,352
180	1,653	1,973	2,347	2,603	3,136	3,345
200	1,653	1,972	2,345	2,601	3,131	3,340
300	1,650	1,968	2,339	2,592	3,118	3,323
500	1,648	1,965	2,334	2,586	3,107	3,310

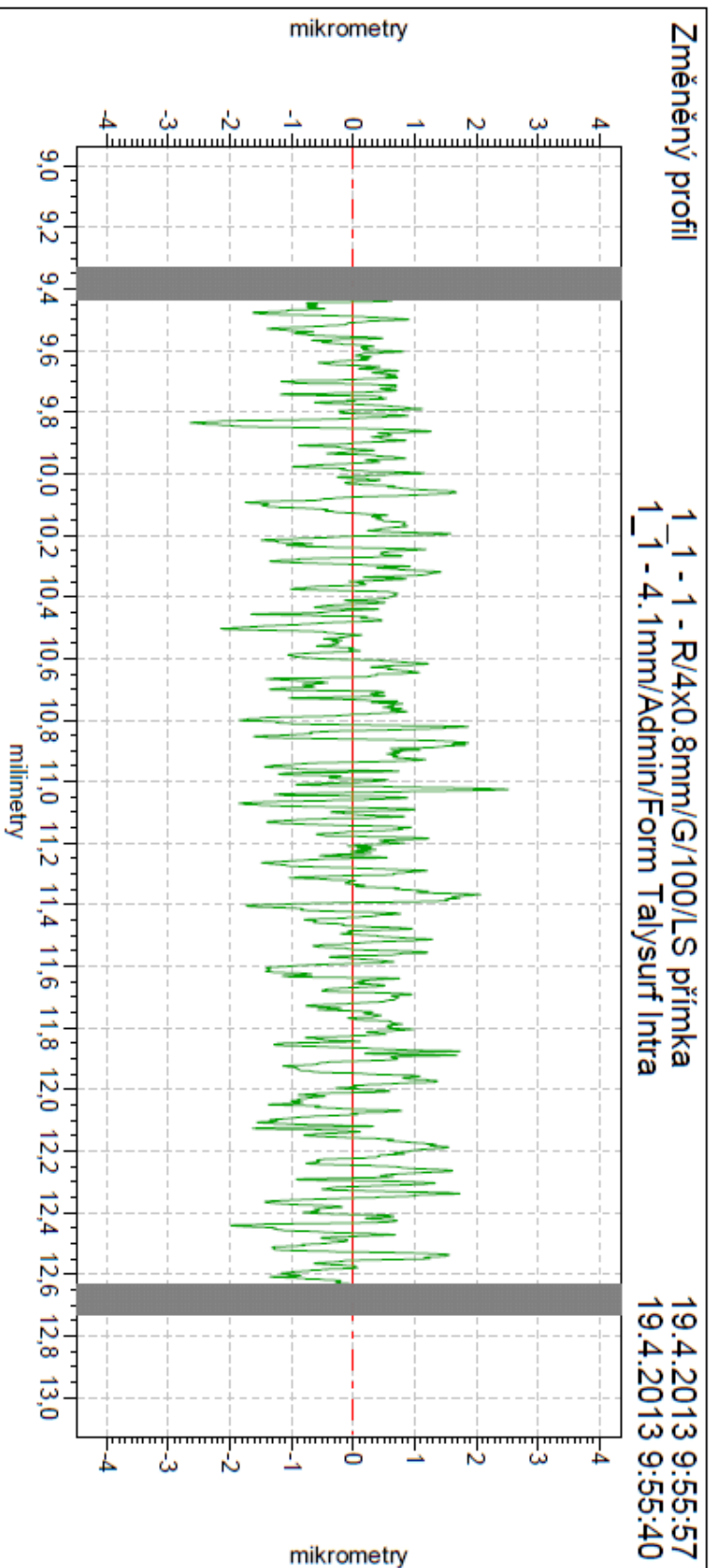
PRÍLOHA 3

n	1- α = 0,95			1- α = 0,99		
	p = 0,90	p = 0,95	p = 0,99	p = 0,90	p = 0,95	p = 0,99
5	3,41	4,21	5,75			
6	3,01	3,71	5,07	4,41	5,41	7,33
7	2,76	3,40	4,64	3,86	4,73	6,41
8	2,58	3,19	4,36	3,50	4,29	5,81
9	2,45	3,03	4,14	3,24	3,97	5,39
10	2,36	2,91	3,98	3,05	3,74	5,08
11	2,28	2,82	3,85	2,90	3,56	4,83
12	2,21	2,74	3,75	2,77	3,41	4,63
13	2,16	2,67	3,66	2,68	3,29	4,47
14	2,11	2,61	3,59	2,59	3,19	4,34
15	2,07	2,57	3,52	2,52	3,10	4,22
16	2,03	2,52	3,46	2,46	3,03	4,12
17	2,00	2,49	3,41	2,41	2,96	4,04
18	1,97	2,45	3,37	2,36	2,91	3,96
19	1,95	2,42	3,33	2,32	2,86	3,89
20	1,93	2,40	3,30	2,28	2,81	3,83
21	1,91	2,37	3,26	2,24	2,77	3,78
22	1,89	2,35	3,23	2,21	2,73	3,73
23	1,87	2,33	3,21	2,18	2,69	3,68
24	1,85	2,31	3,18	2,15	2,66	3,64
25	1,84	2,29	3,16	2,13	2,63	3,60
26	1,82	2,27	3,13	2,11	2,60	3,56
27	1,81	2,26	3,12	2,09	2,58	3,53
28	1,80	2,24	3,09	2,07	2,56	3,50
29	1,79	2,23	3,08	2,05	2,54	3,47
30	1,78	2,22	3,06	2,03	2,52	3,45

PRÍLOHA 4

		Merací protokol ZEISS Calypso				ZF SACHS Slovakia Strojársená 2 917 00 TRNAVA, Slovakia	
Číslo výkresu	-					Stroj Prismo 5,RT	
Název součásti	-						
Poradové číslo	1					Operátor Chmelka	
Zakázka	-	Poznámka:		-		11 April 2013	
Merací program	Tepł. dielca	Zmenový stav		-		12:07:19	
Korekčný hranol_1	20.43 °C	-				Podpis:	
Názov	Symbol	Skut. Hod.	Men. Hod.	H. Tol.	D. Tol.	Odch.	<-- -->
Vzd. A_1_X	Dist	9.968	10.000	0.050	-0.050	-0.032	---
Vzd. A_2_X	Dist	9.982	10.000	0.050	-0.050	-0.018	-
Vzd. A_3_X	Dist	9.984	10.000	0.050	-0.050	-0.016	-
Vzd. B_1_X	Dist	9.976	10.000	0.050	-0.050	-0.024	-
Vzd. B_2_X	Dist	9.985	10.000	0.050	-0.050	-0.015	-
Vzd. B_3_X	Dist	9.984	10.000	0.050	-0.050	-0.016	-
Vzd. C_1_Y	Dist	9.966	10.000	0.050	-0.050	-0.034	---
Vzd. C_2_Y	Dist	9.982	10.000	0.050	-0.050	-0.018	-
Vzd. C_3_Y	Dist	9.982	10.000	0.050	-0.050	-0.018	-
Vzd. D_1_Y	Dist	9.963	10.000	0.050	-0.050	-0.037	---
Vzd. D_2_Y	Dist	9.980	10.000	0.050	-0.050	-0.020	-
Vzd. D_3_Y	Dist	9.983	10.000	0.050	-0.050	-0.017	-

5.12.6.29



Ra	0,6669	µm				
Rp	2,0014	µm	Rv	2,1545	µm	
			Rmr(c)	52,56	% Vyška (stř. hod.)	0,000
			Rz	4,1559	µm	

PRÍLOHA 5