



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ELEKTROEROZIVNÍ DRÁTOVÉ ŘEZÁNÍ TECHNICKÉ KERAMIKY

ELECTROEROSION WIRE CUTTING OF TECHNICAL CERAMICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Mária Habovštiaková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Osička, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Bc. Mária Habovštiaková**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Karel Osička, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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 diplomové práce:

Elektroerozivní drátové řezání technické keramiky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Elektroerozivní obrábění technické keramiky na bázi karbidu křemíku. Tento materiál má špatné tepelné vlastnosti a tendenci k praskání. Úkolem je nalezení správných parametrů pro WEDM .

Cíle diplomové práce:

Základní rozbor technologie WEDM.
Rozbor vlastností materiálu na bázi SiC.
Návrh řezacího drátu pro experiment.
Návrh variant parametrů WEDM obrábění pro materiál na bázi SiC.
Experimentální odzkoušení jednotlivých kombinací parametrů WEDM.
Vyhodnocení experimentu z hlediska kvality povrchu obrobku a spotřeby drátové elektrody.
Výběr optimální varianty nastavení parametrů WEDM a její ekonomické vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

MAŇKOVÁ, I. Progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-4-0-4.

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

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

FOREJT, M. a M. PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

WALKER, J. R. Machining Fundamentals. The Goodheart-Wilcox Company, Inc., Tinlez Park, Illinois, 7th ed., 2004. pp. 640. ISBN 1-59070-249.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Predkladaná diplomová práca sa zaoberá problematikou elektroerozívneho drôtového rezania SiSiC keramiky. Prvá časť vysvetľuje princípy elektroerozívneho obrábania, popisuje technológiu WEDM a uvádza vlastností danej technickej keramiky. Druhá časť pozostáva z podrobnej analýzy rezného procesu osemnástich skúšobných vzoriek získaných pri systematicky meniacich sa procesných parametroch. Na základe získaných výsledkov z EDX analýzy, SEM elektrónovej mikroskopie a topografie bol vykonaný rozbor vplyvu jednotlivých parametrov na reznú rýchlosť, drsnosť povrchu, šírku rezu a počtu pretrhnutí drôtu pri použití zvoleného mosadzného rezacieho drôtu. Z vyhodnotených výsledkov bolo možné vybrať kombináciu parametrov, ktorá zabezpečovala stabilný proces obrábania.

Kľúčová slová

elektroerozívne obrábanie, elektroerozívne drôtové rezanie, EDM, WEDM, technická keramika, obrábanie technickej keramiky, SiC, SiSiC

ABSTRACT

The presented diploma thesis deals with the issue of wire electrical discharge machining of SiSiC ceramics. The first part explains the principles of electrical discharge machining, describes the WEDM technology and presents the properties of the advanced ceramics. The second part consists of a detailed analysis of the cutting process of eighteen samples obtained with systematically changing process parameters. Based on the obtained results from EDX analysis, SEM electron microscopy and topography there was performed an analysis of the influence of process parameters on the cutting speed, surface roughness, kerf width and number of wire breaks with usage of the selected brass cutting wire. From the evaluated results it was possible to select a combination of parameters that ensured a stable machining process.

Key words

electrical discharge machining, wire electrical discharge machining, EDM, WEDM, advanced ceramics, advanced ceramics machining, SiC, SiSiC

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

HABOVŠTIAKOVÁ, Mária. Elektroerozivní drátové řezání technické keramiky [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124704>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osička

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému Elektroerozivní drátové řezání technické keramiky vypracovala samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

25.6.2020

Dátum

Bc. Mária Habovštiaková

POĎAKOVANIE

Ďakujem týmto Ing. Karlovi Osičkovi, Ph.D. za motiváciu, cenné podnety, pripomienky a rady, ktoré mi poskytol pri vypracovaní diplomovej práce. Poďakovanie patrí taktiež Ing. Kateřine Mouralovej Ph.D. za ochotu, obetavosť a ústretovosť pri pomoci s vykonávaním experimentu a podávaním odborných rád. Veľká vďaka patrí spoločnosti PENTA TRADING, predovšetkým obchodnému a technickému riaditeľovi pánovi Steiglovi a aplikačnému technikovi pánovi Sperlichovi, ktorí mi umožnili riešiť danú tému, zadovážili potrebný materiál, konzultácie, strojné vybavenie pre umožnenie výkonu experimentu.

V neposlednej rade ďakujem svojim rodičom, súrodencom, priateľovi a všetkým blízkym za podporu počas štúdia.

Časť práce bola vykonaná za podpory výskumnej infraštruktúry CEITEC Nano (ID LM2015041, MŠMT, 2016–2019), CEITEC Vysoké učení technické v Brně

OBSAH

Abstrakt	4
Bibliografická citácia.....	5
Prehlásenie.....	6
Pod'akovanie.....	7
Obsah.....	8
Úvod	10
1 Podstata elektroerozívneho obrábania	11
1.1 Charakteristika elektroerozívneho obrábania	11
1.2 Fyzikálna podstata EDM	12
1.2.1 Polarita elektród.....	15
1.3 Vznik výbojov.....	16
1.4 Zdroje elektrickej energie	16
1.4.1 Závislé generátory RC a RLC	17
1.4.2 Nezávislé generátory	17
1.5 Dielektrická kvapalina	18
1.5.1 Typy dielektrických kvapalín	19
1.5.2 Vyplachovanie	20
1.6 Materiály nástrojovej elektródy	21
1.6.1 Opotrebovanie elektródy	22
1.7 Kvalita povrchu obrobku	23
2 Teória WEDM	26
2.1 Elektroerozívne drôtové rezačky	26
2.2 Drôtová elektróda	28
2.2.1 Druhy používaných drôtov	28
2.2.2 Opotrebovanie a vychýlenie elektródy	29
2.3 Princíp a stratégie rezania	30
2.3.1 Rýchlosť rezania.....	32
2.4 Kvalita rezu.....	33
3 Technická keramika.....	34
3.1 Obrábanie technickej keramiky	34
3.2 Keramika na báze SiC.....	36
3.2.1 Vlastnosti SiC keramiky	36
4 Elektroerozívne drôtové rezanie SiSiC keramiky	38
4.1 Popis materiálu experimentu	38
4.2 Použitý stroj a parametre	39
4.3 Prvotné testy materiálu	40

4.3.1	Postup pri rezaní	41
4.4	Príprava vzoriek pre elektrónový mikroskop a voľba drôtu	44
4.5	Analýza drsnosti obrobeného povrchu	49
4.6	Analýza povrchu pomocou elektrónového mikroskopu	53
4.6.1	EDX analýza obrobeného povrchu	55
4.6.2	Šírka rezu	56
4.7	Hodnotenie opotrebovania elektródy	59
4.8	Technologické vyhodnotenie	63
5	Technicko-ekonomické zhodnotenie výroby	65
5.1	Porovnanie nákladov na rezanie jednotlivých vzoriek	65
5.2	Celkové náklady na rezanie vybranou technológiou	66
	Diskusia	71
	Záver	73
	Zoznam použitej literatúry	75
	Zoznam symbolov a skratiek	80
	Zoznam príloh	83

ÚVOD

Elektroerozívne obrábanie *EDM* (*Electrical Discharge Machining*) od svojho zavedenia do výroby v druhej polovici 20. storočia prešlo výrazným vývojom. Od tej doby sa vysoko nekonvenčná technológia stala dostupnou pre veľký podiel kovoobrábacích spoločností. Rozšírenie moderných materiálov v priemysle ako sú zliatiny titánu, kompozity, spekané karbidy, keramika podmienili zrod strojov s výkonným generátorom, vysokým stupňom automatizácie a presnosti [1].

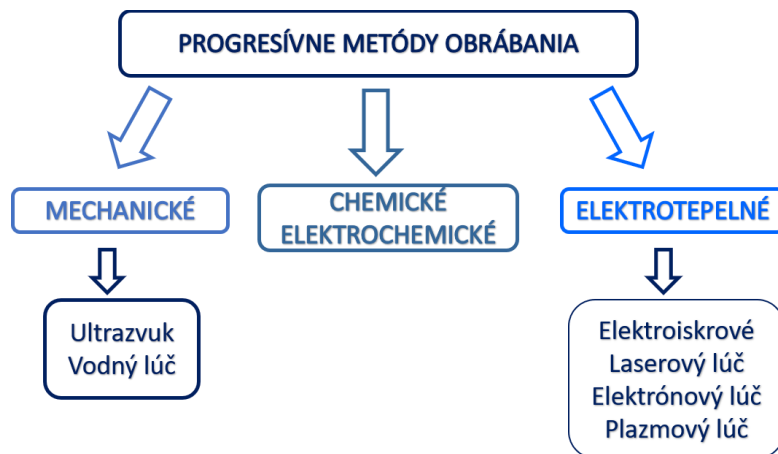
Drôtové elektroerozívne obrábanie *WEDM* (*Wire Electrical Discharge Machining*) si vytvorilo silné postavenie v oblasti produkcie strižných nástrojov a tvarovo zložitých dielov. Predovšetkým vďaka rozvoju *CNC* riadenia je možné plynulo rezať kontúry s rádiusom pod 1 mm o vysokej presnosti. Tak ako začiatkom 21. storočia bolo obrábanie spekaných karbidov len na úrovni výskumu, dnes už sú samotné *WEDM* stroje prispôsobené na obrábanie takýchto materiálov, nie len z energetického hľadiska, ale aj softvérového, ktoré zahŕňa navrhované rozmedzie parametrov pre daný materiál. Tomuto sa prispôbili aj výrobcovia drôtových elektród, ponúkajúci povlakované elektródy, ktoré urýchľujú a tým zlepšujú proces obrábania spekaných karbidov.

Zatiaľ čo *EDM* obrábanie spekaných karbidov je reálnou súčasnosťou trhu, takéto obrábanie technickej keramiky je len vo svojich začiatkoch. Technická keramika sa vyznačuje vysokou tvrdosťou, pevnosťou, odolnosťou voči opotrebovaniu, chemickou stabilitou, nízkou tepelnou a elektrickou vodivosťou. Pre tieto vlastnosti sa využíva v biomedicíne, leteckom priemysle, ale aj na rezné nástroje. Konvenčné spôsoby obrábania sú pri tomto materiáli veľmi náročné z časového a finančného hľadiska. Pri *EDM* technológii nástroj nie je v kontakte s obrobkom, ako pri bežnom trieskovom obrábaní, preto tu odpadá riziko vysokého opotrebovania nástroja. Hlavným problémom je elektrická vodivosť technickej keramiky, ktorá je na nízkej úrovni, preto prípadné *WEDM* rezanie je podmienené jej konkrétnym typom. Keramika, vyskytujúca sa v technickej praxi sa obvykle radí do skupiny nevodivých materiálov (Al_2O_3 , SiN_4 , SiC , Zr_2O). Pridaním vhodného vodivého prvku do základu sa zvyšuje šanca úspešného *EDM* obrábania. To nepodmieňuje len druh materiálu obrobku, ale aj materiál nástroja a rezné podmienky spôsobené nastavením parametrov na stroji. V prípade dosiahnutia požadovaného tvaru súčasti, kvalita povrchu nemusí byť dostatočná na to, aby súčiastka splnila svoje účely.

Implementáciou *WEDM* rezania keramiky do priemyselnej výroby by bolo možné znížiť náklady na výrobu jednotlivých produktov, na dokončovacie operácie, ktorými by sa ušetrilo množstvo financií spôsobených vyradením drahého nástroja. Tomuto ale podlieha rozsiahly výskum chovania jednotlivých typov technickej keramiky za daných podmienok obrábania.

1 PODSTATA ELEKTROEROZÍVNEHO OBRÁBANIA

Vznik nekonvenčných, alebo tiež aj progresívnych technológií je podmienený vyššími nárokmi na vyrábané súčasti, či už je to z hľadiska tvarovej zložitosti, rozmerovej presnosti, časovej a finančnej náročnosti, alebo aj využívaním nových materiálov vo výrobe. Vývoj výrobných metód stále postupuje, preto nie je možné ich detailne rozdeliť do kategórií. Najviac sa využíva klasifikácia podľa druhu využitej energie, teda z fyzikálne – chemického hľadiska [1; 2].



Obr. 1.1 Klasifikácia progresívnych metód obrábania [1; 2].

1.1 Charakteristika elektroerozívneho obrábania

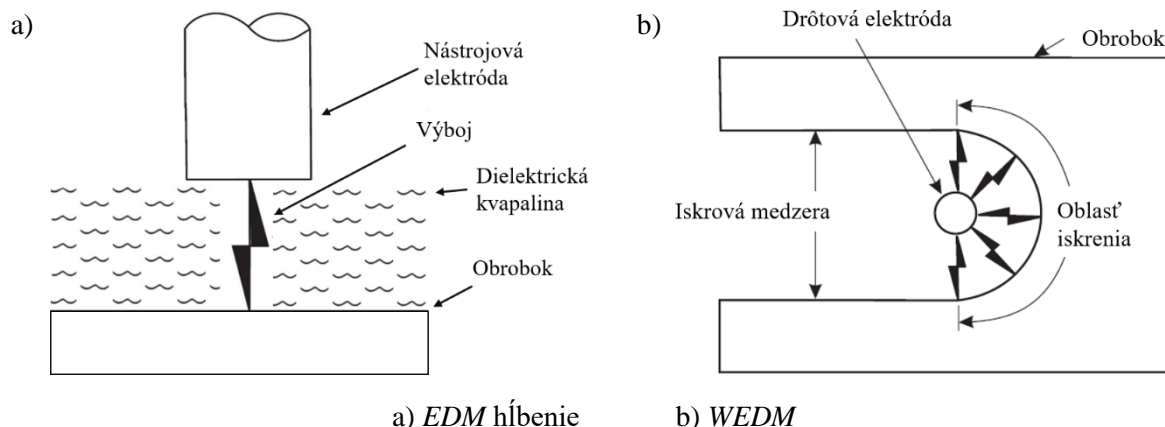
Elektroerozívne obrábanie patrí medzi metódy obrábania vodivých materiálov, pri ktorom dochádza ku vzniku opakujúcich sa elektrických výbojov medzi dvomi elektródami v dielektrickom prostredí. Jedna elektróda je obrobok a druhá plní funkciu nástroja. Podľa jej formy sa technológia rozdeľuje na elektroerozívne hĺbenie (*EDM Sinking*) (obr. 1.2a), drôtové rezanie (*WEDM – Wire Electrical Discharge Machining*) (obr. 1.2b), brúsenie (*EDG – Electrical Discharge Grinding*) (obr. 1.3). Hlavným rozdielom v porovnaní s klasickými metódami obrábania je fakt, že nástroj nie je v priamom kontakte s obrobkom, preto nevznikajú žiadne rezné sily. Odstraňovaný materiál, ideálne v tvare plných guľičiek, vzniká odtavením a odparením týchto častíc z polotovaru [3]. Jeho veľkosť sa pohybuje v rámci mikrometrov. Odpad je odnášaný prostredníctvom dielektrickej kvapaliny vyplňajúcej priestor medzi nástrojom a obrobkom, nazývaným tiež aj iskrová medzera [1; 4].

Elektroerozívne hĺbenie (*EDM Sinking*)

Využitie tejto technológie spočíva v produkcii dutín rôznych tvarov. Dutiny sú obvykle slepé. Nástrojom je elektróda, ktorá ma negatívnu podobu požadovaného otvoru. Ako dielektrikum sa využívajú kvapaliny s petrolejovým základom. Najčastejšie sa hĺbia dutiny foriem na vstrekovanie plastov. Na tvorbu priečnych otvorov sa využíva modifikácia vo forme *EDM* vrtania [5].

Elektroerozívne drôtové rezanie (*WEDM*)

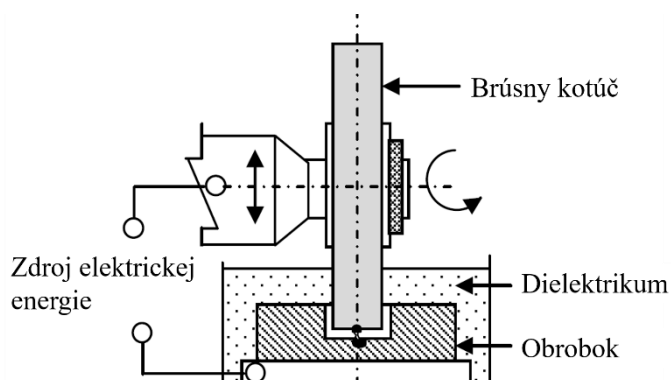
EDM drôtové rezanie je založené na rezaní kontúry tenkou drôtovou elektródou v deionizovanej vode. Ide o precízne rezanie kolmých a skosených dielov, pri získaní vysokej kvality povrchu. Medzi hlavné využitie patrí výroba strižných nástrojov, komponentov do leteckého priemyslu, automotive a iné [5].



Obr. 1.2 Schematické zobrazenie *EDM* hĺbenia a drôtového rezania [4].

Elektroerozívne brúsenie (*EDG*)

Elektroerozívne brúsenie je najmenej využívaná technológia zo všetkých vyššie spomínaných druhov *EDM*. Je vhodná na dokončovacie operácie ťažko obrobiteľných a krehkých materiálov. Elektrodou je rotujúci brúsny kotúč bez abrazívnych častíc z vodivého materiálu, ktorý nie je v priamom kontakte s obrobkom. Intenzívny výplach zabezpečuje prúd dielektrika urýchlený rotáciou nástroja. Používanými dielektrikami sú deionizovaná voda alebo dielektrikum na báze petroleja [6].



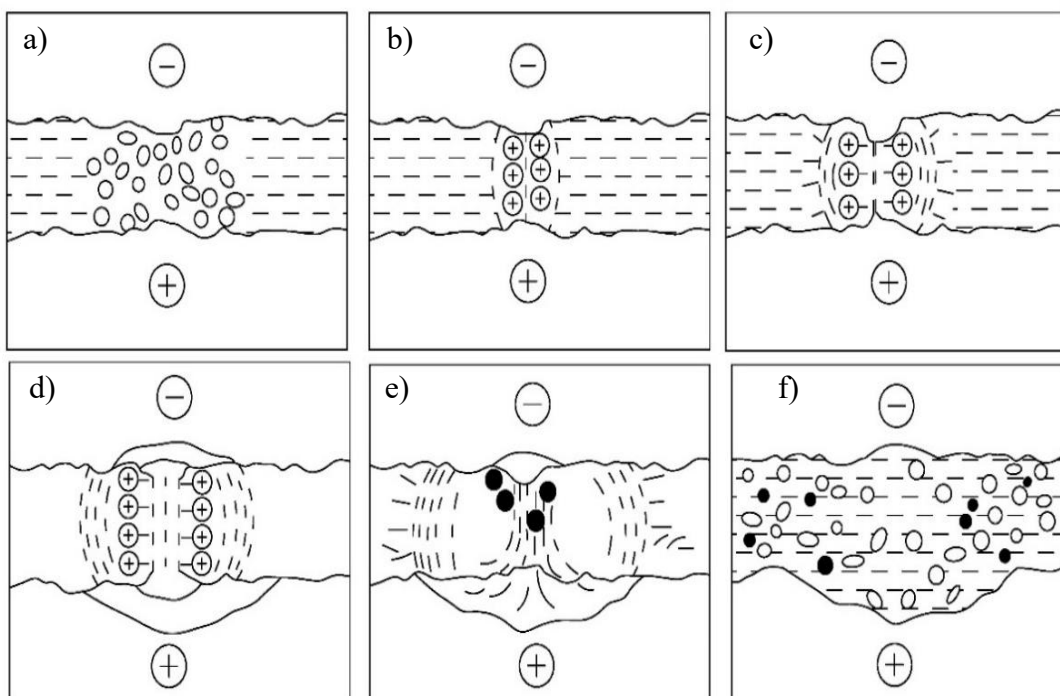
Obr. 1.3 Popis elektroerozívneho brúsenia (*EDG*) [6].

1.2 Fyzikálna podstata *EDM*

Odoberanie materiálu zabezpečuje veľmi vysoká teplota generovaná tokom elektrickej energie vo forme výboja. Na obe elektródy pôsobia elektrodynamické a mechanické účinky [4; 7]. Celý mechanizmus elektroerózie je možné rozdeliť do niekoľkých úsekov zobrazených na obr. 1.4 podľa zdrojov [7; 8].

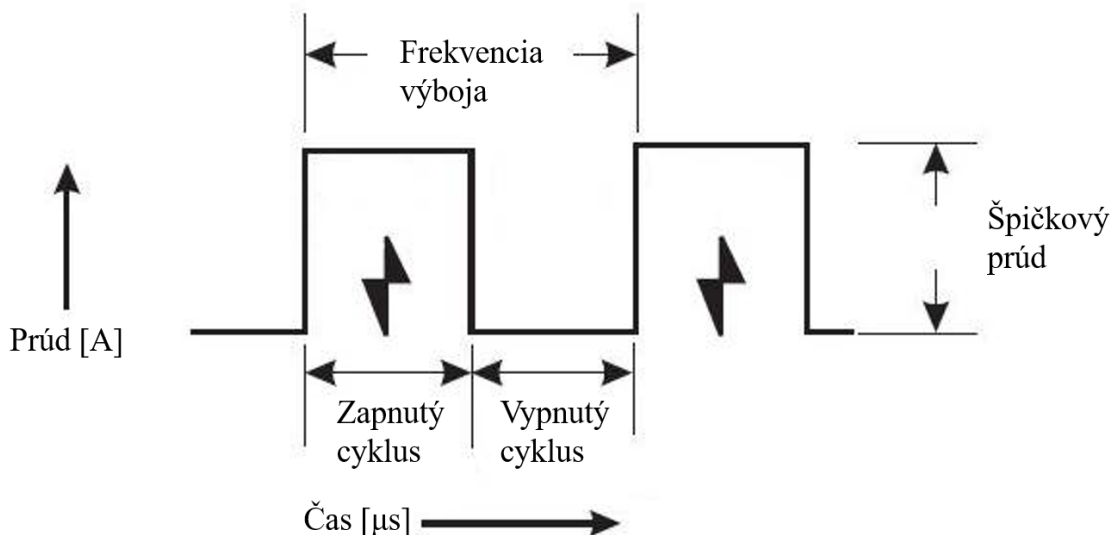
- Polarizácia – zvyšovanie napätia podporuje vznik silného elektrického poľa medzi najbližšími bodmi oboch elektród. Obvykle k tomu dochádza na miestach s vyššou drsnosťou povrchu. Výsledkom elektrického poľa je polarizácia molekúl a iónov dielektrika (obr. 1.4a).
- Oddelovanie kladných a záporných častíc – tok elektrického prúdu sa zvyšuje (10^7 – 10^8 A·s⁻¹) pri súčasnom poklese napätia. Častice sa začnú oddeľovať podľa svojej polarizácie (obr. 1.4b).

- Vznik plazmového kanálu – ustálenie veľkosti napätia a prúdu zapríčiňuje vznik plazmového kanálu. Ten pozostáva z kladných iónov, voľných elektrónov a pary z kovov oboch elektród, taktiež aj plynom z rozkladajúcej sa dielektrickej kvapaliny (obr. 1.4c).
- Roztavenie materiálu – tvorba silného magnetického poľa (obr. 1.4d). Usporiadané ióny stláčajú prúdový lúč, ktorý spôsobuje zvýšenie teploty v kanáli na 4 000–12 000°C. To má za následok roztavenie časti materiálu a jeho čiastočné odparenie (10–40 %).
- Odtrhnutie častíc materiálu – tlak v plazmovom kanáli poklesne a častice z oboch elektród sa začnú odtrhávať (obr. 1.4e).
- Vznik krátera – na anóde sa vytvorí väčší kráter a na katóde menší (obr. 1.4f).



Obr. 1.4 Mechanizmus vzniku výboja [9].

Elektrická energia zabezpečujúca vznik výbojov je dodávaná prostredníctvom impulzov jednosmerného elektrického prúdu, ktorého priebeh v závislosti na čase je možné vidieť na obr. 1.5. Frekvencia výboja je zložená zo zapnutého, vypnutého cyklu za výskytu istého špičkového prúdu.



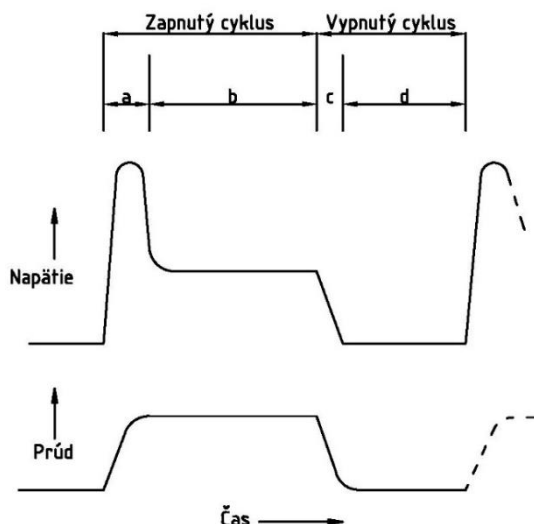
Obr. 1.5 Priebeh impulzov [1; 4].

Nie každý impulz vytvára výboj, ale v ideálnom prípade je tomu tak. Výskyt výboja medzi anódou a katódou je určený elektrickou pevnosťou okolitej kvapaliny a vzniká na miestach s najnižším odporom, teda v blízkosti posledného výboja. Elektrická pevnosť je určená napätím a vzdialenosťou medzi elektródami zo vzťahu (1.1) uvedeného v [10]:

$$E_p = \frac{U_p}{d} [V \cdot m^{-1}] \quad (1.1)$$

kde: $E_p [V \cdot m^{-1}]$ - elektrická pevnosť izolantu,
 $U_p [V]$ - prierné napätie izolantu,
 $d [m]$ - vzdialenosť medzi elektródami, hrúbka izolantu.

Elektródy sa k sebe približujú, kým nedosiahnu na minimálnu vzdialenosť, nazývanú iskrová medzera, ktorá sa vyskytuje v rozmedzí 0,01–0,5 mm (obvykle 0,02 mm). V tejto vzdialenosti dielektrická kvapalina ionizuje (vznik iónu z atómu alebo molekuly vplyvom pridania alebo odobratia elektrónov) a stáva sa vodivá. Napätie i vzdialenosť elektród je rovné elektrickej pevnosti. V kanáli následne vzniká plazma. Po vypnutí prúdu sa kvapalina deionizuje a stáva sa opäť izolantom. K tomuto cyklu zapnutia a vypnutia dochádza niekoľko tisíckrát za sekundu. Vypnutie musí trvať dlhšie ako čas deionizácie, aby nedochádzalo k vzniku výboja v tom istom bode. V tomto časovom okamihu sú odplavené kúsky materiálu z krátera do okolia. Každým výbojom dochádza k vypareniu istých častíc z obrobku aj nástroja za vzniku krátera. Priebehy napätia a prúdu v závislosti na čase sú znázornené na obr. 1.6. Najvyššie napätie sa vyskytuje v úseku ionizácie, poklesom napätia dôjde k odoberaniu materiálu elektroeróziou. Vypnutie zdroja vedie k deionizácii, kde musí byť splnená podmienka dĺžky tejto časovej oblasti [4; 9; 11].



a – doba trvania ionizácie, b – doba výboja,
 c – doba trvania deionizácie, d – zvyškový čas.

Obr. 1.6 Časový priebeh napätia a prúdu pri pôsobení impulzu [1; 11].

1.2.1 Polarita elektród

Polarita nástroja a obrobku je jedným z parametrov, ktoré je možno meniť podľa typu použitých materiálov, toto platí hlavne pri EDM hlbení. Polaritu nástroja nie je možné pri WEDM obvykle meniť a jej nastavenie závisí od výrobcu. Pohyb častíc v iskrovej medzere vedie k toku prúdu v tejto oblasti. Častice takto tvoria teplo dostačujúce na roztavenie kovu. Pri vzniku krátkeho impulzu dochádza k pohybu vyššieho množstva záporne nabitých častíc než u kladne nabitých. Prúd elektrónov bombarduje kladne nabitú elektródu za vzniku tepla. Pozitívne častice v porovnaní so zápornými disponujú väčšou veľkosťou, no rovnakou nárazovou rýchlosťou. Z toho je zjavné, že dokážu vyprodukovať viac tepla a preto sa zvýši miera odoberania materiálu [4; 9]. Rozlišujú sa dva typy zapojenia elektród podľa [4; 9]:

- záporne nabitý nástroj, kladne nabitý obrobok – vhodné pre krátke impulzy, prevláda elektrónová vodivosť, viac energie na anóde,
- kladne nabitý nástroj, záporne nabitý obrobok – ideálne pre dlhé impulzy, prevažuje iónová vodivosť, viac energie na katóde, menšie opotrebovanie elektródy, vyššie odoberanie materiálu.

Voľba polarity závisí na fyzikálnych vlastnostiach oboch typov materiálu. Tab. 1.1 reprezentuje polaritu nástroja a obrobku z rôznych materiálov [4; 9].

Tab. 1.1 Prehľad odporúčaného zapojenia polarity nástroja a obrobku podľa literatúry [9].

Materiál nástrojovej elektródy	Obrábaný materiál				
	Oceľ	Karbid volfrámu ²	Meď	Hliník	Zliatiny niklu
Grafit	+,-	-	-	+	+,-
Meď	+	+,-	-	+	+
Meď – volfrám	+	+,-	-	+	+
Oceľ	+,-	+	-	-	-
Bronz	-	-	-	+	-

1.3 Vznik výbojov

Kráter vznikajúci pôsobením výboja závisí na množstve jeho energie. S energiou výboja taktiež súvisí aj objem odobraného materiálu v nadväznosti na výslednú kvalitu povrchu. Výpočet energie výboja je daný vzťahom (1.2) uvedeného v [12]:

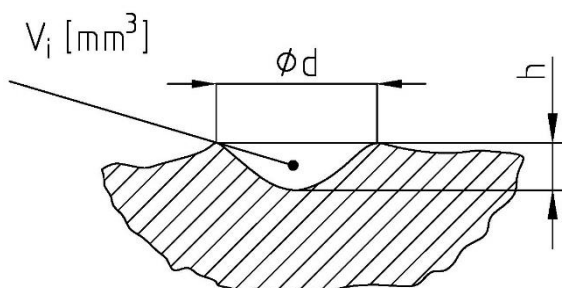
$$W_i = \int_0^T U(t) \cdot I(t) dt \quad [\text{J}] \quad (1.2)$$

kde: W_i [J] - energia výboja,
 U [V] - napätie výboja,
 I [A] - prúd výboja,
 T [s] - doba periódy.

Kráter ako výsledok elektroerozívneho procesu je určený veľkosťou a tvarom (obr. 1.7). Možno definovať jeho parametre, ako sú priemer d a hĺbka h . [12]. Závislosť množstva odobraného materiálu a vybijacej energie je určená vzťahom (1.3) dostupného z [12]:

$$V_i = K \cdot W_i \quad [\text{mm}^3] \quad (1.3)$$

kde: V_i [mm³] - objemové množstvo odobratého materiálu,
 W_i [J] - energia výboja,
 K [-] - konštanta úmernosti.



Obr. 1.7 Profil krátera [12].

Elektrický výboj vzniká na základe dodávanej energie do miesta jeho vzniku. Podľa trvania doby impulzu sa definujú tieto typy výbojov:

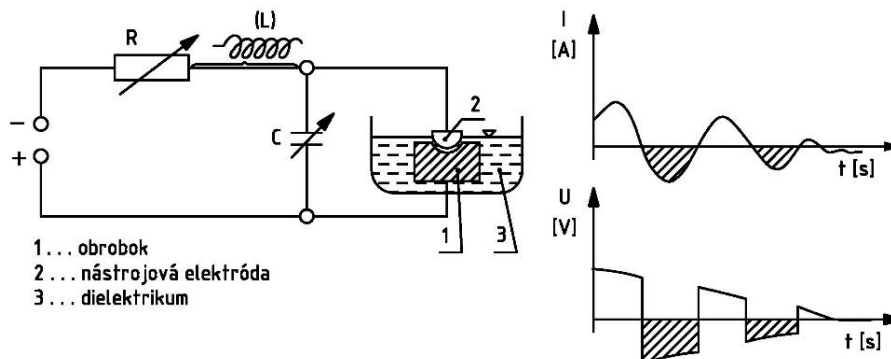
- elektroiskrové – krátke doby impulzov (10^{-6} – 10^{-4} s), vysoké frekvencie, väčší pohyb elektrónov, vysoká hustota prúdu ($10^6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$), vhodné na dokončovanie,
- krátkodobé elektrické impulzy – dlhšie doby trvania impulzov (viac než 10^{-4} s), nižšie frekvencie výbojov, prevláda iónová vodivosť, využíva sa na hrubovanie.

1.4 Zdroje elektrickej energie

Elektroerozívne obrábanie je technológia, pri ktorej dochádza ku transformácii elektrickej energie na tepelnú energiu, preto je generátor dôležitým prvkom celého rezného procesu. Zabezpečuje vznik impulzu, jeho trvanie a veľkosť napätia. Z pohľadu technickej praxe sa vyskytujú tri hlavné typy generátorov. Sú to závislé generátory (RC a RLC), nezávislé tzv. pulzné a polovodičové generátory [13; 14].

1.4.1 Závislé generátory RC a RLC

Závislé generátory *RC* – nazývané tiež aj elektroiskrové, patria k najstarším generátorom. Pozostávajú zo servopohonu, rezistorov zapojených do série a kondenzátorov zapojených paralelne s nástrojom a obrobkom [14]. *RC* resp. *RLC* obvod je znázornený na obr.1.7.



Obr. 1.8 RC obvod [14].

Chod tohto typu generátoru je založený na opakovanom nabíjaní kondenzátora cez odpor a jeho vybíjaní v iskrovej medzere. Nabíjanie zabezpečuje zdroj jednosmerného prúdu. K vybitiu dochádza pri dosiahnutí prirazného napätia U_c v dielektriku. Jeho veľkosť je ovplyvnená znečistením dielektrika a vzdialenosťou oboch elektród. Označenie závislé generátory spočíva v závislosti frekvencie a energie výbojov na zmene parametrov v iskrovej medzere. Závislé *RC* generátory produkujú veľmi krátke výboje, preto tu prevláda elektrónová vodivosť, a teda obrobok je zapojený ako anóda a nástroj ako katóda [13; 12; 14]. Produktivita obrábania je priamo viazaná s energiou na kondenzátore a platí vzťah (1.4) podľa [12]:

$$Q_v = K \cdot \eta \cdot f \cdot W_k = k \cdot \eta \cdot f \cdot \frac{C \cdot U_c^2}{2} \text{ [mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.4)$$

kde:	Q_v [mm ³ ·s ⁻¹]	-	množstvo odoberaného materiálu,
	K [-]	-	konštanta úmernosti,
	η [-]	-	účinnosť výboja,
	f [s ⁻¹]	-	frekvencia výboja,
	W_k [J]	-	energia na kondenzátore,
	C [F]	-	kapacita kondenzátorov,
	U_c [V]	-	prierné napätie.

Medzi výhody patrí ich spoľahlivosť a jednoduchosť, no majú niekoľko nevýhod, ako je pomerne veľké opotrebovanie nástroja (30 %), slabá produktivita, ťažká regulácia frekvencie a výboja [14].

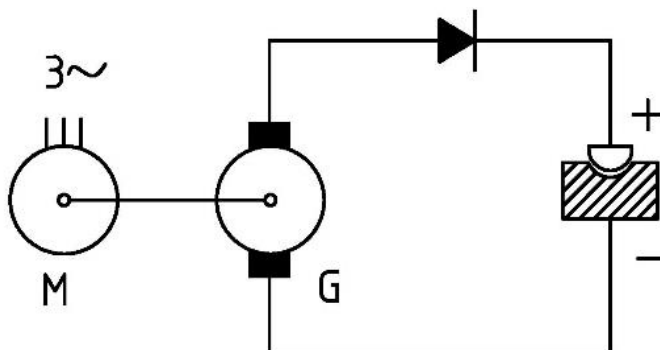
RLC obvod vzniká zapojením indukcie do *RC* obvodu. Týmto sa zníži nevýhoda nízkej produktivity, ktorá sa môže niekoľkonásobne zvýšiť a to predĺžením doby činnosti výboja [14].

1.4.2 Nezávislé generátory

Nezávislé generátory nazývané tiež aj pulzné sa v súčasnosti vyskytujú najčastejšie. Základnou výhodou oproti závislým generátorom je, že umožňujú veľké výkony. Ďalej možno regulovať pracovné parametre, ktoré sú nezávislé na podmienkach v iskrovej medzere. Rozlišujú sa dva typy takýchto generátorov: rotačné a polovodičové.

Rotačné

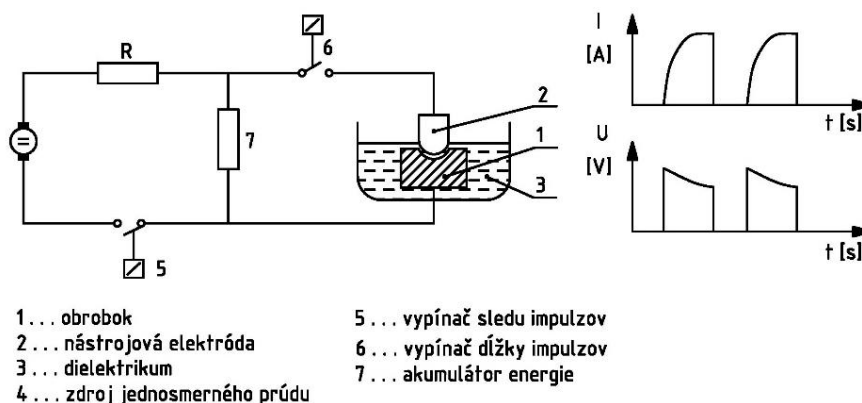
Asynchrónny motor zabezpečuje rotáciu dynama, z ktorého sa produkujú impulzy (obr. 1.9.). Frekvencia impulzov môže dosahovať až 400 Hz. K hlavným nevýhodám patrí hlučnosť, zložitá zmena frekvencie, nutnosť prídavného generátora na dokončovacie operácie [14].



Obr. 1.9 Schematické zobrazenie rotačného generátora [14].

Polovodičové

Tieto generátory sú charakteristické jednoduchou reguláciou frekvencie a možnosťou odoberania vyššieho množstva materiálu až $7000 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Trvanie impulzu je dlhšie, prevláda iónová vodivosť, preto treba uvažovať výhodnejšie zapojenie obrobku ako katódy (obr. 1.10) [14].



Obr. 1.10 Schéma polovodičového generátora [14].

1.5 Dielektrická kvapalina

Dielektrická kvapalina vyplňa pracovný priestor pre elektroerozívne obrábanie. Ide o elektricky nevodivú látku, ktorá túto vlastnosť mení pri pôsobení dostatočne vysokého napätia nutného na dosiahnutie elektrickej vodivosti [9; 12]. Funkciami dielektrika sú [9; 12]:

- vytvorenie izolačnej medzery medzi nástrojom a obrobkom,
- ochladzovanie nástroja a obrobku,
- zabezpečenie odvodu tepla z iskrovej medzery,
- odstraňovanie odobratých častíc materiálov vznikajúcich pri elektroerózii.

Ako dielektrikum sa nevyužíva každá nevodivá kvapalina. Sú to obvykle strojné oleje, petrolej, destilovaná voda, deionizovaná voda. Pre zabezpečenie jej správnej funkcie a efektivity musí spĺňať určité požadované vlastnosti [15; 12].

- **Dostatočne vysoký bod vzblknutia** – vzniká tu nebezpečie samozápalnosti. Celkovo by jeho hodnota mala byť vyššia ako 60 °C.
- **Nízka viskozita** – uplatňuje sa, čím nižšia viskozita, tým lepšie kvapalina preteká kanálom a tak zabezpečuje chladenie a čistenie priestoru. Okrem toho, ovplyvňuje aj kvalitu povrchu. Pri nižšej viskozite je iskrová medzera užšia a tým je nižšia aj drsnosť povrchu.
- **Primeraný elektrický odpor** – nutný pre vznik výboja.
- **Ekologická nezávadnosť** – samotná kvapalina sa nesmie rozkladať, ani byť nijakým spôsobom nebezpečná pre prírodu a človeka.
- **Bez silného zápachu.**
- **Nízka cena** – dielektrikum sa používa vo väčšej objemovej miere, preto je z ekonomického hľadiska nutné dbať aj na cenu kvapaliny.
- **Životnosť** – pri obrábaní sa kvapalina stráca vyparovaním a manipuláciou s obrobkom. Doplnenie alebo aj výmena je nutná v prípade nízkeho levelu objemu, pri dlhodobej nečinnosti stroja a tiež v prípade znečistenia usadenými časticami z elektroerózie. Vhodnou filtráciou sa životnosť kvapaliny zvyšuje aj o niekoľko rokov.

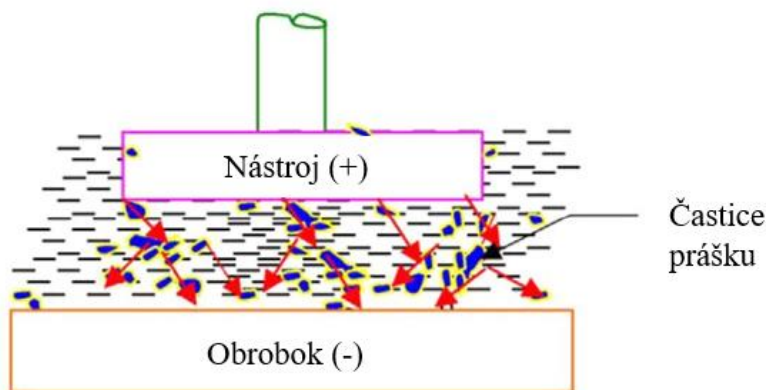
1.5.1 Typy dielektrických kvapalín

S vývojom technológie súvisí aj vývoj dielektrických kvapalín, ako jednej z najdôležitejších zložiek rezného procesu. Každá látka má rôzne vlastnosti, preto inak reaguje na fyzikálne pochody počas obrábania. Ako dielektrikum sa najčastejšie používajú strojné a transformátorové oleje, petrolej, deionizovaná voda [16].

- **Strojné oleje** – obvykle na báze petroleja. Vzniká tu nebezpečenstvo výskytu zdraviu škodlivých látok.
- **Transformátorový olej** – používaný hlavne v minulosti. Vyniká dobrými dielektrickými vlastnosťami. Nevýhodou je nepriaznivý vplyv na životné prostredie.
- **Petrolej** – najčastejšie využívaný pri elektroerozívnom hĺbení. Nízka viskozita podmieňuje dobré vyplachovanie. Medzi nevýhody patrí nižší bod vzplanutia a nevhodné reakcie pri kontakte s pokožkou.
- **Dielektriká na báze vody (deionizovaná voda, destilovaná voda)** – používa sa prevažne pri elektroerozívnom rezaní drôtom. Silnými stránkami sú nízka cena, vyšší bod vzplanutia a dobrá viskozita.

V súčasnosti dochádza ku trendu zaradenia moderných materiálov, ako sú superzliatiny, kompozity a vysoko tvrdé materiály do výroby. S tým súvisia aj problémy s nastavovaním

vhodných parametrov obrábania. Z toho dôvodu sa vyvinula technológia *PMEDM* (*Powder Mixed Electric Discharge Machining*) zobrazená na obr. 1.11. Ide o elektroerozívne obrábanie v dielektrickej kvapaline obohatenej o prášok z vodivých materiálov. Metóda je vhodná hlavne na dokončovacie operácie. Využívajú sa čiastočky čistých kovov, polokovov, ich zliatin alebo tiež aj karbidov (*W, Al, Cu, Cr, Ti, SiC, TiC a iných*). Prítomnosť aditív znižuje dielektrickú pevnosť kvapaliny. Intenzita elektrického poľa vznikajúca v kanáli tak môže byť až trojnásobne vyššia v porovnaní s bežne využívaným dielektrikom. Narastá aj vzdialenosť medzi elektródami a tým sa zlepši vyplachovanie dutiny. Odstránené častice majú menší prierez, čo spôsobuje zvýšenie kvality obrobenej plochy. Zrnká pridaného prášku sú vo veľkosti desiatok nanometrov [16; 17].

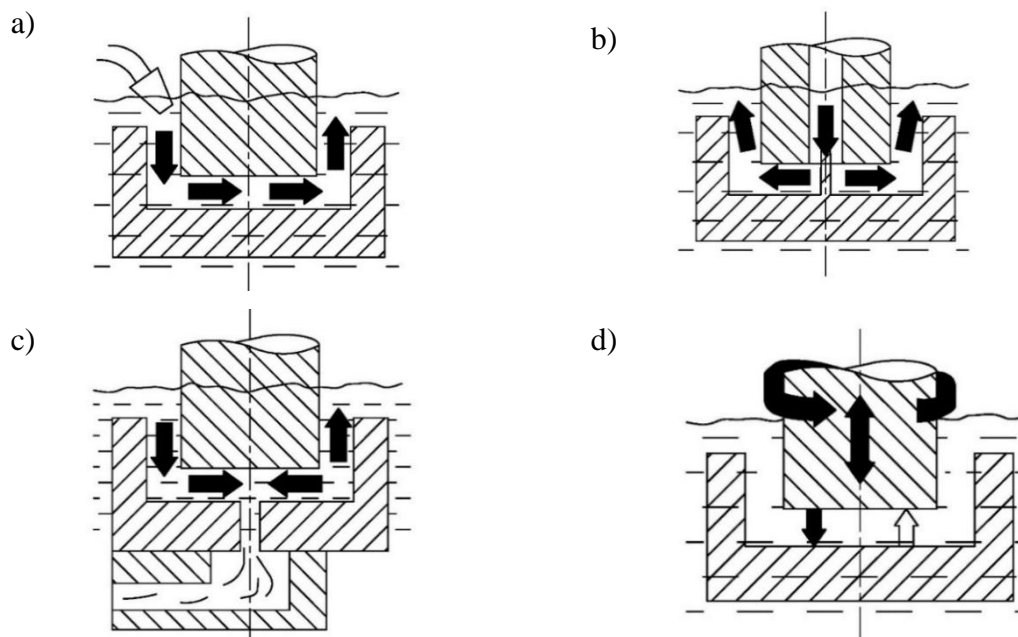


Obr. 1.11 Princíp *PMEDM* [16].

1.5.2 Vyplachovanie

Správnym návrhom vyplachovania sa skráti výrobné časy, zníži sa opotrebovanie elektródy, zlepši sa akosť povrchu obrobku. V súčasnosti sa využívajú štyri druhy vyplachovania: vonkajšie, tlakové vnútorné, odsávaním, pulzné [4; 14; 18].

- **Vonkajšie vyplachovanie** – kvapalina vystupuje z externej dýzy. Vplyvom vysokého prúdu odstraňuje častice elektród z medzery. Vzniká tu možnosť kombinácie s pulzným vyplachovaním (obr. 1.12a).
- **Tlakové vnútorné vyplachovanie** – dielektrikum preteká dutinou v nástrojovej elektróde, následne prúdi okolo stien oboch elektród, odstráni nečistoty a splynie s okolitou kvapalinou. Nevýhodou je vznik kužeľového výčnelku na obrobku znázorneného na obr. 1.12b.
- **Vyplachovanie odsávaním** – kvapalina prechádza otvorom v obrobku, tak sa eliminuje vznik výčnelku. Je nutná potreba prídavného zariadenia na odsávanie kvapaliny uvedeného na obr. 1.12c.
- **Pulzné vyplachovanie** – Nástroj sa v pravidelných intervaloch približuje a oddiaľuje od obrobku prípadne rotuje (obr. 1.12d), tým sa zamedzí usadzovanie častíc na obrábanom diele.

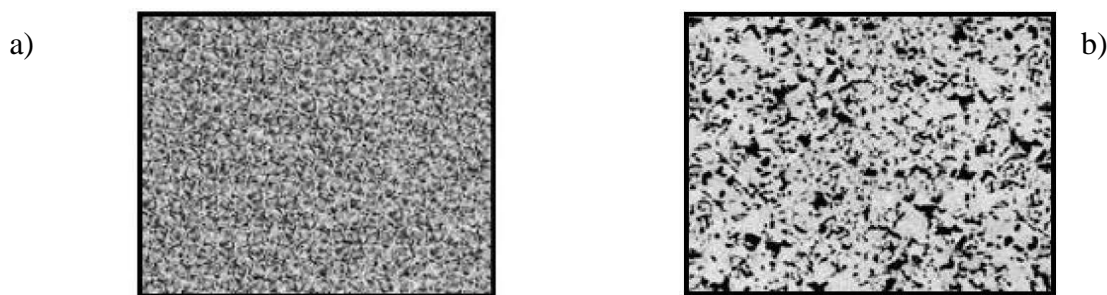


Obr. 1.12 Spôsoby vyplachovania dutiny pri EDM [12].

1.6 Materiály nástrojovej elektródy

Nástroj pri EDM je možné definovať ako prostriedok prenosu elektrickej energie ku obrábanému materiálu. Nevyhnutnými podmienkami sú dobrá elektrická vodivosť a vysoký bod topenia nástrojového materiálu. Pri technológii hĺbenia je nástroj skonštruovaný vo forme požadovaného tvaru dutiny. Elektroerozívne drôtové rezanie sa vykonáva drôtom s kruhovým prierezom z medi a jej zliatin a taktiež povlakovaným drôtom. Na hĺbenie je vhodný grafit, meď, zliatiny medi (bronz, mosadz), volfrám. Typ materiálu elektródy sa volí podľa druhu materiálu obrobku a parametrov obrábania [7]. Porovnanie vlastností jednotlivých materiálov používaných ako elektródy je zobrazený v tab. 1.2.

- **Grafit** – najčastejšie využívaný materiál elektród pri EDM hĺbení ocelí. Kvalita povrchu hotovej súčasti závisí od veľkosti zrna grafitu. Na hrubovanie je určené väčšie zrno, na dokončovanie a precízne obrábanie je vhodný grafit s jemným, menším zrnom (obr. 1.13). Veľkosť zrna grafitu sa na bežnom trhu vyskytuje v rozmeroch 1–10 μm . Výhodou je vysoká miera odoberania materiálu. Je ľahko obrobiteľný a musí byť aj dostatočne pevný, aby nedošlo k poškodeniu nástroja počas manipulácie [7; 19; 20].



a) veľkosť zrna < 1 μm

b) veľkosť zrna < 10 μm

Obr. 1.13 Štruktúra grafitovej elektródy [19].

- **Med'** – disponuje veľmi dobrou vodivosťou, je vhodná na dokončovacie operácie pri vysokom požiadavku na kvalitu povrchu. Na rozdiel od grafitu nemá problém s obrábaním WC. Nevýhodou je jej cena, náročnosť obrábania a v neposlednom rade aj vyššia miera opotrebovania v porovnaní s grafitom. Čistá med' je často nahrádzaná svojimi zliatinami ako sú bronz, mosadz. Vyskytuje sa aj v spojení s grafitom, kde tvorí menšiu objemovú zložku [10; 19; 21].
- **Mosadz** – eliminuje nevýhody medi, je ľahko obrobiteľná, ekonomicky výhodná. Medzi mínusy patrí vysoká miera opotrebovania. Vzhľadom na to, že sa využíva prevažne na WEDM, kde je drôt nepretržite odvíjaný, nedochádza ku výraznému vplyvu opotrebovania na rezaný materiál [19; 21].
- **Volfrám** – využitie hlavne v μ -EDM obrábaní. Ku pozitívnym stránkam patrí vysoká hustota, pevnosť v ťahu, vysoká teplota tavenia a najmenšia miera opotrebovania zo všetkých vyššie spomínaných materiálov. Nevýhodou je nepriaznivá cena [19; 21].
- **Volfrám – med'** – tento materiál kombinuje najlepšie vlastnosti medi a volfrámu, ako sú dobrá elektrická a tepelná vodivosť medi a vysoký bod topenia volfrámu. Vyrába sa práškovou metalurgiou pričom percentuálne zastúpenie kovov je 25–35 % Cu a 70–75 % W. Použitie tohto materiálu je vhodné pre získanie nízkej drsnosti povrchu a na precízne EDM obrábanie. Jedným z pozitívov je vysoká pevnosť, vďaka ktorej sa znižuje náchylnosť na ulomenie počas obrábania úzkych otvorov. Mínusom sú vysoké náklady na materiál [10; 19; 21].

Tab. 1.2 Základné fyzikálne vlastnosti materiálov najčastejšie používaných na elektródy [21].

Parameter	Jednotky	Materiál nástrojovej elektródy				
		Grafit	Med'	Volfrám	Volfrám - med'	Mosadz
Hustota	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2,25	8,93	19,3	14,84	7,2–8,86
Merný elektrický odpor	$\mu\Omega\cdot\text{cm}$	33–185	1,7	5,65	3,83	7,5
Tepelná vodivosť	$\text{W}\cdot\text{K}^{-3}$	25	385	163	220	26–233
Teplota topenia	$^{\circ}\text{C}$	3650	1083	3370	1085–3410	809–1030

1.6.1 Opotrebovanie elektródy

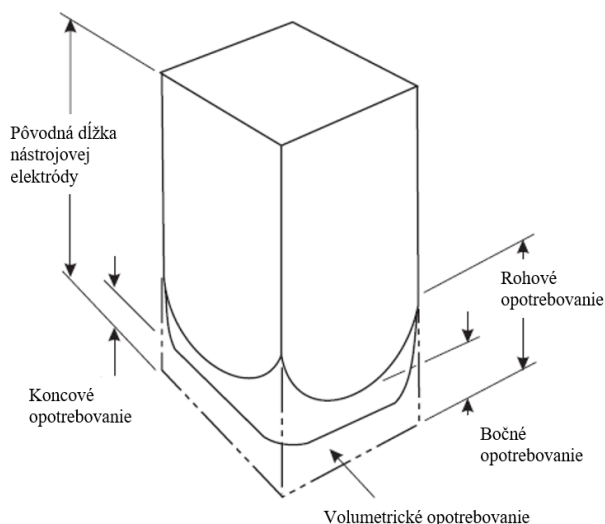
Výsledkom každého obrábacieho procesu je plocha alebo súhrn plôch s istou požadovanou kvalitou povrchu v rozmedzí predom stanovených tolerancií. V porovnaní s klasickými metódami obrábania, na povrchu nevznikajú ryhy po pôsobení nástroja, ale malé krátery, ako následok elektroerózie. Pre získanie požadovaných vlastností je dobré zaistiť čo najnižšie opotrebenie nástroja. To závisí predovšetkým na elektrických parametroch výboja, polarite zdroja, fyzikálnych vlastnostiach materiálu, ako sú teplota tavenia, elektrická vodivosť, tepelná vodivosť, merné teplo [12].

Opotrebovanie nástrojovej elektródy prebieha štyrmi spôsobmi a to sú volumetrické, rohové, koncové a bočné. Pre prax má najväčší význam rohové opotrebovanie znázornené na obr. 1.14, ktoré je najnáchylnejšie na tvorbu. V prípade, že sa obmedzí výskyt tohto javu, zvýši sa životnosť celej elektródy [12].

Pokles objemu nástroja vzhľadom na pokles objemu obrobku je daný relatívnym objemovým úbytkom γ [%] podľa vzťahu (1.5) uvedeného v [12]:

$$\gamma = \frac{V_n}{V_o} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1.5)$$

kde: γ [%] - relatívny objemový úbytok,
 V_n [mm³] - objemové opotrebovanie nástroja,
 V_o [mm³] - odobraný objem materiálu obrobku.



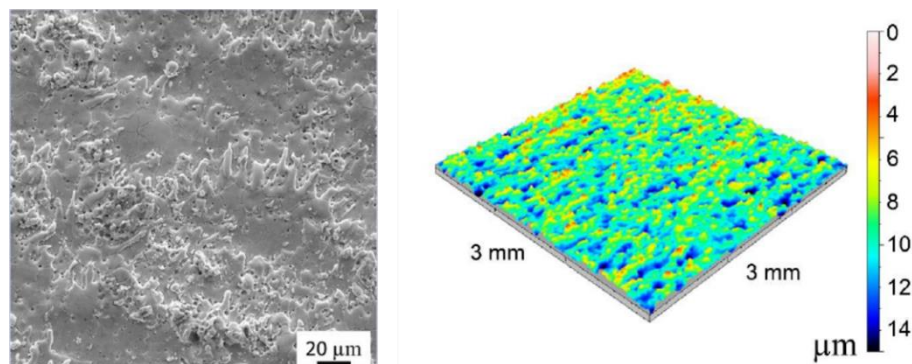
Obr. 1.14 Druhy opotrebovania nástrojovej elektródy [4].

Úbytok materiálu z oboch elektród primárne vzniká dôsledkom tepelnej vodivosti a bodu tavenia. Okrem fyzikálnych vlastností majú vplyv na odolnosť nástroja aj mechanické vlastnosti, ako sú pevnosť v ťahu, Youngov modul pružnosti. Pre porovnanie med' má vysokú tepelnú vodivosť, ale nižšiu teplotu tavenia ako grafit, pri ktorom je zaznamenaný menší úbytok materiálu [19; 20].

1.7 Kvalita povrchu obrobku

Hlavnou úlohou elektroerozívneho obrábania je získanie zložitých tvarov, ktoré by boli z kvalitatívneho a ekonomického hľadiska nevýhodné pre zhotovovanie bežným trieskovým obrábaním.

Obrobený povrch pozostáva z veľkého množstva prekrývajúcich sa kráterov (obr. 1.15), ktoré vznikajú pôsobením sily elektrického poľa. Na ich rozmer vplyva mnoho faktorov, ako sú fyzikálne a mechanické vlastnosti obrábaného a nástrojového materiálu, typ dielektrickej kvapaliny, veľkosť energie výboja a jeho trvanie. Krátery nemajú žiaden smer orientácie a dobre sa v nich drží mazivo. Dokončovacími operáciami je možné dosiahnuť hodnotu parametru drsnosti Ra až 0,3 μm , častejšie sa však vyskytuje v rozmedzí 0,8–3,2 μm . Hrubovaním sa docieli drsnosť Ra 6,3–12,5 μm [12; 18; 21].



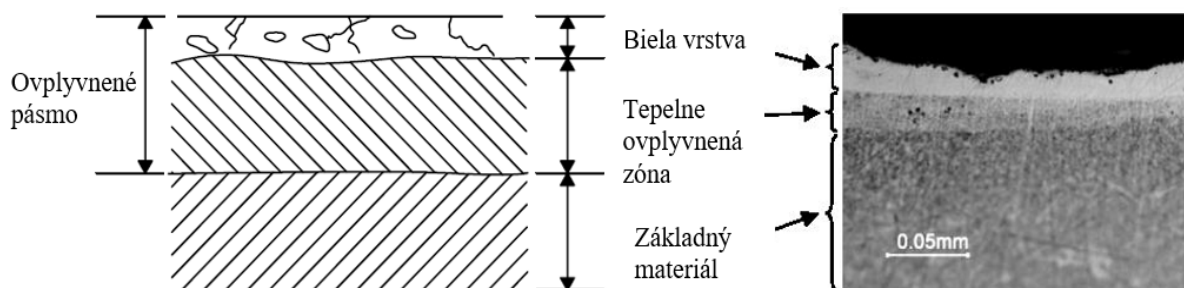
Obr. 1.15 Reliéf povrchu obrobku získaného elektroerozívnym obrábaním [22].

Na základe vysokého vplyvu energie impulzu je možné stanoviť hodnotu maximálnej výšky profilu R_{max} [μm] zo závislosti (1.6) zobrazenej v [12].

$$R_{max} = K_c \cdot W_i^r \quad (1.6)$$

kde: R_{max} [μm] – maximálna výška profilu obrobku,
 K_c, r [-] – experimentálne zistené konštanty,
 W_i [J] – energia výboja.

Všeobecne je možné rozoznávať tri vrstvy na obrobenom telese (obr. 1.16), sú to prepracovaná, takzvaná biela vrstva, tepelne ovplyvnená zóna a základný materiál. Vplyvom nauhličovania obrobku vzniká biela vrstva tvorená pri oceliach martenzitom, zvyškovým austenitom a rozpustenými karbidmi. Hrúbka časti je závislá na veľkosti vybijacej energie a dĺžke trvania impulzu. Predlžujúcim sa časom dielektrikum stráca čoraz viac schopnosť odvádzať roztavený kov z miesta rezu. Ten sa začne usadzovať a tuhnúť. Na povrchu súčiastky sa tak vytvorí biela vrstva. Je charakterizovaná odlišnou štruktúrou než má základný materiál a vyššou tvrdosťou dosahujúcou až 65 HRC. Rýchlo tuhnúca tavenina na povrchu spôsobuje tepelné namáhanie, mikrotrhliny a to ovplyvňuje životnosť hotovej súčiastky. Pre získanie kvalitného povrchu sa odporúča nastavenie nižšej pulznej energie pre zníženie frekvencie výbuchov [22; 23].



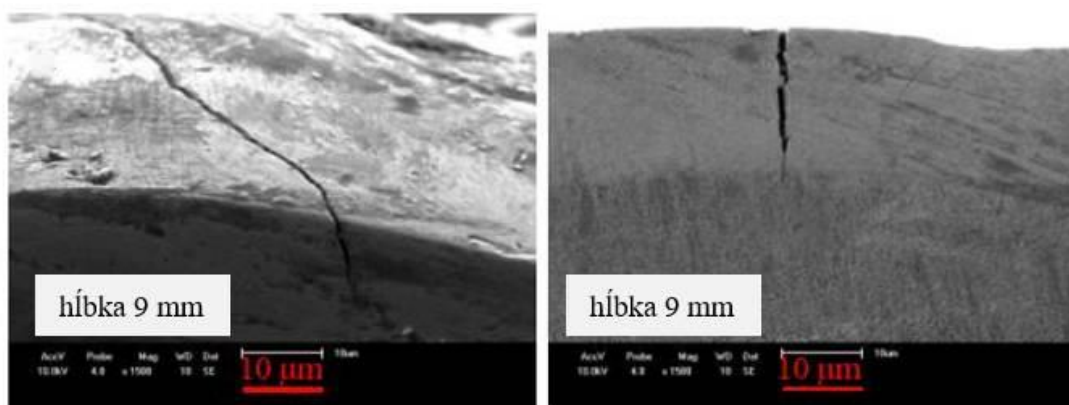
Obr. 1.16 Jednotlivé vrstvy obrobenej súčiastky [24].

U ocelí sa pod prepracovanou vrstvou nachádza tepelne ovplyvnená zóna, kde nedošlo k nataveniu materiálu, ale vplyvom ohrevu nad austenitizačnú teplotu A_{c1} sa materiál rekryštalizoval za vzniku jemnejšej štruktúry. V poslednej vrstve sa nachádza už len základný materiál bez zmeny štruktúry [23].

K výskytu zvyškového napätia dochádza v povrchovej vrstve vplyvom rýchleho ochladzovania. Na pnutie v povrchovej časti má vplyv teplota, veľkosť vybijacej energie, prúd výboja, dĺžka trvania impulzu, vodivosť materiálu. Špičkové zvyškové napätie vo vnútri obrobku je závislé na zmenách v prepracovanej a tepelne ovplyvnenej oblasti. V prípade, že na

povrchu vznikne napätie, ktoré presahuje pevnosť daného materiálu v ťahu, vznikajú mikrotrhliny viditeľné na obr. 1.17 [23; 24].

Rozlišujú sa tri typy vzniku trhlín. Prvým druhom sú vonkajšie mikrotrhliny. Vznikajú v bielej prepracovanej vrstve a šíria sa kolmo k rozhraniu bielej vrstvy a tepelne ovplyvnenej oblasti. Čím je hrúbka bielej vrstvy väčšia, tým je napätie vyššie. Vrchol napätia sa vyskytuje na povrchu obrobku, kde dochádza k najvyššiemu tepelnému zaťaženiu. Ďalším typom sú prenikajúce trhliny, prechádzajúce celou bielou vrstvou. Môžu siahať až do základného materiálu. Na okraji kráterov sa vyskytuje tretí typ trhlín. Tie sú špecifické svojou malou hĺbkou prieniku. Podľa vyššie spomínaného prekonania pevnosti materiálu v ťahu, majú súčasti vyrábané touto technológiou nedostatočnú životnosť pri ťahovom zaťažení, sú slabo odolné voči korózii a únave. Aby sa zamedzilo porušeniu súčasti pri jej aplikácii, povrch môže byť ďalej ešte opracovaný brúsením alebo leštením [1; 24].

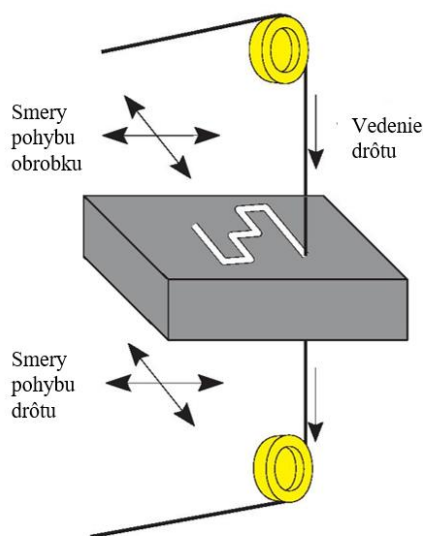


Obr. 1.17 Mikrotrhliny vzniknuté po hrubovaní [24].

2 TEÓRIA WEDM

Elektroerozívne rezanie drôtom (*WEDM*) je varianta *EDM* obrábania, pri ktorej tenký vodivý drôt kruhového prierezu plní funkciu nástroja. Vzhľadom na jeho nízky priemer je možné rezať objemovo menšie súčasti zložitých tvarov z vodivých materiálov o vysokej pevnosti a tvrdosti. Využíva sa na zhotovovanie strižných, lisovacích nástrojov, dielenských prípravkov, v oblasti automobilového priemyslu, elektroniky, medicíny a pod. [16; 1].

Základ technológie spočíva vo vzniku elektrických výbojov spôsobených napájaním drôtovej elektródy zo zdroja. Elektróda sa nepretržite odvíja z cievky a prechádza skrz rezaný materiál podľa nastaveného programu (obr. 2.1). Drôt sa používa iba jedenkrát a je odvíjaný špeciálnym zariadením. Vodiaci mechanizmus ho polohuje do miesta rezu, ktoré je vyplňané dielektrickou kvapalinou. Celý proces rezania má *CNC* riadenie a prebieha najčastejšie v deionizovanej kvapaline [11].



Obr. 2.1 Princíp elektroerozívneho rezania drôtom [5].

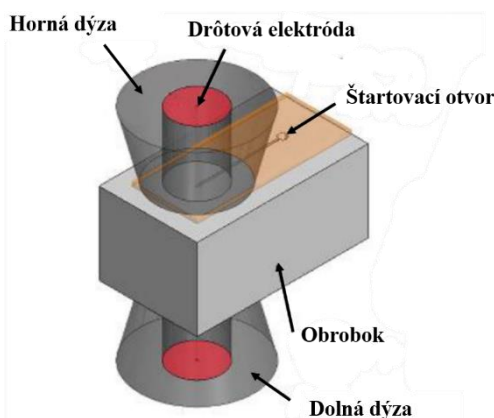
2.1 Elektroerozívne drôtové rezačky

Zrod a rozšírenie technológie *WEDM* je spojený s vývojom *NC* a *CNC* riadiacich systémov vo výrobe. Základnými časťami sú generátor, ktorý zabezpečuje vznik dostatočne silných výbojov, zariadenie pre hospodárenie s dielektrickou kvapalinou, pracovná jednotka stroja, *CNC* riadiaci systém [1].

Zariadenie pre hospodárenie s dielektrikom zaisťuje dodávanie deionizovanej vody do pracovnej vane. Pri obrábaní vzniká veľké množstvo malých častí odstraňeného materiálu, ktoré sú súčasťou kvapaliny, preto je podstatnou časťou tohto zariadenia aj filtračná jednotka. Voda použitá pri obrábaní je prevedená do nádrže, kde sú odfiltrované pevné nečistoty a kvapalina sa pripraví na opätovné použitie. Súčasťou je aj senzor vodivosti dielektrika, ktorý je prepojený na ovládací panel stroja, kde sú uvedené všetky potrebné informácie o vodivosti. V prípade poklesu merného odporu deionizovanej vody si stroj automaticky dodáva deionizačnú živicu, kým nie je zaznamenaný dostatočný merný odpor. Čerpadlo slúži na napustenie pracovnej nádrže dielektrikom [25; 13].

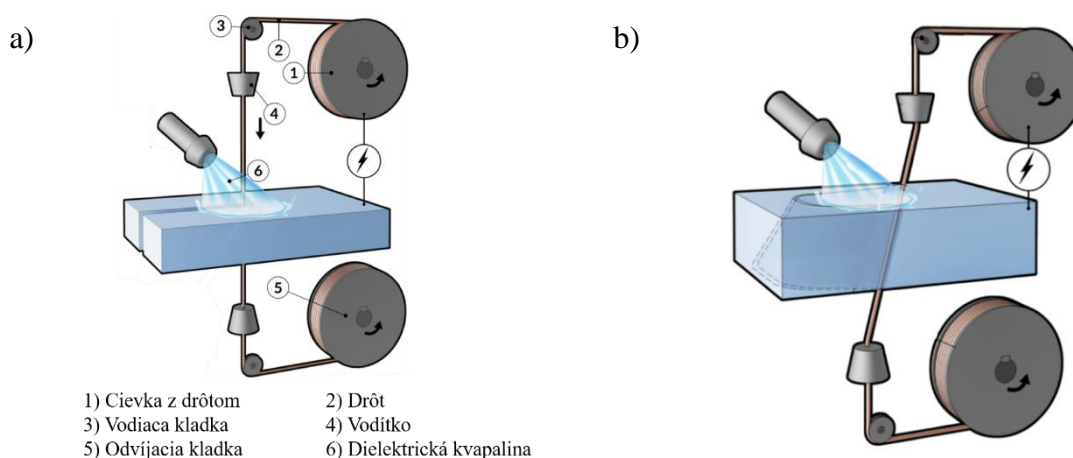
Pracovnú jednotku stoja tvorí pohyblivý upínací stôl, chladiace dýzy, cievky s podávačom drôtu. Upínací stôl je priamou súčasťou pracovnej nádrže tak, že je po obvode opláštený, aby nedošlo k úniku kvapaliny. Servomotory zabezpečujú jeho presnú polohu pri pohybe v osiach X a Y. Počas obrábania je dôležité, aby bola iskrová medzera medzi obrobkom a nástrojom vyplnená dielektrickou kvapalinou. Výška hladiny sa nastavuje automaticky podľa polohy vodičky, ktorým prechádza drôt a je zaznamenaná na ovládacom paneli stroja [4; 22].

Úlohou výplachových dýz je odvádzať odobraté častice materiálu z miesta rezu. Neodplavené kúsky obrobku majú za následok sekundárne výboje, ovplyvňujúce stabilitu rezného procesu. Môže dôjsť ku pretrhnutiu drôtu a s tým súvisiacim predĺžením trvania rezu a vzniku rozmerových nepresností. Dýzy sú uložené v dvoch miestach, nad a pod obrábanym dielom (obr. 2.2), nikdy však nesmú s ním byť v priamom kontakte. Sú odstupňované podľa veľkosti otvoru pre prietok kvapaliny. Menší otvor značí väčšiu fokusáciu lúča vody. Väčší priemer dutiny je vhodný na obrábanie pod uhlom. Tlak výplachu je nastavený na ovládacom paneli stroja a naďalej kontrolovaný počas obrábania. Čím je vyššia vzdialenosť dýz od obrobku, tým je generovaný tlak nižší [25; 13].



Obr. 2.2 Obvyklé usporiadanie vyplachovacích dýz [25].

Jednotka na podávanie drôtu je zložená z niekoľkých kladiek a brzdy, pomocou ktorej sa reguluje rýchlosť odvíjania drôtu. Ten je vedený do hornej hlavy vedenia drôtu, kde sú umiestnené vodičky. Vodičky sa vymieňajú podľa veľkosti priemeru drôtu. Horná hlava sa pohybuje v troch osiach (X, U, V). Pričom pohyb v osiach U a V slúži na rezanie pod uhlom. Dolná hlava okrem vodičky obsahuje aj kladku, ktorou sa odvíja už použitý drôt, ten následne putuje do odpadnej nádoby. Pre zabezpečenie správneho rezania musí byť drôt dostatočne napnutý. Ak je napnutie priveľké, drôt sa môže počas obrábania častejšie trhať a prevádzka bude prerušovaná. Prvotné navlečenie nového drôtu cez podávacie kladky je ručný proces, po pretrhnutí počas rezania si stroj dokáže drôt navliecť automaticky, pričom je určitá dĺžka roztrhnutého drôtu strihaná zabudovaným strihacím zariadením, aby sa nepokračovalo v reze porušeným drôtom. Schematické zobrazenie jednotky podávania drôtu je znázornené na obr. 2.3a ako priame vedenie drôtu a vedenie pod uhlom je dostupné na obr. 2.3b [26].



a) priame vedenie drôtu b) vedenie drôtu pod uhlom

Obr. 2.3 Jednotka na podávanie drôtu [26].

2.2 Drôtová elektróda

Schopnosť nástrojovej elektródy obrábať daný materiál závisí na elektrických, fyzikálnych, mechanických, geometrických vlastnostiach drôtovej elektródy a kombinácii procesných parametrov, ako sú chladenie, dĺžka trvania pulzov, rezná rýchlosť. Kvalita výsledného povrchu priamo súvisí s vlastnosťami elektródy. Od drôtu sa požaduje predovšetkým dobrá elektrická vodivosť a dostatočná pevnosť v ťahu, pre zníženie množstva porušení počas obrábania. Napriek tomu, že náklady na nástroj plnia približne len 10 % z celkových nákladov na výrobu, správnu voľbou materiálu elektródy, je možná optimalizácia procesu a tým zníženie výsledných výdavkov [27].

Z geometrického hľadiska je drôt určený svojím priemerom, povlakom a štruktúrou vrstiev. Drôty sú odstupňované podľa veľkosti priemeru v rozsahu 50–300 μm . V praxi sa najčastejšie využívajú elektródy o priemere 250 μm . Pri μ -WEDM obrábaní aj 30 μm . Použitím elektród s väčším priemerom narastá dodávaná pulzná energia, čím sa zvyšuje rýchlosť odstraňovania materiálu [27].

Pevnosť v ťahu a modul pružnosti v ťahu patria medzi základné mechanické vlastnosti drôtu. Drôt nikdy nesmie byť voľne uložený, ale napnutý do takej miery, aby sa počas procesu nepretrhol. Elektródy s nižšou pevnosťou v ťahu sú vhodné na obrábanie pod uhlom, tie s vyššou pevnosťou na precízne rezanie [27]. Tab. 2.1 zobrazuje najčastejšie problémy vyskytujúce sa pri WEDM rezaní.

2.2.1 Druhy používaných drôtov

- **Mosadz** – mosadzné drôty sú v súčasnosti najvyužívanejšie, hlavne pre svoju nízku cenu a dobré požadované vlastnosti. V zliatine je obvykle pomer prvkov Cu/Zn na úrovni 75/25. V prípade väčšieho zastúpenia Zn (40 obj. %) vznikajú ťažkosti s poklesom ťažnosti pri premene na krehkú gama fázu. Povrch drôtu je lesklý. Matný povrch, prípadne pokrytý škvrnami znamená jeho znečistenie, respektíve oxidáciu. Mosadzné drôty sa využívajú na rezanie väčšiny kovov [28].
- **Povlakované drôty** – ide o druh drôtov s tenkou vrstvou povlaku z čistého Zn alebo ZnO (2–3 μm), ktorý je nanosený na mosadzné, medené ale aj oceľové jadro. Povlak vzniká obvykle galvanickým pokovovaním, kedy sa zaručí rovnomerná hrúbka vrstvy. Oproti mosadzným drôtom majú vyššiu pevnosť v ťahu, ale aj vyššiu cenu. Používajú sa na rezanie ťažšie obrobiteľných materiálov, ako sú karbidy, kompozity, keramika. Sfarbenie elektród povlakovaných čistým zinkom je lesklo strieborné, pričom pri použití ZnO je ich povrch matne šedý. Drôty s oceľovým jadrom sú často pokryté nie len zinkom ale aj mosadzou. [28].
- **Drôty so širšou difúznou vrstvou** – povrch elektródy tvorí široká vrstva Zn (18–35 μm) nanosená na mosadzné alebo medené jadro. Po vyžihnutí v špeciálnej peci sa docieli približne 50 hm. % mosadze na 50 hm. % Zn . Majú o niečo nižšiu pevnosť v ťahu oproti už spomínaným materiálom. Ich sfarbenie je žltozelené až hnedé. Sú vhodné na obrábanie ocele, hliníka a jeho zliatin [28].
- **Volfrám** – najdrahší materiál elektród a zároveň má najvyššiu pevnosť v ťahu. Volfrámové drôty sa vyrábajú s menšími priermi, preto je možné rezať veľmi jemné detaily a ostré hrany [28].

Tab. 2.1 Prehľad základných problémov pri WEDM rezaní a návrhy ich riešení [28].

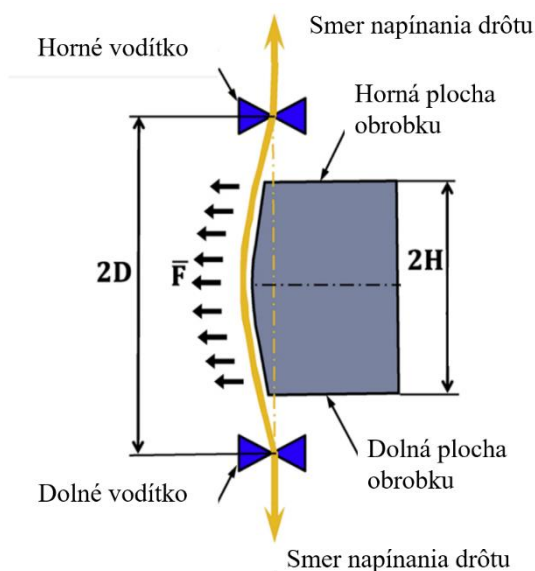
Problém	Riešenie	Typ drôtu
Zníženie porušenia drôtu	<ul style="list-style-type: none"> • Vyšší priemer drôtu • Zníženie napnutia drôtu • Drôt s vyššou pevnosťou v ťahu a lomovou húževnatosťou 	<ul style="list-style-type: none"> • Povlakovaný s ocelovým jadrom • Mosadzný s prímiesou horčíka alebo hliníka
Zvýšenie reznej rýchlosti	<ul style="list-style-type: none"> • Vyšší priemer drôtu • Vyšší výkon • Drôt s vyššou vodivosťou • Zvýšiť tlak vyplachovania 	<ul style="list-style-type: none"> • Medený povlakovaný zinkom • Mosadzný povlakovaný zinkom
Rezanie tenkých súčastí	<ul style="list-style-type: none"> • Vyšší priemer drôtu • Vyšší výkon • Drôt s vyššou vodivosťou a pevnosťou v ťahu • Lepšie vyplachovanie 	<ul style="list-style-type: none"> • Drôty so širšou difúznou vrstvou • Povlakovaný s ocelovým jadrom
Zvýšenie presnosti	<ul style="list-style-type: none"> • Využitie drôtu s vyššou pevnosťou v ťahu a lomovou húževnatosťou 	<ul style="list-style-type: none"> • Povlakovaný s ocelovým jadrom • Mosadzný s prímiesou horčíka alebo hliníka

2.2.2 Opatrebovanie a vychýlenie elektródy

Napriek tomu, že sa počas WEDM rezania elektróda postupne odvíja, dochádza k jej opotrebovaniu. Prvá deformácia vzniká pri prechode drôtu prítlačnými kladkami, kedy sa elektróda na miestach kontaktu s kladkami sploští. Pri WEDM rezaní je polovica nástroja v blízkosti obrobku, preto pôsobí elektroerózia len na túto časť drôtu.

Zmena tvaru prierezu vzniká v dôsledku dvoch súčasne konajúcich sa pohybov a to sú rezná rýchlosť, ktorou drôt postupuje naprieč rezaným materiálom a rýchlosť odvíjania elektródy. Drôt degraduje už v momente kontaktu s obrobkom a pri ďalšom pohybe sa jeho poškodenie len zvyšuje. Po zarezaní sa rádius stráca dôsledkom odstraňovania materiálu drôtu pri obrábaní. Opatrebovanie drôtu sa počas rezania mení vďaka funkcii nepretržitého odvíjania. Vrchnú časť obrobku obrába zakaždým nový drôt, zatiaľ čo spodná strana je výsledkom nástroja, ktorý prekonal elektroeróziu v každom myslenom bode rezu. Treba poznamenať, že tvarové zmeny na elektróde sú na úrovni desiatok mikrometrov, preto majú minimálny vplyv na výslednú kvalitu obrobeného povrchu. Opätovné použitie drôtu nie je vhodné vzhľadom na oslabený prierez drôtu a jeho časté porušovanie [29].

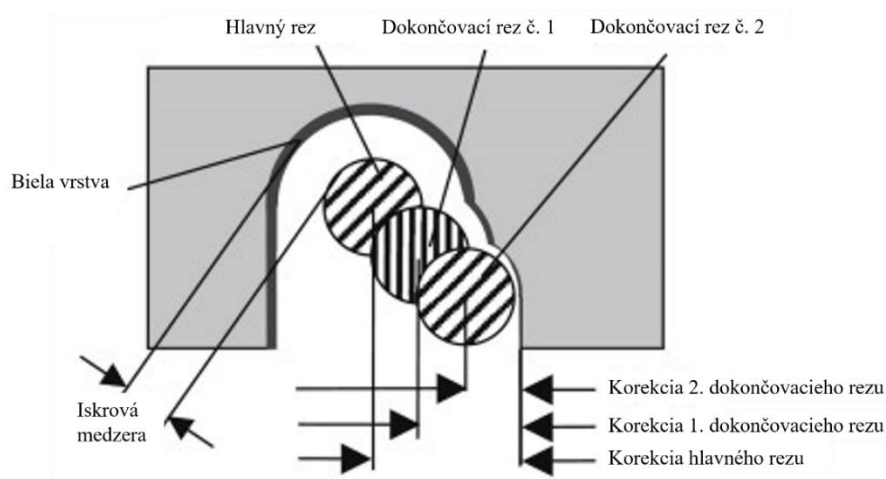
Napriek tomu, že je opotrebovanie elektródy minimálne môže dôjsť ku vychýlke geometrických tolerancií vplyvom rozdielnej vzdialenosti hornej a spodnej časti obrobku od drôtu (obr. 2.4). Problém sa týka hlavne vysokých obrobkov. Diferencia nástroja od naprogramovaného miesta rezu je výsledkom vibrácie drôtu, jeho ohybom a rýchlosťou odvíjania. Vibrácie a ohyb elektródy sú spôsobené výbuchmi v miestach výbojov a elektrostatickou silou pôsobiacou pozdĺž celého napnutého drôtu. Význam spomínaných faktorov je závislý na frekvencii výboja, výške obrobku, priemere drôtu, jeho napnutia a pod. [30].



Obr. 2.4 Ohnutie drôtu počas rezania [30].

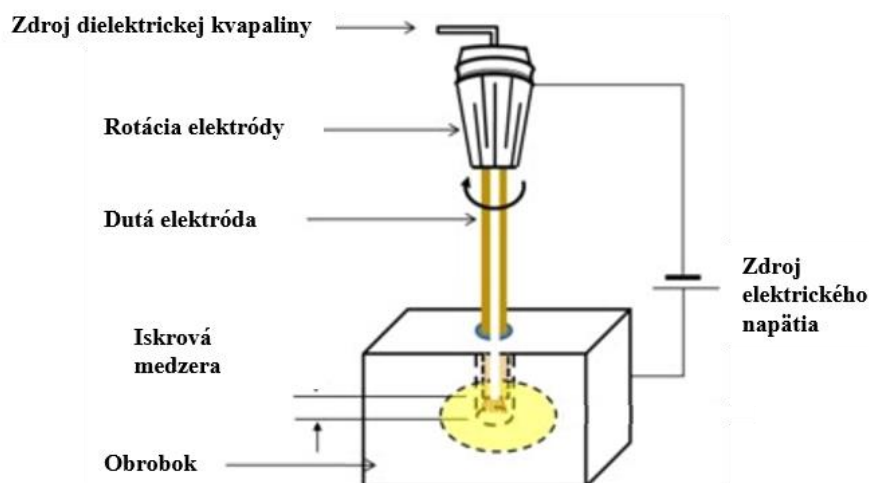
2.3 Princíp a stratégia rezania

Pre dosiahnutie čo najlepšej kvality povrchu sa vykonávajú nie len hrubovacie, ale aj dokončovacie operácie (obr. 2.5) s dostatočným prídavkom na obrábanie. Na hlavný rez je nutná vysoká energia výboja, kvôli potrebe nárastu rýchlosti obrábania, pri súčasnej vysokej miere odoberania materiálu. Dôležitým pojmom je korekcia, ktorá je pri hlavnom reze definovaná súčtom polomeru drôtu, šírky iskrovej medzery a prídavku na obrábanie. Takýto povrch je charakteristický nízkou kvalitou a širokým pásom tepelne ovplyvnenej zóny vrátane bielej vrstvy. Zavedením niekoľkých ďalších rezov sa znižuje dodávaná energia, množstvo odoberaného materiálu a hrúbka bielej vrstvy, ktorá môže klesnúť pri vhodných podmienkach až na hodnotu $1 \mu\text{m}$. Každý dokončovaciej operácii sa priradí prídavok, ten sa postupne znižuje, pre získanie lepšej drsnosti. Korekcia posledného dokončovacieho rezu zahŕňa polomer drôtu a šírku iskrovej medzery. Správne navolenými parametrami je možné pri poslednom dokončovacom reze získať drsnosť R_a blížiacu sa $0,3 \mu\text{m}$ [31; 32].



Obr. 2.5 Operácie pri WEDM rezaní [31].

Rezanie kontúr si vyžaduje zhotovenie štartovacej diery viditeľnej na obr. 2.6, ktorá slúži na navlečenie drôtu. Otvor môže byť vytvorený konvenčným spôsobom na vrtáčkách, ak to dovoľuje voľný priestor na polotovare, alebo tiež samotný materiál. Spekané karbidy, nástrojové oceli a niektoré neželezné kovy je výhodnejšie vrtat' elektroerozívne. Schematické zobrazenie je uvedené na obr. 2.6. Ide o technológiu podobnú EDM hĺbeniu.



Obr. 2.6 Schematické zobrazenie EDM vrtania [33].

Elektródou je medená alebo mosadzná dutá trubička s veľkosťami priemeru 0,15–4 mm. Existujú aj elektródy s priemerom 0,05 mm vyrobené z *Ti*, ktoré sa využívajú v μ -EDM. Vrtanie sa vykonáva na špeciálnej elektroerozívnej hĺbičke. Dielektrická kvapalina, obvykle na báze petroleja, prechádza do miesta vrtania skrz dutinu trubičky. Často je vnútro elektródy tvorené viacerými otvormi, zobrazenými na obr. 2.7. Pre navlečenie drôtu postačuje otvor do veľkosti priemeru 3 mm [32; 34].

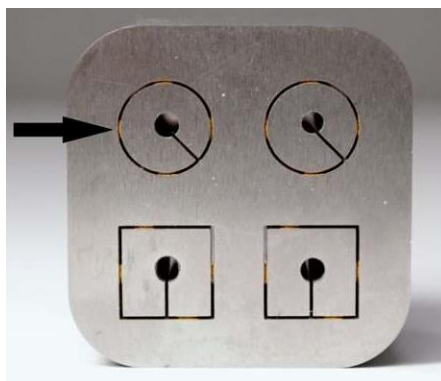


Obr. 2.7 Elektródy používané pri EDM vrtaní [34].

Rozlišujú sa dve stratégie rezania a to rezanie razníkov a razníc. Za razník sa považuje obrobok, ktorý vzniká z vnútornej strany kontúry a raznica z vonkajšej strany. Pri stratégii rezania razníka nie je nutný predpripravený štartovací otvor, keďže sa nachádza mimo vznikajúceho výrobku. Naopak je tomu v prípade zhotovovania telesa typu raznica, kedy sa štartovací otvor musí nachádzať vo vnútri požadovanej kontúry [30].

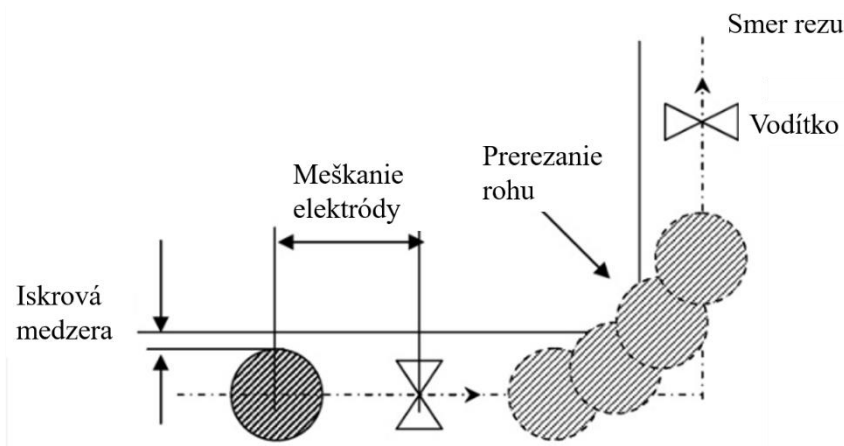
Postup rezania je podobný pri oboch stratégiách, skladá sa z hlavného a niekoľkých dokončovacích rezov. Vznikajú tu problémy s odstráneným materiálom, ktorý odpadáva z rezaného polotovaru. Pád výrobku, resp. odpadu môže porušiť vyplachovaciu jednotku, spôsobiť skrat, znehodnotiť obrobok, preto sa pristupuje k pridržaniu tohto materiálu prostredníctvom mostíkov [30]. Mostík môže byť tvorený základným materiálom, ktorý ešte

nebol obrobený, alebo cudzím telesom. Pred dokončením rezu sa stroj zastaví a obsluha aplikuje niektorú z metód upevnenia odpadajúceho materiálu. Upevnenie pomocou magnetov patrí medzi najlacnejšie metódy a je limitované hmotnosťou dielu. Vodivé lepidlá a lepiace pásky sú vhodné na pridržiavanie malých kusov. Upínacie svorky je nutné nastaviť tak, aby mohlo dôjsť k ich kontaktu s drôtom počas rezania [35]. Moderné stroje dokážu vytvárať mostíky z odtavených častíc elektródy (obr. 2.8), ktoré následne vplyvom dielektrika tuhnú. Proces vytvárania mostíkov je nepretržitý a jadro je možné oddeliť pomocou kladiva [36].



Obr. 2.8 Stratégia rezania matrice so štartovacím bodom a strojne vytvorenými mostíkmi [36].

Rezanie rohov a malých zaoblení prináša so sebou niekoľko problémov. Docieliť relatívne ostrý roh je možné iba z vonkajšej strany kontúry. Zvnútra kontúry sa bude vždy vyskytovať malý rádius určený priemerom drôtu a príslušnou iskrovou medzerou [5]. Vplyv vibrácií a ohybu drôtu je možný vidieť na obr. 2.9, kde drôt zaostáva za vodičkami. Zmenou smeru rezania pri obrábaní rohov, elektróda dlhšie pôsobí na vnútornej strane rezu, tam dochádza k prerezaniu a na vonkajšej strane k nedorezaniu. Moderné stroje v súčasnosti obsahujú program pre rezanie rohov, kedy stroj v blízkosti rohu automaticky spomalí [5].



Obr. 2.9 Zaostávanie drôtu pri rezaní rohu vplyvom jeho prehnutia [37].

2.3.1 Rýchlosť rezania

Rýchlosť rezania u *WEDM* technológie zaznamenala za posledné desaťročia vysoký nárast. Zatiaľ čo v 80. rokoch 20. storočia bola bežná rezná rýchlosť okolo $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, dnes pri použití drahého povlakovaného drôtu sa môže vyšplhať až na $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Klasickým mosadzným drôtom, ktorý tvorí približne 80 % dopytu, je rýchlosť rezania $7\text{--}9 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. S vysokou reznou rýchlosťou sa zvyšuje aj frekvencia výmeny spotrebného materiálu. Dochádza tak ku skráteniu životnosti filtrov, živice, chráničov dýz, vodičov. Problémy môžu vzniknúť pri nepostačujúcej tuhosti častí stroja, prípadne stroja samotného [38; 39].

Samotný druh obrábaného materiálu a jeho výška majú vplyv na rýchlosť rezania. Materiály s nízkou pórovitosťou obsahujú menej nečistôt, čo spôsobuje ľahšie rezanie. Radia sa tu nástrojové ocele, špeciálne zliatiny. Rezanie hliníka sprevádzajú ťažkosti z dôvodu jeho nízkej teploty tavenia a je ťažšie získať požadovanú presnosť [38; 39].

2.4 Kvalita rezu

Pri WEDM je obrobok obvykle zapojený ako anóda a drôt ako katóda. Tieto prvky počas obrábania delí od seba iskrová medzera, ktorej veľkosť sa pohybuje v rozmedzí 0,025–0,05 mm. K odstraňovaniu materiálu dochádza vplyvom tepelne-elektrických pochodov, ktoré narúšajú integritu povrchu, vrátane chemického zloženia, tvrdosti, mikroštruktúry a topografie [40].

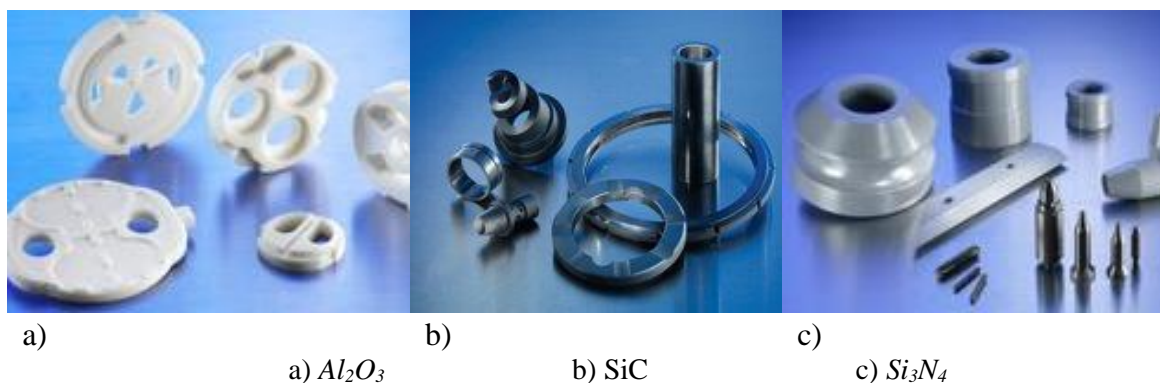
Dôležitým výstupným parametrom *WEDM* rezania je šírka rezu, hlavne pri dokončovacích rezoch. Ovplyvňuje celkovú geometriu obrobku. Na veľkosť šírky rezu vplýva materiál obrobku aj elektródy a procesné parametre nastavené na stroji [40].

Kontaminácia rezaného dielu prvkami z elektródy je vplyvom vysokých teplôt (8 000–20 000 K) bežnou súčasťou *WEDM* rezania. Môže k nej dôjsť usadením vystrelených častíc z nástroja na obrobok, ale aj difúziou. Vzrastajúcou energiou výboja je kontaminácia výraznejšia. Vyšším tlakom výplachu a znížením času trvania výboja je možné kontamináciu obmedziť. Taktiež predĺžením doby trvania výboja sa prvky uvoľnené z elektródy dostávajú hlbšie do materiálu, čo môže narušiť požadované vlastnosti. Ukotvenie cudzích prvkov z nástroja teda závisí na procesných parametroch a môže dosahovať aj viac než 10 hm. % [40].

3 TECHNICKÁ KERAMIKA

Keramika je vo všeobecnosti definovaná ako anorganický nekovový materiál, vyrobený zo zmesi práškov formovaných do požadovaných tvarov. Hmota je následne zahriata na vysokú teplotu pri pôsobení tlaku. Tlaková záťaž nie je podmienkou výroby. Rozlišujú sa dve skupiny keramických materiálov a to tradičná a technická keramika. Zloženie klasickej keramiky pozostáva z ľahko dostupných a lacných minerálov a jej využitie sa aplikuje v každodennom živote. Na druhej strane, spracovanie technickej keramiky je náročnejšie z hľadiska kontroly vlastností zmesi, ku ktorým patrí veľkosť častíc, chemická čistota. Pojem technická keramika je pomerne široký a obsahuje materiály s rôznymi hlavnými zložkami najčastejšie sú to oxidy, karbidy a nitrídy. Všetky tieto skupiny sa vyznačujú svojimi charakteristickými znakmi [41; 42].

- **Oxidická keramika** – hlavný zástupca je Al_2O_3 nazývaný tiež aj alumina. Zloženie pozostáva z 90–99,99 % Al_2O_3 , pričom zbytok tvoria nečistoty. Má charakteristickú bielu farbu viditeľnú na obr. 3.1a. Používa sa okrem iného v elektrotechnike ako izolant, v medicíne, na výrobu obrábacích nástrojov. Ďalším reprezentantom je ZrO_2 , ktorý sa podľa spracovania vyskytuje v niekoľkých kryštalických mriežkach. Materiál sa vyznačuje výbornou odolnosťou voči teplotným šokom, opotrebovaniu, korózii pod napätím. Má vysokú pevnosť, nízku teplotnú vodivosť, pomerne značnú tepelnú rozťažnosť. Okrem biomedicíny sa využíva aj na výrobu rôznych komponentov do spaľovacích motorov. Farbou pripomína slonovinu [41; 42].
- **Neoxidická keramika** – zahrňuje keramiku na báze karbidov, nitrídov, boridov a iných. Za najrozšírenejší typ neoxidickej keramiky možno považovať karbid kremíka SiC , sfarbený dočierne, pozri obr. 3.1b. Ten spolu s ostatnými karbidmi charakterizuje extrémna tvrdosť a odolnosť voči opotrebovaniu. Hlavným využitím sú obrábacie nástroje a abrazíva. Ďalšou skupinou neoxidickej keramiky sú nitrídy. Nitríd kremičitý (Si_3N_4) je zobrazený na obr. 3.1c v sivom odtieni. Oba materiály sa používajú hlavne na výrobu obrábacích nástrojov [41; 42].

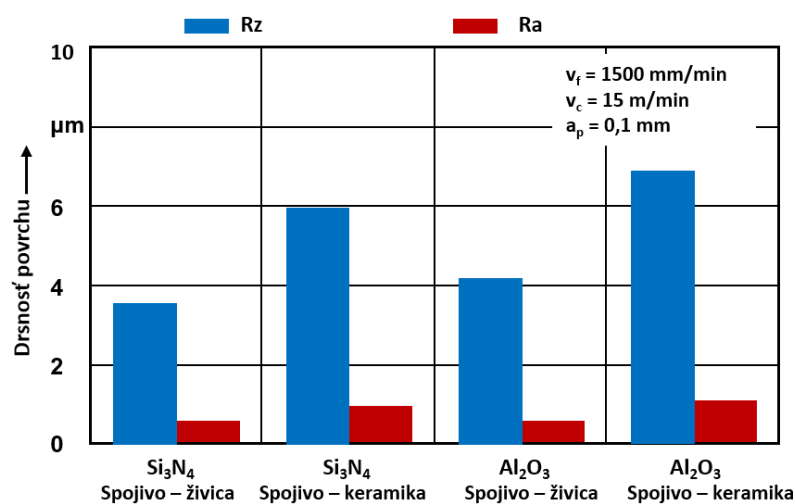


Obr. 3.1 Najrozšírenejšie typy technickej keramiky [43].

3.1 Obrábanie technickej keramiky

Dosiahnutie požadovaného tvaru súčasti je pri technickej keramike o niečo zložitejšie než je tomu pri kovoch. Výroba spočíva v zaformovaní zmesi do určitého tvaru a jej následnom tepelnom spracovaní. Povrch však nemusí spĺňať požiadavky drsnosti, preto nasleduje ešte dodatočné dokončovanie. Konvenčné metódy obrábania sú veľmi náročné z dôvodu jeho tvrdosti, krehkosti, náchylnosti k trhlinám, krehkým lomom a štiepeniu hrán. Vznikajú tu ťažkosti pri voľbe vhodnej technológie a nástroja, ktorý je podstatne nákladný [44].

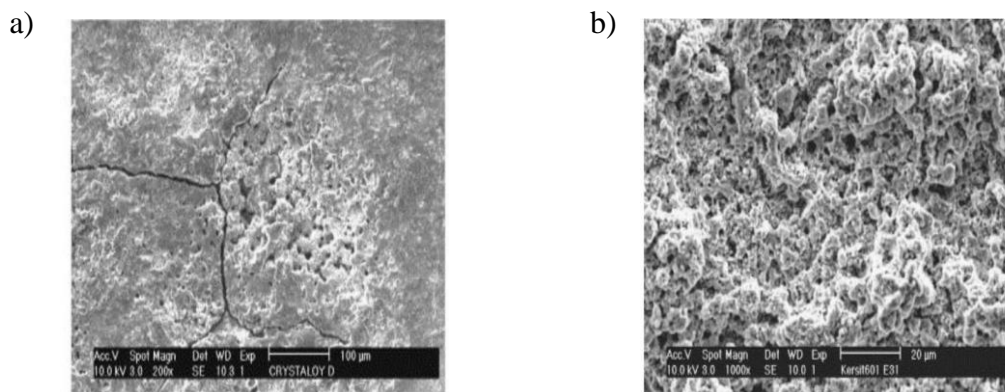
- **Sústruženie** – rýchle opotrebovanie nástoja vplyvom tvrdosti obrobku a vysokej teploty obrábania. Najvhodnejšie sa javí nástroj z polykrystalického diamantu *PKD* pri chladení tekutým dusíkom [44].
- **Frézovanie** – je možné získať dostatočne kvalitný povrch aj bez následného brúsenia. Pri obrábaní drážok je nutné použiť nástroj s vysokou tuhosťou, pretože dochádza ku výraznému nárastu normálovej sily a tiež odchýlky nástroja v radiálnom smere [44].
- **Brúsenie** – funkcia presného obrábania. Najvhodnejším nástrojom je brúsny kotúč z *PKD* s umelou živicom ako spojivom. Pri práci s takýmito kotúčmi vznikajú malé rezné sily, preto je opotrebovanie nástroja menšie a výsledný povrch dosahuje výbornú kvalitu a presnosť. Vzhľadom na nízku tepelnú vodivosť spojiva sa kumuluje teplo hlavne v obrobku. Táto nevýhoda sa dá odstrániť keramickým spojivom, ktoré vďaka svojej pórovitosti odvádza teplo lepšie. Obr. 3.2 zobrazuje porovnanie drsností povrchu pri použití živicového a keramického spojiva. Využitím živicového spojiva je možné získať lepšiu kvalitu povrchu, ale pri vyššom tepelnom zaťažení, než použitím keramického spojiva [44; 45].



Obr. 3.2 Vplyv spojiva brúsneho kotúča na drsnosť povrchu [45].

- **Rezanie laserom** – vplyvom vysokej pôsobiacej teploty laserový lúč mení vlastnosti keramiky a tým sa zvyšuje rýchlosť rezania a celková produktivita. Vysoká teplota na hraniciach zŕn spôsobuje mäknutie sklovitej fázy, čo znižuje pevnosť a krehkosť. Technológia je pomerne lacná. Nevýhodou je hrúbka rezaného materiálu, ktorá môže dosahovať len niekoľko milimetrov a taktiež trhliny vznikajúce na začiatku a konci rezania. Výrobky získané touto technológiou sa využívajú najmä v elektrotechnickom, leteckom, automobilovom priemysle [44].
- **Elektroerozívne obrábanie** – keramika je vysoko citlivá na nečistoty, praskliny a póry. Namáhaním v ťahu všetky tieto vady vedú k tvorbe trhliny, následnému šíreniu a neskoršiemu porušeniu materiálu. Pri *EDM* obrábaní keramiky je nutné vynaložiť vyššiu energiu na odstránenie materiálu. Vodivá plocha je v keramike rozptýlená a nie je rovnomerne rozložená ako u kovov. Pri vzniku plazmového kanála sa narušuje pevnosť dielektrika a materiál sa odparuje. Okrem odparovania a tavenia keramiky, dochádza vplyvom prudkých teplotných gradientov aj k odlupovaniu materiálu, čo má za následok vyššiu hodnotu drsnosti. Na povrchu sa môže vyskytovať niekoľko vád a to vo forme mikrotrhlín a trhlín (obr. 3.3a), ktoré majú tendenciu šíriť sa naprieč materiálom. Pri *WEDM*

rezaní sa vytvára akoby penová pórovitá mikroštruktúra (obr. 3.3b), ktorá vzniká vplyvom oxidácie, respektíve rozkladu keramiky, za vzniku plynov [46; 47].



a) mikrotrhliny na povrchu b) pórovitá mikroštruktúra
Obr. 3.3 Vady vznikajúce na obrobenom povrchu po elektroerózii [46].

Vážnym problémom je časté pretrhovanie drôtu počas rezania. Obvykle to býva spôsobené veľkou vybíjacou energiou a nízkou rýchlosťou odvíjania drôtu, kedy dochádza ku vysokému tepelnému toku na jednotkovú dĺžku drôtu. Pri tejto technológii je dôležitá optimalizácia parametrov. Po predĺžení doby trvania výboja sa nástroj výrazne opotrebuje, rez je širší a rýchlosť rezania klesá. Celý proces rezania sa dá vylepšiť okrem iných parametrov hlavne intenzívnejším výplachom, odvíjaním drôtu, znížením času trvania výboja. Celkovo je elektroerozívne obrábanie keramiky veľmi zdĺhavý proces v porovnaní s kovmi [37; 38].

3.2 Keramika na báze SiC

SiC je najrozšírenejšia neoxidická keramika. Vyskytuje sa v dvoch kryštalických formách a to sú kubická β fáza, ktorá vzniká v rozmedzí teplôt 1400–1800 °C a hexagonálna α fáza, ktorá je vytvorená pri teplote nad 2000 °C. Základom výroby je kremičitý piesok vysokej čistoty (99,5 hm. % SiO_2), ktorý je zmiešaný s koksom. Pri pôsobení vysokej teploty asi 2200 °C dochádza ku reakcii koksu s SiO_2 za vzniku *SiC* a *CO*. Reakcia prebieha aj niekoľko dní. Podľa zafarbenia *SiC* je možné určiť jeho čistotu. Svetlo zelená farba znázorňuje 99,8 % čistotu, tmavo zelená 99 % a čierna 98 % [48].

Mikroštruktúra závisí na podmienkach výroby a ovplyvňuje aj celkové vlastnosti materiálu. Odolnosť voči oteru je výrazne závislá na veľkosti zrna a na množstve a rozmeroch vzniknutých pórov. Vplyv na výskyt korózie má štruktúra zŕn a ich hranice. Už iba malý rozdiel v teplote spekania ovplyvní veľkosť zŕn a výsledné chovanie materiálu [48].

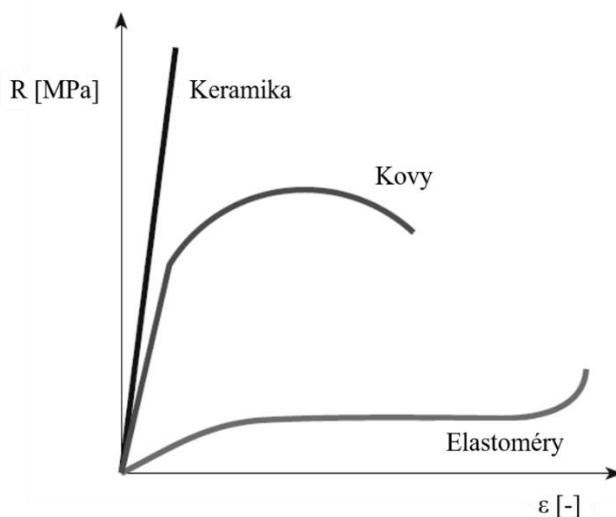
3.2.1 Vlastnosti SiC keramiky

Vo všeobecnosti vlastnosti keramiky závisia na ich zložení, veľkosti zŕn, spôsobe spracovania, čistote a podobne.

- **Tepelné vlastnosti** – *SiC* keramika je charakteristická nízkou tepelnou rozťažnosťou a vysokou tepelnou vodivosťou. Dobrá tepelná vodivosť je výsledkom malej hmotnosti základných atómov, ktoré sa vplyvom pôsobenia teploty ľahko rozkmitajú. Tepelná rozťažnosť rastie lineárne so zvyšujúcou sa teplotou a jej hodnota je v rozmedzí teplôt 20–1000 °C rovná $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Tepelná vodivosť a rozťažnosť vedú k tvorbe vnútorného napätia, čo môže spôsobiť tepelnú únavu. Nezvláda teplotné šoky vo forme

rapídneho ochladzovania. Ochladzovaním je vyvolané na povrchu ťahové napätie, ktoré podmieňuje vznik a šírenie trhlín na povrchu [41; 48; 42; 49].

- **Elektrické vlastnosti** – *SiC* materiály s vysokou čistotou sa radia medzi izolanty. Podľa hodnoty merného elektrického odporu sa využíva aj na výrobu rezistorov. Všetky jeho aplikácie závisia na množstve nečistôt v štruktúre, preto sa aj podľa toho častejšie považuje za polovodivý materiál [41; 48; 42; 49].
- **Chemické vlastnosti** – výborná chemická stabilita predurčuje využitie *SiC* keramiky v náročných podmienkach. Odolnosť voči korózii sa vzťahuje aj na *HCl* a koncentrovaný roztok *NaOH*. Reakcia vzniká pri kontakte s chlóróm pri teplote 900 °C a výparmi síry pri 1000 °C. K oxidácii na vzduchu dochádza pri dosiahnutí 850 °C, kedy sa začne vytvárať oxidický film [41; 48; 42; 49].
- **Tvrdosť** – tvrdosť je obzvlášť výrazná pri tomto type materiálu. Jej hodnota je nižšia len v porovnaní s kubickým nitridom bóru *CBN*, nitridom bóru *BN* a diamantom [49].
- **Mechanické vlastnosti** – keramika sa radí medzi krehké materiály. Vyznačuje sa nízkou elasticitou a húževnatosťou. Na obr. 3.4 je možné vidieť porovnanie zmluvných ťahových diagramov najčastejšie používaných technických materiálov, kde je zjavné, že keramika disponuje nevýraznou oblasťou plastickej deformácie. V porovnaní s kovmi má vysokú pevnosť za vysokých teplôt. Nezvláda teplotné šoky vo forme rapídneho ochladzovania. Ochladzovaním je vyvolané na povrchu ťahové napätie, ktoré podmieňuje vznik a šírenie trhlín na povrchu [48; 49; 50].



Obr. 3.4 Zmluvný ťahový diagram základných technických materiálov [48].

Tab. 3.1 Vybrané fyzikálne a mechanické vlastnosti materiálov na báze *SiC* [50].

Typ materiálu	Štruktúrne fázy	Hustota [g·cm ⁻³]	Youngov modul [GPa]	Tepelná vodivosť pri 20°C [W·mK ⁻¹]	Pevnosť v ohybe pri 20°C [MPa]
EKasic C	SiC, jemné zrno	3,1–3,15	410–420	125	400–500
EKasic F	SiC, hrubé zrno	3,15	410	110	400–430
EKasic G	SiC, grafit	3,0	410	110	250–300
SiSiC	SiC, Si	3,05–3,15	400	60	350

4 ELEKTROEROZÍVNE DRÔTOVÉ REZANIE SiSiC KERAMIKY

Elektroerozívne drôtové rezanie, ďalej už len *WEDM*, nepatrí medzi novinky vo svete obrábania. Rezanie kovov takouto metódou je bežnou súčasťou strojárkej výroby aj v malých podnikoch. Jej využitie pri obrábaní technickej keramiky je zatiaľ len okrajovou záležitosťou. Nie všetky druhy technickej keramiky sú rovnako vhodné na túto technológiu. Hlavným faktorom, ktorý určuje využitie tejto technológie je vodivosť daného materiálu. Samotná *SiC* keramika svojimi elektrickými vlastnosťami pre *WEDM* rezanie nepostačuje a jeho rezanie je veľmi náročné. Pridaním kremíka do základu sa zníži elektrický odpor materiálu. Táto kapitola sa zaoberá analýzou jednotlivých parametrov stroja nastavených pri *WEDM* obrábaní *SiSiC* keramiky, ich experimentálnym overením a následnom vplyve na rezný proces a kvalitu povrchu.

4.1 Popis materiálu experimentu

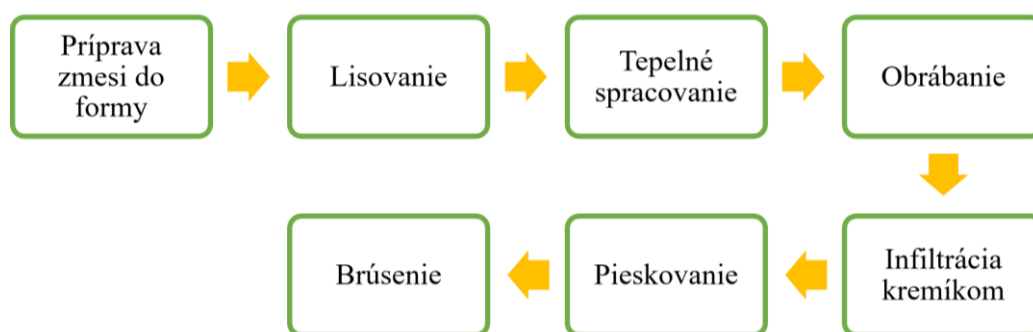
Materiál experimentu bol zvolený na základe ďalšieho obchodného využitia firmy *PENTA TRADING*. Okrem toho musela byť uvažovaná jeho cena a aj reálna schopnosť obrobenia technológiou *WEDM*. Po analýze všetkých faktorov bol na experimentálne účely vybraný materiál *SiSiC*. Ide o kremíkom infiltrovaný *SiC*. Pri výrobe je štruktúra *SiC* obohatená o *Si*, tak, že sa ním vyplnia póry základného materiálu. K tomuto dochádza pri infiltračnom vypálení. Vylúčením sekundárneho *SiC* sa zlepšia mechanické vlastnosti materiálu. Pri výpale sa objavuje len veľmi malé zmrštenie a vďaka tomu je táto keramika vhodná na výrobu veľkých súčastí. Medzi hlavné smery využitia patria ventily, tesniace krúžky, dýzy, trecie ložiská, komponenty do horákov.

Materiál bol dodaný vo forme hotového výrobku a to tesniaceho krúžku, znázorneného na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Tesniaci krúžok vyrobený z *SiSiC* keramiky.

Technická keramika sa vyrába priamo do požadovaného tvaru následným postupom zobrazeným na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Postup výroby SiSiC keramiky [51].

Obchodný názov materiálu bol *ROCAR SIG* [52]. V rámci udržania firemného tajomstva nebol dodaný materiálový list o presnom zložení keramiky. Základné vybrané mechanické a fyzikálne vlastnosti sú k dispozícii v tab. 4.1, zvyšné údaje sú uvedené v prílohe č. 1.

Tab. 4.1 Vybrané vlastnosti použitého materiálu [52].

Materiál	Merná hustota	Youngov modul pružnosti	Pevnosť v tlaku	Tepelná vodivosť pri 20–100°C	Koeficient lineárnej tepelnej rozťažnosti 20–1000 °C	Merný odpor pri 20 °C
Jednotky	g·cm ³	GPa	MPa	W·mK ⁻¹	10 ⁻⁶ K ⁻¹	Ω·cm
ROCAR SIG (SiSiC)	3,07	380	2000	115	4,9	< 1

4.2 Použitý stroj a parametre

Na prácu s materiálom bola využitá 5-osá drôtová rezačka od firmy *MAKINO* model *EU64* je viditeľný na obr. 4.3. Jeho veľkostné parametre sú dostupné v prílohe č. 2. Stroj je vybavený *CNC* riadením s možnosťou samonavliekania drôtu. Ako dielektrikum bola použitá deionizovaná voda. Experiment bol založený na postupnom menení piatich parametrov procesu rezania na stroji, ku ktorým patrili doba impulzu (T_{on}), doba pauzy (T_{off}), napätie výboja (U), prúd výboja (I), rýchlosť odvíjania drôtu (v).

Obr. 4.3 Drôtová rezačka *MAKINO EU64*.

Doba impulzu T_{on} [μs]

Zvyšovaním času nabíjania rastie rezná rýchlosť, ale aj opotrebovanie elektródy a drsnosť povrchu.

Doba pauzy T_{off} [μs]

Ide o dobu potrebnú na reionizáciu dielektrika, kedy materiál tuhne a vyplavuje sa von z iskrovej medzery. Zvýšením tohto času sa predĺži doba obrábania, ale celý proces je stabilnejší.

Napätie výboja U [V]

Reguluje intenzitu iskrového výboja a tak ovplyvňuje šírku iskrovej medzery. Uplatňuje sa, čím nižšie napätie výboja, tým je užšia iskrová medzera.

Prúd výboja I [A]

Vzrastajúcim prúdom výboja sa zhoršuje kvalita povrchu v dôsledku zvýšenej rýchlosti nárazu iskry na povrch.

Rýchlosť odvíjania drôtu v [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]

Čím je vyššia rýchlosť odvíjania drôtu, tým klesá pravdepodobnosť jeho pretrhnutia, no zvyšujú sa náklady na obrábanie.

Ďalším podstatným parametrom je tlak výplachu dielektrika, ale v tejto práci nie je sledovaný jeho vplyv. Vyšší tlak výplachu zabezpečuje vyššiu rýchlosť obrábania.

4.3 Prvotné testy materiálu

Z kapacitných dôvodov bolo nutné vykonávať prvotné testy na inej drôtovej rezačke a to *FANUC α -C600iB* so štandardnými parametrami uvedenými v prílohe č. 3, vo firme *PENTA TRADING*. Ide o moderný 5-osí stroj s *CNC* riadením a automatickým navliekaním drôtu. Ako dielektrická kvapalina bola použitá deionizovaná voda. Na základné delenie materiálu bol zvolený mosadzný drôt *PENTA CUT P*, ktorý obsahuje 37 % *Zn* a 63 % *Cu*. Drôt sa zaraďuje medzi ekonomické varianty spomedzi dostupných elektród na trhu a jeho zvolenie bolo podmienené snahou rezať materiál s najnižšími možnými nákladmi technológiou *WEDM*. Cieľom bolo čo najviac simulovať reálne využitie, preto bol vybraný priemer drôtu 0,25 mm s pevnosťou $1000 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$.



Obr. 4.4 Stroj FANUC α -C600iB [53].

Drôtové rezačky FANUC majú parametre bezrozmerné, vyjadrené ako pomerné veličiny a rozsahy hodnôt závisia na zvolenej technológii.

4.3.1 Postup pri rezaní

Návrh parametrov

Na základe teoretických znalostí bolo nutné navrhnuť počiatočné procesné parametre. Pri rezaní materiálu s vysokou teplotou topenia je nutné zabezpečiť vysokú energiu výboja, aby bola elektroerózia vôbec možná. WEDM rezačky obsahujú databázu bežne obrábaných materiálov, kde sú už vopred stanovené odporúčané parametre. Keďže keramika nepatrí medzi bežné materiály obrábané WEDM technológiou, bolo potrebné vybrať materiál s vlastnosťami, ktoré sa najviac približujú SiSiC keramike. Z daného zoznamu vyhovoval WC-Co.

Menené parametre na stroji FANUC α -C600iB sa mierne líšia od parametrov nastavených na stroji MAKINO EU 64 a to nie len svojim označením, ale aj podstatou. K týmto parametrom patrili doba impulzu (ON), doba pauzy (OFF), servo napätie (SV), tlak výplachu (FR). Doba impulzu (ON) je totožná s označením T_{on} . To isté platí pre dobu pauzy (OFF) so skratkou T_{off} .

Servo napätie (SV)

Servo mechanizmus je vybavený kontrolným systémom, ktorý zisťuje napätie v iskrovej medzere počas obrábania a pohybuje stolom, aby bolo možné získať najvýhodnejšiu šírku rezu. Jeho znížením sa elektróda dostane čo najbližšie k obrobku.

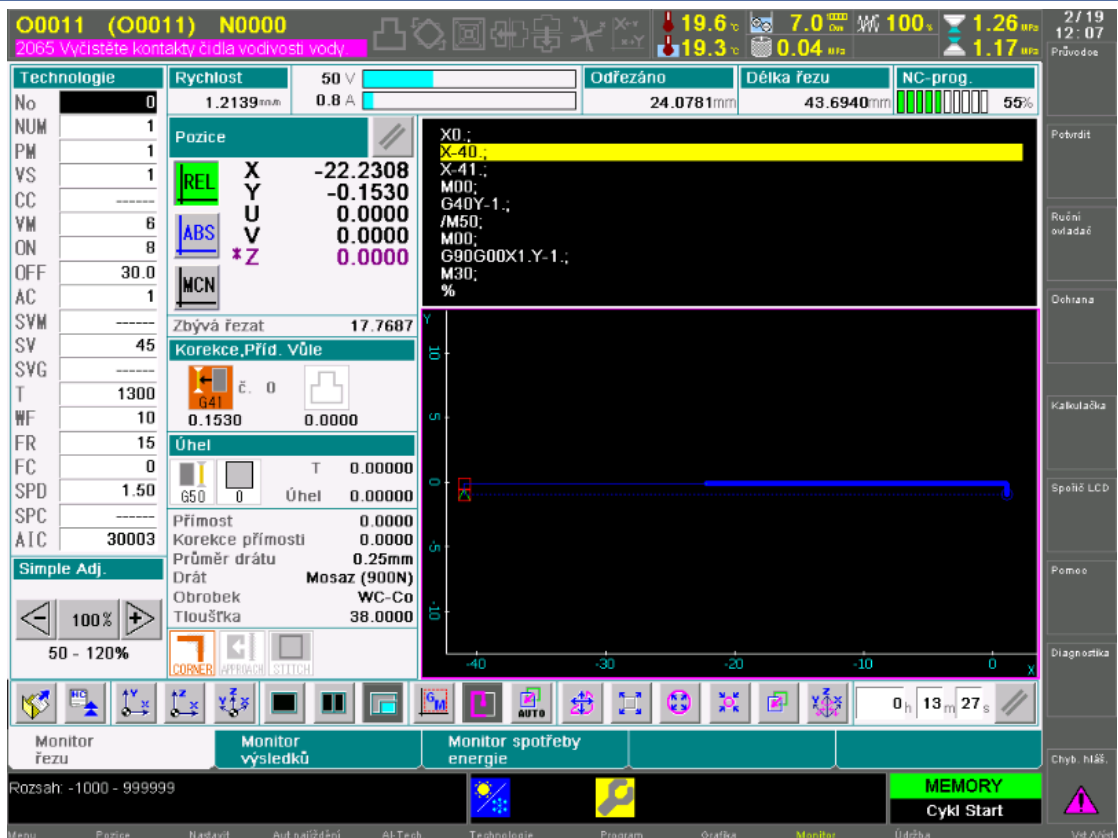
Tlak výplachu (FR)

Úlohou výplachových trysok je odstraňovať odobraté častice materiálu zo štrbiny a chladit' miesto rezu. Reguláciou tlaku výplachu je možné získať veľmi stabilné obrábanie hlavne u materiálov s nízkou vodivosťou. Zvýšením tohto parametru rastie rezná rýchlosť, ale pri veľmi vysokom výplachu je problém s upnutím dielu, životnosťou plastovej ochrany dýzy a filtráciou dielektrika.

Vďaka nízkej elektrickej vodivosti materiálu bolo nutné zabezpečiť čo najdlhšiu dobu pauzy T_{off} , aby miesto rezu neobsahovalo tuhé častice. Počiatočné parametre boli zvolené ako OFF = 30, ON = 8, SV = 45, FR = 15.

Tvorba programu

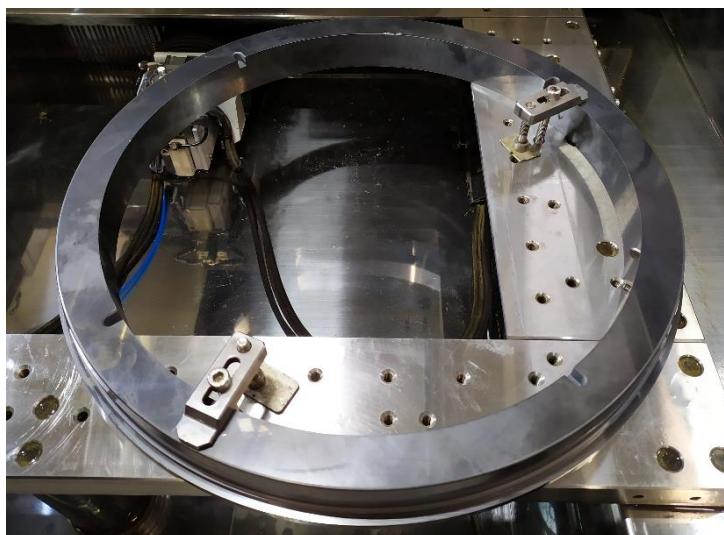
Vytvorenie programu pozostávalo z niekoľkých úkonov, pretože išlo o jednoduchú kontúru na jeden hlavný rez, bolo možné použiť grafické programovanie v softvéri FANUC ROBOCUT CAMi, z ktorého bol vytvorený program a následne exportovaný do ovládacieho panelu stroja (obr. 4.5.). Základom bolo zvoliť správny rozsah parametrov z databázy stroja.



Obr. 4.5 Riadiaci panel stroja.

Upnutie a polohovanie dielu

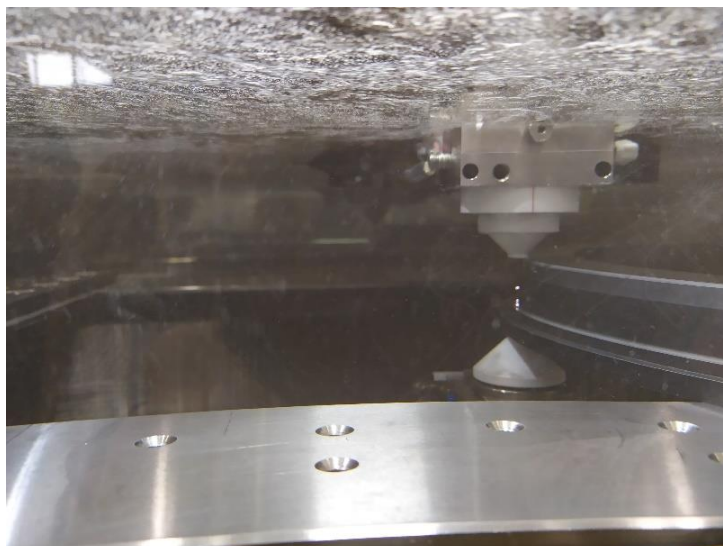
Upnutie dielu pomocou upínok, podložiek a skrutiek je možné vidieť na obr. 4.6. Nasledovalo jeho vyrovnanie páčkovým úchylkomerom upevneným priamo na stroji a určenie súradného systému dielu, pre ustavenie správnej polohy drôtu pred začiatkom rezania.



Obr. 4.6 Upnutie obrobku.

Rezanie

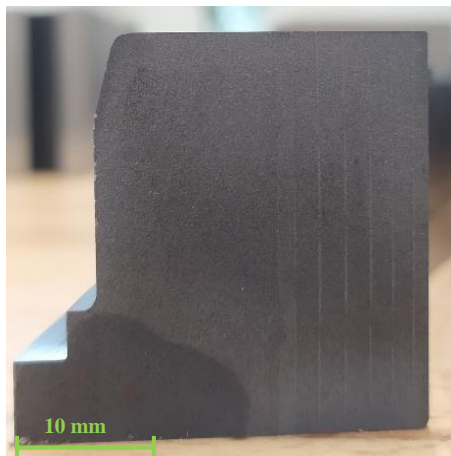
Zvolená technológia nepostačovala. Drôt sa pri prvom dotyku okamžite pretrhol a parametre procesu sa museli zmeniť. Farba dielektrika bola takmer čiara, na rozdiel od obrábania ocele alebo iných kovov, takže bolo možné sledovať samotné vyiskrovanie (obr. 4.7).



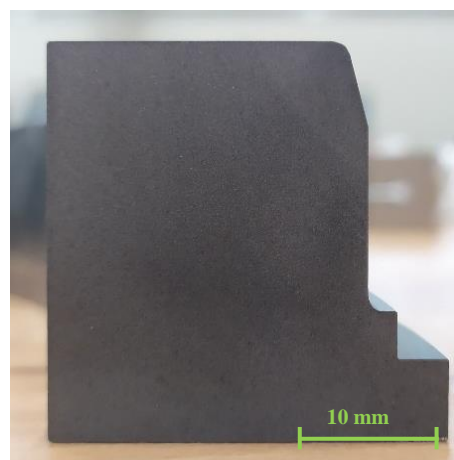
Obr. 4.7 Proces rezania.

Napriek zmenám parametrov bolo rezanie niekoľkokrát prerušené. Parametre boli priamo na ovládacom paneli menené, vzhľadom na veľkosť rezaného materiálu, až kým sa nedosiahol stabilný proces rezania. Po prvom pokuse rezania bolo zreteľne na obrobku vidieť veľké množstvo rýh, ktoré vznikli následkom rady skratov vedúcich ku pretrhnutiam drôtu. Plocha rezu po nestabilnom procese je zobrazená na obr. 4.8a, kedy sa drôt pretrhol minimálne desaťkrát. Na obr. 4.8b sa nachádza plocha rezu po zadaní vhodných parametrov. Drôt bol v tomto prípade pretrhnutý len jedenkrát.

a)



b)



Obr. 4.8 Kvalita povrchu pred a po zvolení správnych parametrov.

Pri ďalších testoch boli rezané plátky $20 \times 15 \times 3$ mm z dôvodu úspory času. Príčinou častého pretrhnutia drôtu boli nečistoty v materiáli, ktoré spôsobovali skrat. Zvýšením tlaku výplachu bolo rezanie stabilizované. Z tab. 4.2 je možné vidieť opakované rezanie pri rovnakých parametroch. Rez bol vysoko ovplyvnený nečistotou v materiáli a pravidelne dochádzalo ku skratu. Pred narazením na nečistotu bol prechod drôtu materiálom plynulý pri pomerne vysokej rýchlosti rezania. Na obr. 4.9 sú zjavné trhliny, ktoré vznikli na obrobenej ploche. Preto bolo nutné zvolenú technológiu zopakovať. Rezanie bolo stabilné, rýchlosť rezania najvyššia a teda, celkový čas obrábania najnižší. Preto je možno z tohto uvážiť, že napriek vhodne zvoleným parametrom, rezanie nemusí byť úspešné, ak materiál nemá dostatočne vysokú čistotu, prípadne ak sa v ňom nachádzajú veľké nevodivé častice.



Obr. 4.9 Trhliny vzniknuté na obrobenej ploche.

Tab. 4.2 Hodnoty parametrov pri testovacom rezaní.

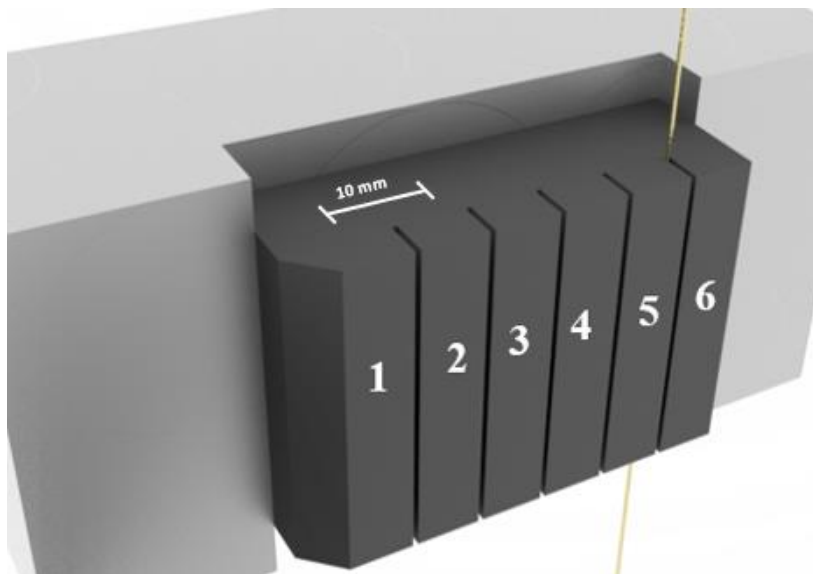
Č. rezania	Parameter						
	ON [-]	OFF [-]	SV [-]	FR [-]	Max. okamžitá rýchlosť [mm·min ⁻¹]	Doba rezania [min]	Počet pretrhnutí drôtu B [-]
1	11	30	42	15	4,0	5,7	1
2	12	28	41	15	4,8	5,4	6
3	11	29	42	16	5	5,3	0
4	12	28	41	16	5,7	5,8	7
5	12	28	41	16	5,7	5,2	0

4.4 Príprava vzoriek pre elektrónový mikroskop a voľba drôtu

Rezanie vzoriek bolo z kapacitných dôvodov vykonané na drôtovej rezačke *MAKINO EU 64*, ktorá je opísaná v časti 4.2. Vzorky boli rezané drôtom *PENTA CUT G* o priemere 0,25 mm a zložením 40 % Zn, 60 % Cu s pevnosťou 1000 N·mm⁻². Ide o drôt o niečo vyššej triedy než je už spomínaný *PENTA CUT P*. Tento typ drôtu bol zvolený na základe poznatku, že konkrétnu *SiSiC* keramiku je možné rezať mosadzným drôtom a jeho cena je stále prípustná v porovnaní s povlakovanými drôtmí. Vyšší obsah zinku zabezpečuje dosiahnutie vyššej rýchlosti obrábania. Využitie drahých povlakovaných drôtov nemá z ekonomického hľadiska význam, pretože už v časti 4.3 bolo zreteľne dokázané, že aj sedemnásobne lacnejším drôtom je možné rezať tento materiál. Experiment bol zložený zo systematicky meniacich sa procesných parametrov. Základom je doštička o určených maximálnych rozmeroch, rozdelená zárezmi na niekoľko vzoriek s dĺžkou 7 mm. Na jednej doštičke bolo možné vytvoriť 6 vzoriek, ako je znázornené na obr. 4.10. Každá vzorka bola obrobená za iných podmienok.

Návrh parametrov

Pri rezaní vzoriek bolo jednoduchšie určiť jednotlivé parametre, než pri prvotných testoch. Opäť bola zvolená technológia z databázy stroja. Za pomoci vysoko kvalifikovanej obsluhy boli navrhnuté 3 levely nastavenia jednotlivých parametrov (tab. 4.3). Ako už bolo počas prvotného testu rezania overené, návrh veľkosti parametrov je experimentálna záležitosť a nie je možné zaručiť na základe teoretických poznatkov ich vyhovujúcu veľkosť. Bolo možné ale predpokladať, že nastavením nízkej hodnoty T_{on} a vysokej hodnoty T_{off} je možné získať plynulý rez. Preto aj tieto parametre boli nastavené v nižšej (T_{on}) respektíve vyššej (T_{off}) hodnote, ako býva zvykom na tomto stroji pri bežne rezaných materiáloch.



Obr. 4.10 Schematické zobrazenie procesu rezania vzoriek.

Rezanie vzoriek

Po výbere technológie a tvorbe programu nasledovalo upnutie doštičky a jej vyrovnanie. Experiment bol vykonaný na osemnástich vzorkách, kde boli postupne menené už vyššie uvedené parametre T_{on} , T_{off} , v , U , I . Okrem toho bola zaznamenaná rezná rýchlosť drôtu v_c za daných podmienok, počet pretrhnutí drôtu B (*Breaking*), šírka rezu D . V tab. 4.3 sú zobrazené príslušné hodnoty parametrov, ktoré sa následne kombinovali. Cieľom bola optimalizácia procesu, čo znamená, získanie dobrej kvality povrchu za najkratší čas.

Tab. 4.3 Hodnoty parametrov, ktoré boli využité počas experimentu.

Parameter		T_{on} [μ s]	T_{off} [μ s]	v [$m \cdot min^{-1}$]	U [V]	I [A]
Level nastavenia	1	6	40	10	50	20
	2	8	50	12	60	25
	3	10	60	14	70	30

V tab. 4.4 sú uvedené hodnoty parametrov a niektorých získaných dát, ktoré boli použité pri rezaní osemnástich vzoriek rozdelených na tri doštičky (obr. 4.11). Opakovateľnosť nebola študovaná, teda sa jednotlivá kombinácia vyskytuje v tab. 4.4 iba jedenkrát.

Tab. 4.4 Menené parametre a získané dáta pri rezaní vzoriek.

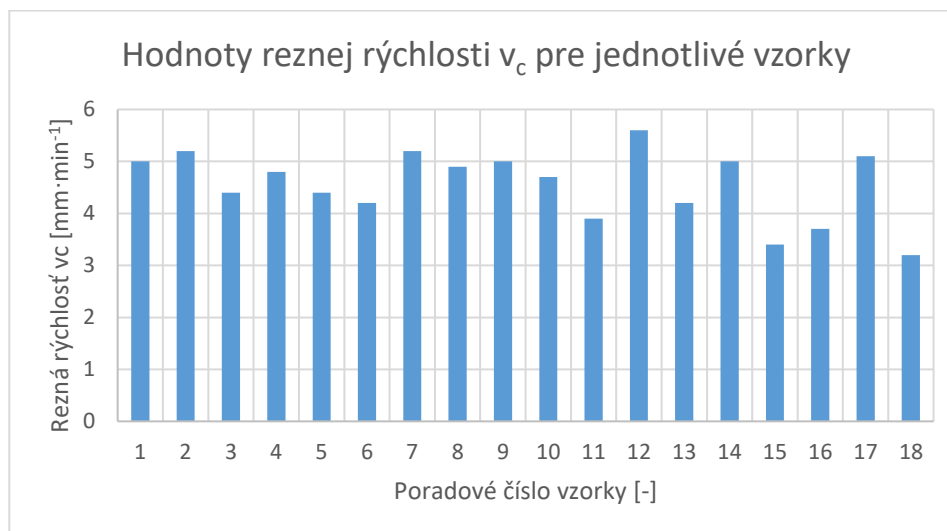
Číslo vzorku	Parameter					Dáta		
	T _{on} [μs]	T _{off} [μs]	v [m·min ⁻¹]	U [V]	I [A]	v _c [mm·min ⁻¹]	B [-]	D [μm]
1	8	50	12	70	25	5	1	337,89
2	8	40	12	60	25	5,2	3	337,89
3	8	50	12	60	20	4,4	0	324,37
4	10	50	12	60	25	4,8	1	338,07
5	8	50	12	50	25	4,4	1	332,37
6	8	60	12	60	25	4,2	0	329,65
7	8	50	12	60	30	5,2	3	323
8	8	50	10	60	25	4,9	2	340,8
9	8	50	14	60	25	5	1	333,91
10	6	40	10	50	30	4,7	3	327,02
11	10	60	10	70	20	3,9	1	347,28
12	10	40	10	70	30	5,6	3	352,68
13	6	60	10	70	30	4,2	1	363,7
14	10	60	14	70	30	5	0	360,88
15	6	60	14	70	20	3,4	0	339,33
16	6	40	14	50	20	3,7	1	335,02
17	10	40	14	70	20	5,1	2	340,6
18	6	60	10	50	20	3,2	0	335,18



Obr. 4.11 Vzorky SiSiC po WEDM rezaní.

Z vykonania predchádzajúcich testov, kde boli rezané dlhšie kontúry a väčšia výška materiálu, bolo možné usúdiť, že pretrhnutie drôtu nesúvisí iba s nevhodne nastavenými parametrami, ale aj s nečistotami nachádzajúcimi sa v mieste rezu. Vzhľadom na množstvo porušení drôtu vznikol predpoklad, že sa v mieste rezu nenachádzali veľké nečistoty a drôt pukal výlučne z voľby nevhodných parametrov. Každým pretrhnutím elektródy bol zvýšený celkový čas obrábania o 1 min a spotreba drôtu minimálne o 2 m. Viac informácií o vplyve jednotlivých parametrov na pretrhnutie drôtu je uvedené v časti 4.7.

WEDM technológia patrí medzi pomalšie metódy obrábania, ale rezanie SiSiC keramiky je samo o sebe zdĺhavý proces. Obr. 4.12 znázorňuje rezné rýchlosti obrábania jednotlivých vzoriek. Najvyššia dosiahnutá rezná rýchlosť mala hodnotu $5,6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, avšak sa tu vyskytli až 3 prerušenia drôtu. Najnižšia rezná rýchlosť bola dosiahnutá pri $3,2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ bez prasknutia elektródy.



Obr. 4.12 Rezná rýchlosť dosiahnutá pri rezaní vzoriek.

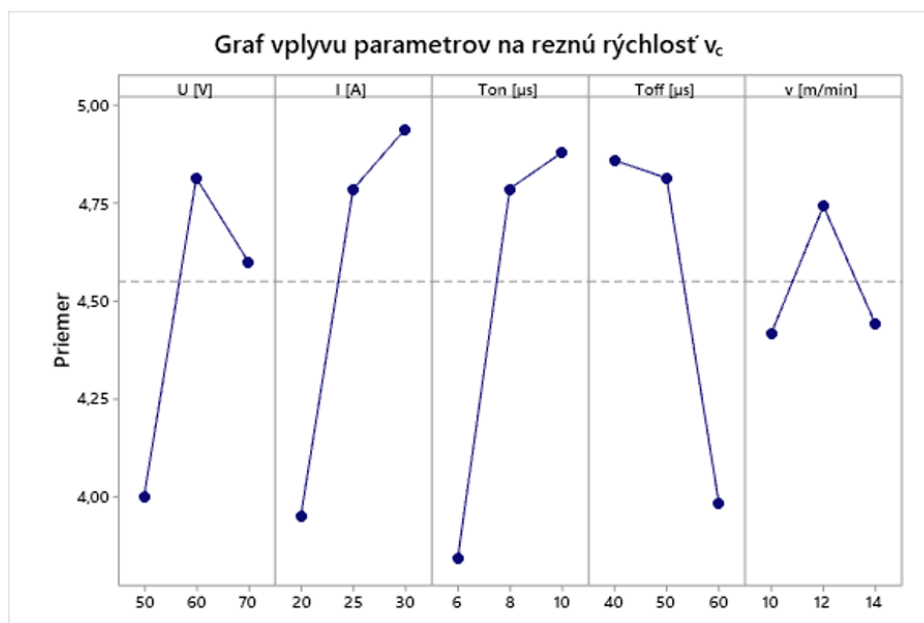
Pre zhodnotenie experimentu bola využitá metóda matematickej štatistiky ANOVA (*Analysis of Variance*) v programe *Minitab*. Pomocou nej bolo zistené, ktoré z jednotlivých procesných parametrov (faktorov) mali vplyv na výstupné veličiny WEDM rezania. Hladina významnosti bola stanovená ako $\alpha = 0,1$. Táto hodnota bola posúdená ako postačujúca. V prípade, že programom vyhodnotený parameter P bol menší ako 0,1, tak uvažovaný faktor bol významný na hladine významnosti α .

Tab. 4.5 ANOVA pre v_c [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]; $\alpha = 0,1$.

Faktor	Hodnota P
U [V]	0,149
I [A]	0,014
T_{on} [μs]	0,01
T_{off} [μs]	0,028
v [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	0,649

Z tab. 4.5 vyplýva, že štatisticky význam pre hodnotenie veličiny v_c majú parametre I , T_{on} a T_{off} , zatiaľ čo U a v sa javia ako štatisticky nevýznamné.

Závislosť rezných rýchlostí v_c na všetkých menených parametroch je uvedená na obr. 4. 13, kde boli hodnoty spracované v programe *Minitab* prostredníctvom grafu hlavných vplyvov (*Main effect plot*), ktoré graficky zobrazujú dosah procesných parametrov na veľkosť výstupných parametrov.

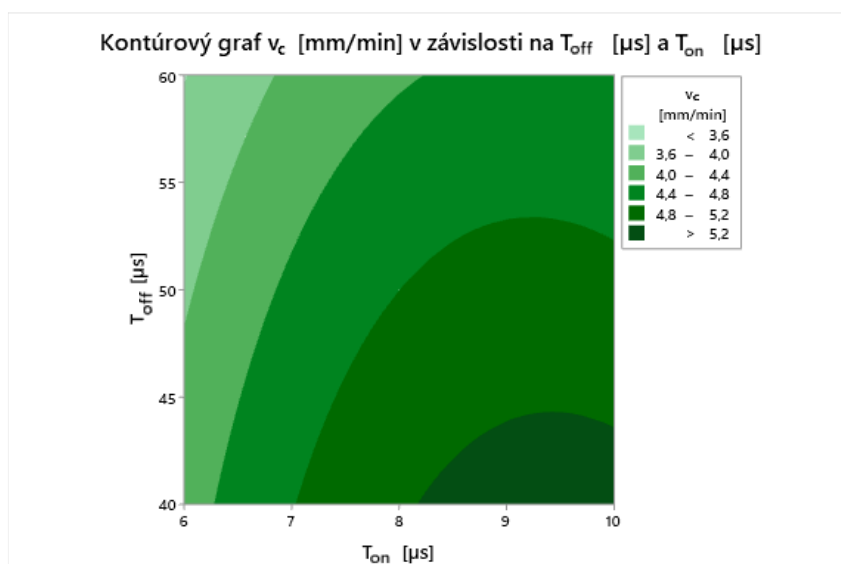


Obr. 4.13 Zmena rezných rýchlostí v závislosti na leveloch nastavených parametrov.

Vykreslenia udávajú, že prúd výboja I , doba impulzu T_{on} a doba pauzy T_{off} mali vplyv na reznú rýchlosť v_c . Pričom zvyšovanie prúdu a doby vypnutia malo za následok zrýchlenie rezného procesu. Prudký nárast v_c bol zaznamenaný pri prechode z minimálneho nastaveného levelu parametrov I a T_{on} na druhý level. Prechodom na maximálny level už zmena rezných rýchlostí nebola taká výrazná. Opačný prípad nastal pri dobe pauzy T_{off} , ktorého zvyšovanie malo negatívny vplyv na reznú rýchlosť. Dopad vzájomnej interakcie času nabíjania a vybíjania na reznú rýchlosť bol ďalej spracovaný regresnou analýzou v programe *Minitab*. Závislosť v_c na T_{on} a T_{off} je uvedená na obr. 4.14 a na základe zadaných parametrov je možné spočítať jej veľkosť vzťahom (4.1).

$$v_c = -3,62 + 1,91 \cdot T_{ON} + 0,032 \cdot T_{OFF} - 0,0921 \cdot T_{ON}^2 - 0,00041 \cdot T_{OFF}^2 - 0,003868 \cdot T_{ON} \cdot T_{OFF} \quad [mm \cdot min^{-1}] \quad (4.1)$$

Z obr. 4.14 bolo možné usúdiť, že kombináciou vysokej hodnoty T_{off} a nízkeho T_{on} sa rezný proces spomalí. Najnižšia rezná rýchlosť bola dosiahnutá pri vzorke č. 18, kde $v_c = 3,2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ práve pri nastavenom najnižšom leveli $T_{on} = 6 \mu\text{s}$ a najvyššom leveli $T_{off} = 60 \mu\text{s}$. Kontrastný prípad bol zaznamenaný pri veľkostiach parametrov $T_{on} = 10 \mu\text{s}$ a $T_{off} = 40 \mu\text{s}$ u vzorky č. 12 s najvyššou dosiahnutou reznou rýchlosťou $v_c = 5,6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Kontúrový graf z obr. 4.14 vyjadruje, že pre zrýchlenie rezného procesu nad $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ postačilo nastavenie parametru T_{on} na úroveň $8 \mu\text{s}$ pri udržaní veľkosti veličiny $T_{off} = 40 \mu\text{s}$.

Obr. 4.14 Závislosť v_c na parametroch T_{on} a T_{off} .

Pri požiadavke najvyššej reznej rýchlosti v_c , a teda minimálnej spotreby času na rezanie, bolo potrebné nastaviť parametre nasledovne podľa tab. 4.6. Tomu odpovedala vzorka č. 12, kde $B = 3$. Táto hodnota bola veľmi nepriaznivá a nespôsobila urýchlenie procesu rezania, ale jeho predĺženie. Preto stanovenie levelov na úroveň podľa tab. 4.6. nespôsobilo reálne zrýchlenie procesu rezania *SiSiC* keramiky daného výrobcu, ale spomalenie.

Tab. 4.6 Kombinácia veľkostí menených parametrov vedúcich k najvyššej v_c .

Parameter	T_{on} [μs]	T_{off} [μs]	I [A]	U [V]	v [m·min ⁻¹]
Hodnota	10	40	30	Nezáleží	Nezáleží
Level nastavenia	3	1	3		

4.5 Analýza drsnosti obrobeného povrchu

Skúmaný povrch bol výsledkom jediného hrubovacieho rezu. Na zvolenie vhodných parametrov pre ďalšie praktické využitie technológie u materiálu *SiSiC* je najdôležitejšia kvalita povrchu a šírka rezu. Z hľadiska topografie bolo sledovaných niekoľko parametrov drsnosti povrchu a to:

- stredná aritmetická odchýlka profilu R_a ,
- stredná kvadratická odchýlka profilu R_q ,
- najväčšia výška profilu R_z ,
- priemerná aritmetická odchýlka povrchu S_a ,
- priemerná kvadratická odchýlka povrchu S_q ,
- najväčšia výška (plošné rozšírenie parametru R_z) S_z .

Všetky tieto parametre boli určené pomocou profilometru *Bruker Dektak XT* (obr. 4.15).



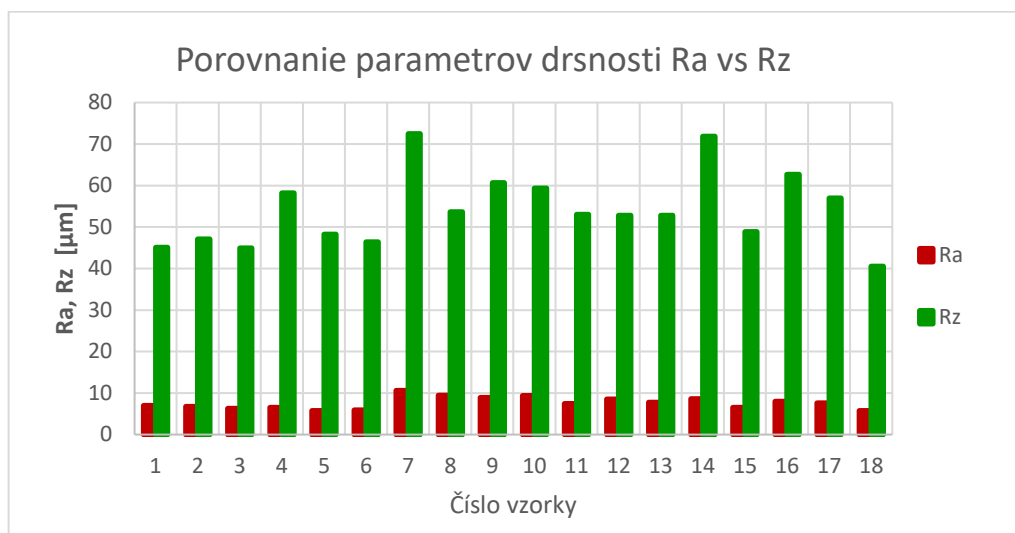
Obr. 4.15 Profilometer Bruker Dektak XT [54].

Zoznam nameraných hodnôt drsností pre jednotlivé vzorky sú dostupné v tab. 4.7 a grafické zobrazenie vybraných parametrov drsnosti (R_a , R_z) pre všetky vzorky experimentu sú uvedené na obr. 4.16.

Tab. 4.7 Hodnoty drsnosti vzoriek experimentu.

Číslo vzorky	Parameter drsnosti					
	R_a [μm]	R_q [μm]	R_z [μm]	S_a [μm]	S_q [μm]	S_z [μm]
1	7,006	8,631	45,101	7,002	8,614	47,002
2	6,764	8,632	47,112	6,045	7,648	47,578
3	6,292	7,997	44,928	6,024	7,649	44,591
4	6,556	8,691	58,18	6,548	8,681	60,068
5	5,736	7,498	48,281	5,595	7,317	48,551
6	5,878	7,59	46,366	5,849	7,568	48,779
7	10,639	13,315	72,502	8,742	10,856	64,843
8	9,422	11,535	53,621	7,326	9,147	51,237
9	8,894	10,976	60,636	8,756	10,795	59,533
10	9,411	11,781	59,345	7,693	9,661	60,31
11	7,461	9,364	53,014	7,456	9,353	54,717
12	8,508	10,532	52,826	8,365	10,399	54,291
13	7,795	9,634	52,827	7,738	9,507	53,951
14	8,642	11,26	71,86	8,333	10,818	76,34
15	6,532	8,365	48,847	6,401	8,25	51,269
16	8,027	10,275	62,671	6,651	9,055	64,372
17	7,601	9,608	56,932	7,417	9,41	60,972
18	5,791	7,392	40,553	5,797	7,391	44,42

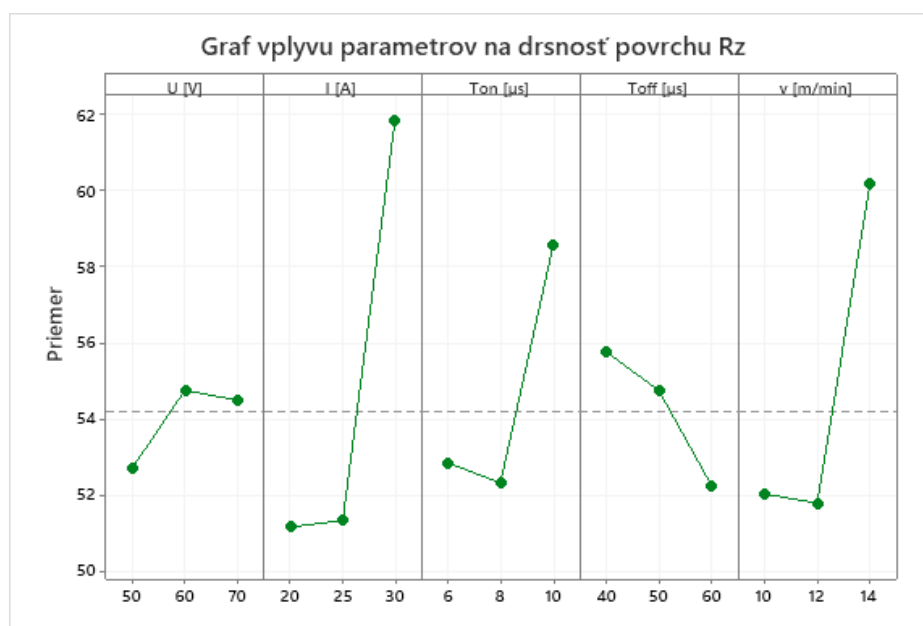
Parameter R_z je v porovnaní s R_a drsnosťou veľmi odlišný. Pri obrábaní býva zvykom, že hodnota R_z sa vyskytuje v okolí päťnásobku hodnoty drsnosti R_a . V prípade R_z , kedy sa jej veľkosť určuje vzdialenosťou maximálnej a minimálnej hodnoty na danej relatívnej dĺžke profilu, bolo možné, že najvyšší bod profilu tvorila roztavená a opäť stuhnutá častica materiálu, zatiaľ čo najnižší bod, vznikol pôsobením silného prúdu výboja.

Obr. 4.16 Rozdiely v hodnotách drsnosti R_a , R_z .Tab. 4.8 ANOVA pre R_z [μm]; $\alpha = 0,1$.

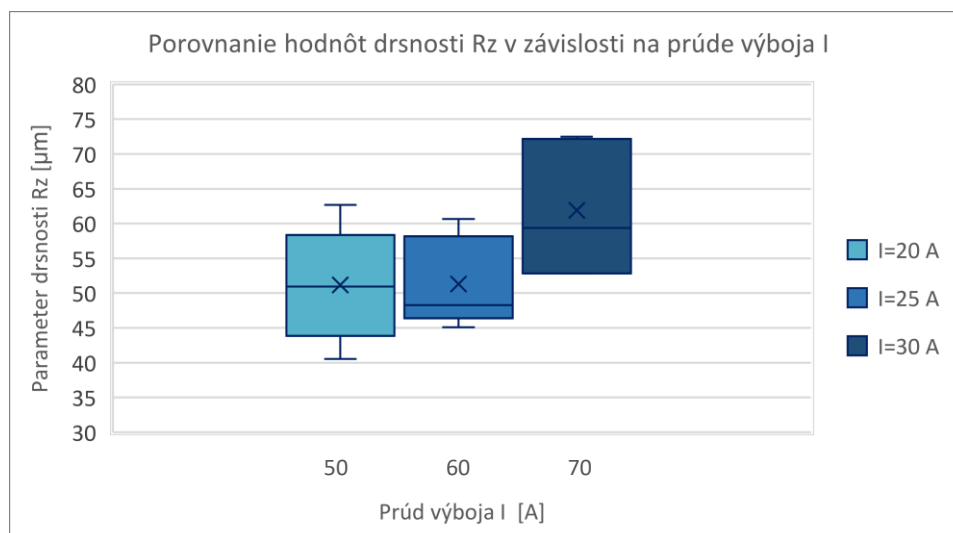
Faktor	Hodnota P
U [V]	0,937
I [A]	0,067
T_{on} [μs]	0,459
T_{off} [μs]	0,809
v [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	0,216

Tab. 4.8 uvádza, že jediným parametrom významným na danej hladine významnosti α je prúd výboja I .

Podľa obr. 4.17, kde sú znázornené vplyvy parametrov všetkých úrovní nastavenia na R_z , značný efekt na výslednú drsnosť povrchu R_z mal prúd výboja I . Za ním nasledovala doba pauzy T_{off} . Napätie výboja U , doba impulzu T_{on} a rýchlosť odvíjania drôtu v nevykazovali žiadnu závislosť.

Obr. 4.17 Zmena hodnoty drsnosti R_z v závislosti na leveloch nastavených parametrov.

Strmý nárast veľkosti parametru drsnosti R_z bol zaznamenaný pri prechode prúdu výboja z $I = 25$ A na $I = 30$ A. Jeho nastavením na $I = 30$ A bola dosahovaná najhoršia kvalita obrobenej plochy bez ohľadu na ostatné veličiny procesu. Zvyšujúcou sa veľkosťou I bol zaznamenaný aj nárast hĺbky vznikajúcich kráterov, ktorú tento parameter priamo zapríčinil. Obr. 4.18. zobrazuje krabicový graf hodnôt drsnosti R_z , ktorá vo väčšej miere odzrkadľuje nerovnosti povrchu spôsobené parametrom I , než je tomu u parametru drsnosti R_a . Zatiaľ čo pri hodnotách $I = 20$ A a $I = 25$ A bola veľkosť R_z v rozmedzí podobných hodnôt, pri $I = 30$ A už došlo k výraznému nárastu až na $R_z = 72,502$ μm , ktoré prislúchalo vzorke č. 7.



Obr. 4.18 Krabicový diagram rozloženia drsnosti R_z v závislosti na I .

Uvážením vplyvu jednotlivých menených veličín na stroji bolo možné určiť veľkosti ich nastavenia pre vyvarovanie sa nekvalitnému povrchu a naopak pre získanie najlepšej drsnosti. V tab. 4.9 sú uvedené hodnoty, ktoré vplývali negatívne na výslednú plochu. Tomu odpovedala opäť vzorka č. 12. Tu ale neboli zaznamenané také zlé výsledky ako pri vzorke č. 7, kde $I = 30$ A, $T_{\text{off}} = 50$ μs , $U = 60$ V, $T_{\text{on}} = 8$ μs , $v = 12$ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Z toho je možno usúdiť, že parameter I bol jediným podstatným z hľadiska riešenia daného problému, ako aj bolo uvedené z výsledkov metódy ANOVA.

Tab. 4.9 Príklad nevhodného nastavenia parametrov rezania SiSiC keramiky.

Parameter	T_{on} [μs]	T_{off} [μs]	I [A]	U [V]	v [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
Hodnota	10	40	30	50	10
Level nastavenia	3	1	3	1<	1

Pre dosiahnutie vyššej kvality povrchu bolo potrebné znížiť energiu výboja na prípadné minimum a predĺžiť dobu vypnutia T_{off} zabezpečujúcu potrebný výplach miesta rezu. Hodnoty takýchto parametrov sú uvedené v tab. 4.8. Tie splnila vzorka č. 18, pri ktorej aj bola zaznamenaná najnižšia drsnosť $R_z = 40,553$ μm .

Tab. 4.10 Hodnoty parametrov pre dosiahnutie čo najnižšej drsnosti.

Parameter	T_{on} [μs]	T_{off} [μs]	I [A]	U [V]	v [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
Hodnota	6	60	20	50	12
Level nastavenia	1	3	1	1	2

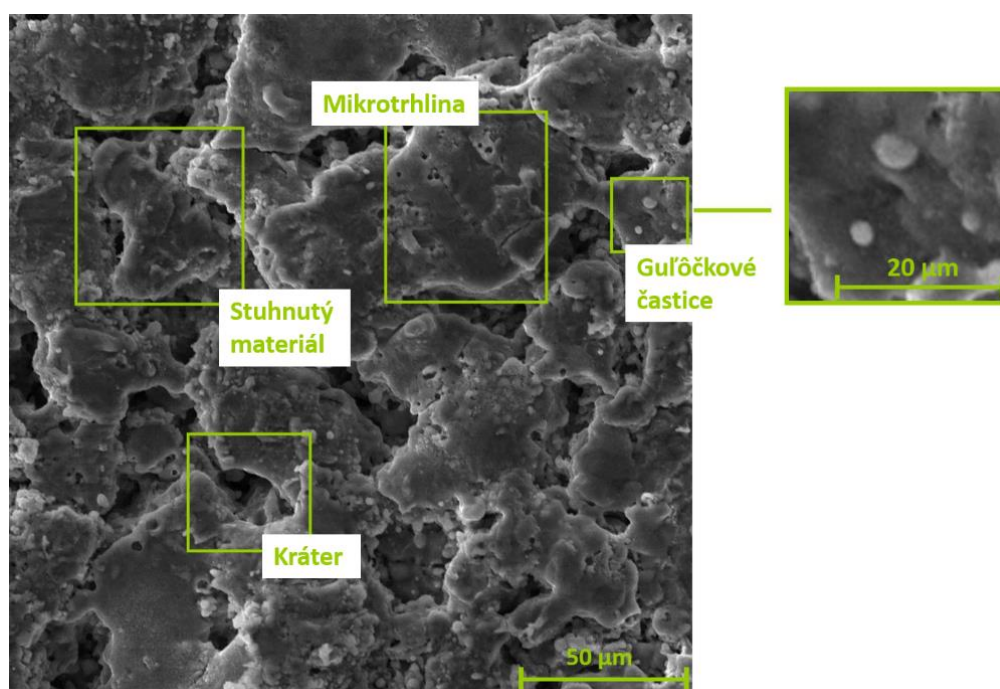
4.6 Analýza povrchu pomocou elektrónového mikroskopu

Obrobený povrch pri *WEDM* je výsledkom vybijacej energie, ktorá produkuje veľmi vysokú teplotu v mieste výboja, čo má za následok tavenie a odparenie časti materiálu. Konečný povrch tvorí množstvo kráterov, špecifických pre túto technológiu. Obrobená plocha sa skladá zo znovu stuhnutého materiálu, odobratých častíc v tvare plných guľčiek, kráterov a mikrotrhlín. Časť materiálu je cez dielektrikum odvedená von z rezu, no časť ostáva, následne tuhne a vytvára zhlučky zvyškov, ktoré vplyvajú na vyššie hodnoty drsnosti. Pre analýzu pôsobenia procesu elektroerózie na povrch rezaného materiálu boli vytvorené mikrosnímky na elektrónovom rastrovacom mikroskope (*SEM*) *LYRA3* od spoločnosti *TESCAN* (obr. 4.19). Úprava vzoriek pozostávala z čistenia na ultrazvukovej čističke. Mikrosnímky osemnástich vzoriek sú uvedené v prílohe č. 4.



Obr. 4.19 Elektrónový mikroskop použitý pri analýze povrchu [55].

Štúdium povrchov nebolo vykonávané na všetkých vzorkách. Boli vybrané len tie, ktorých analýza má význam z hľadiska riešenia daného problému. Náhľad na obrobenú plochu u vzorky č. 10, ktoré vykazovalo vysoké hodnoty drsnosti ($R_a = 9,411 \mu\text{m}$) je zobrazený na obr. 4.20.

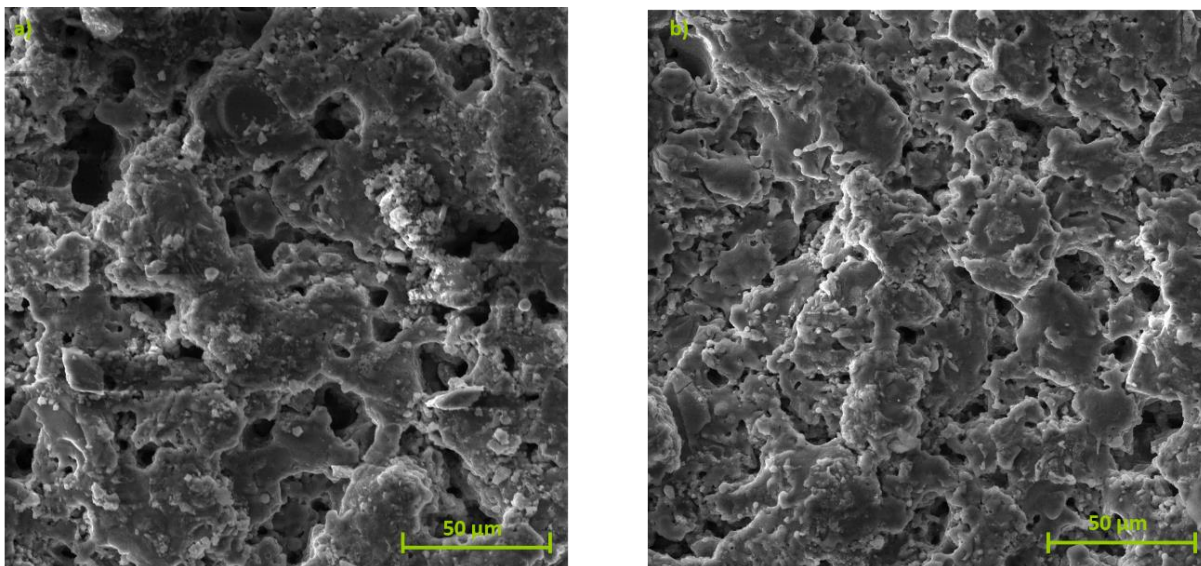


Obr. 4.20 Mikrosnímok vzorky č.10 s parametrami:
 $U = 50 \text{ V}$, $T_{\text{on}} = 6 \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 40 \mu\text{s}$, $v = 10 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $I = 30 \text{ A}$.

Vyznačené štvoruholníky zvyrazňujú jednotlivé prvky, tvoriace povrch po elektroerózii. Množstvo kráterov bolo potlačených nahromadeným materiálom, ktorý nestihol byť odplavený pri krátkej dobe pauzy ($T_{\text{off}} = 40 \mu\text{s}$), práve tento jav spôsobil vysoké hodnoty drsnosti. Zadané parametre predurčovali vznik nekvalitnej obrobenej plochy. Na obr. 4.20 je možné si všimnúť, že vplyvom elektroerózie bol dosiahnutý veľmi nerovnomerný povrch, kde roztavený a znovu stuhnutý materiál bol uložený v rôznych výškových hladinách. Voľbou nízkeho spínacieho času ($T_{\text{on}} = 6 \mu\text{s}$) boli vytvorené menej hlboké krátery.

Parameter prúd výboja I má za následok tvorbu ťahových napätí, ktoré spôsobujú mikrotrhliny na povrchu. Pri tejto vzorke bol určený na hodnote $I = 30 \text{ A}$, čo predstavovalo maximálny level pri danom experimente. Trhliny v keramike vytvárajú vážny problém, vďaka krehkosti tohto materiálu. Aj malá trhlinka sa môže stať takým koncentrátorom napätia, že dôjde k porušeniu funkčnosti súčasti. Na obr. 4.20 je zvyraznená nápadná mikrotrhlinka, ktorá tvorí iba zlomok z množstva defektov.

Veľký počet hlbokých kráterov je možné vidieť na obr. 4.21a, ktorý zobrazuje vzorku č. 14. Pri nej bola zaznamenaná najvyššia hodnota drsnosti $S_z = 76,34 \mu\text{m}$. V porovnaní s najnižším záznamom tohto parametru u vzorky č. 18 na obr. 4.21b, kde $S_z = 44,42 \mu\text{m}$. Došlo tu k vyše 40 % nárastu veľkosti. Hlboké krátery vznikli kombináciou vysokého prúdu výboja s vysokým spínacím časom. Napriek nepriaznivým hodnotám týchto parametrov nedošlo k prasknutiu drôtu aj pri výskyte vysokej reznej rýchlosti $v_c = 5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, teda je možno povedať, že táto kombinácia parametrov vedie k najrýchlejšiemu rezaniu pri získaní pomerne dobrej drsnosti R_a .



Obr. 4.21 Obrobené povrchy vzoriek č. 14 a 18 s procesnými parametrami:
 a) vzorka č. 14: $U = 70 \text{ V}$, $T_{\text{on}} = 10 \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 60 \mu\text{s}$, $v = 14 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $I = 30 \text{ A}$,
 b) vzorka č. 18: $U = 50 \text{ V}$, $T_{\text{on}} = 6 \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 60 \mu\text{s}$, $v = 10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $I = 20 \text{ A}$.

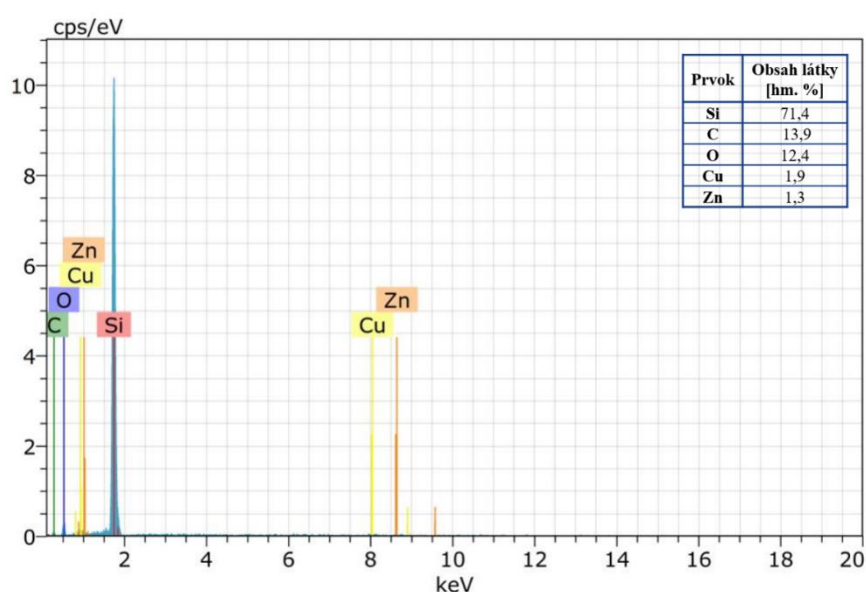
Maximálna rýchlosť odvíjania drôtu $v = 14 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pri rezaní vzorky č. 14 mala podstatný vplyv na nepretržitosť obrábania. Pôsobenie vysokej energie výboja na drôt bolo znížené, čo znamenalo pokles jeho namáhania vplyvom tepelných procesov. Hlboké krátery nepredstavujú ideálny stav obrobenej plochy z hľadiska kumulovania ťahových napätí.

Rozdiely vo veľkosti a množstve kráterov medzi znázornenými vzorkami (obr. 4.21) sú značné. Povrch vzorky č. 18 je viditeľne celistvejší než vzorky č. 14, nenachádzajú sa na ňom žiadne výrazné poruchy. Keďže pri hrubovaní dochádza k odoberaniu väčšieho objemu materiálu, je dôležité, aby v_c bola čo najvyššia a rez čo najplynulejší. Preto pokles rýchlosti rezania o približne 36 % pri vzorke č. 18 za vzniku vyššej kvality povrchu predurčoval kombináciu týchto parametrov skôr pre následnú dokončovaciu operáciu ako hrubé rezanie.

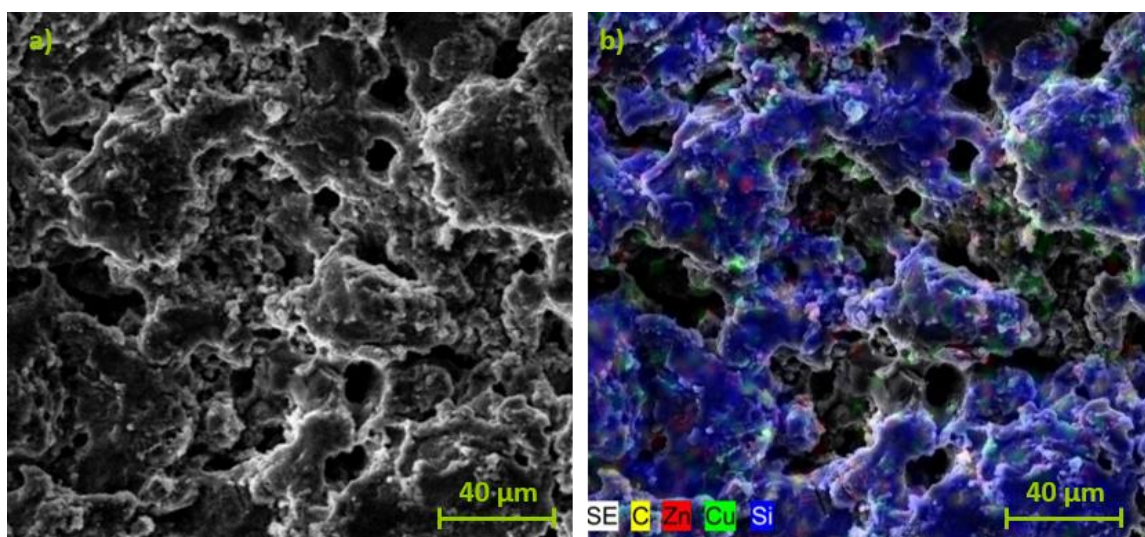
4.6.1 EDX analýza obrobeného povrchu

Pri *WEDM* rezaní sa v mieste rezu objavuje teplota aj 20 000 K, to podmieňuje výskyt difúzie. Na povrchu obrobku sa ukladajú častice kovov vylúčených z elektródy. Vplyvom vysokej teploty sa časti elektródy tavia, odparujú a pomocou dielektrika časť z nich opäť stuhne, alebo dôjde k difúzii s obrobkom. Zloženie obrobeného povrchu *SiSiC* keramiky po *WEDM* rezaní bolo zistené pomocou energiovo disperznej analýzy *EDX* (*Energy Dispersive X-ray*) z obr. 4.22.

Podľa *EDX* analýzy na obr. 4.22 bol povrch vzorky len minimálne pokrytý časticami *Cu* a *Zn*, z ktorých bol drôt zložený. Zistený obsah prvkov bol *Cu* = 1,9 hm. % a *Zn* = 0,35 hm. %. Väčšinu povrchu tvorí kremík *Si* až 71,4 hm. % a za ním uhlík *C* = 13,9 hm. %. Na povrchu bolo rozmiestnené aj značné množstvo kyslíku *O* (12,43 hm. %). Príčinou javu bola oxidácia, ku ktorej došlo pri vysokej teplote obrábania v deionizovanej vode. Rozloženie častíc jednotlivých prvkov vzorky č.1 je zobrazené na obr. 4.23b. Čierne škvrnky v kráteroch značia, že detektor nedokázal zaznamenať dáta v danom prostredí.

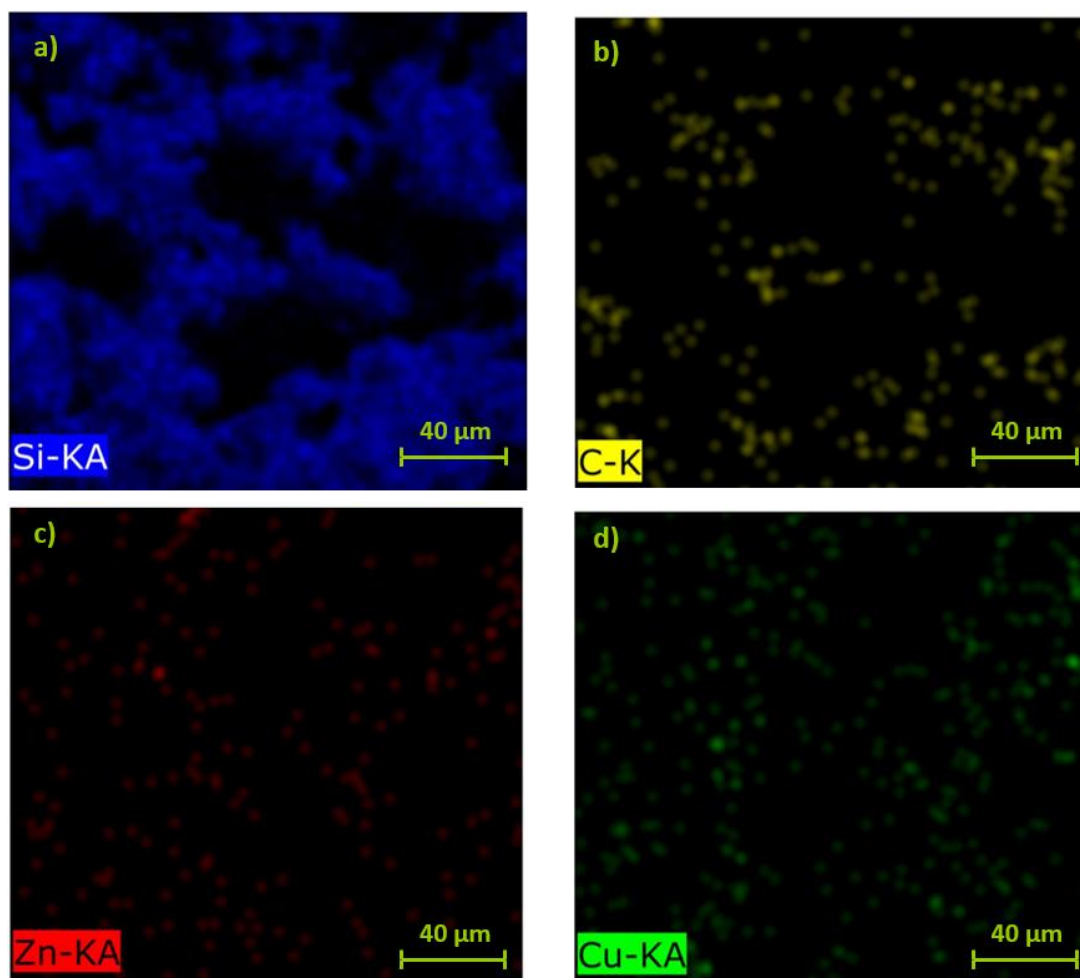


Obr. 4.22 *EDX* analýza povrchu po *WEDM* obrábaní *SiSiC* keramiky mosadzným drôtom. Vzorka č. 1: $U = 70 \text{ V}$, $T_{\text{on}} = 8 \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 50 \mu\text{s}$, $v = 12 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $I = 25 \text{ A}$.



Obr. 4.23 *EDX* analýza povrchu vzorky č. 1.

Farebná škála z obr. 4.23b značí, že povrch bol len čiastočne tvorený prvkami uvoľňujúcimi sa z elektródy. Prepracovaná vrstva, ktorú tvorí *Si* (obr. 4.24a) je v porovnaní s rovnomerne rozmiestnenými časticami *Zn* (obr. 4.24c) a *Cu* (obr. 4.24d) v rozmerných zhlukoch.



Obr. 4.24 EDX analýza vzorky pre vyskytujúce sa prvky na obrobku.

Nízka hustota rozloženia *C* (obr. 4.24b) reprezentuje jeho slabé objemové zastúpenie v materiáli. Vďaka malému pomeru *Zn* ku *Cu* bola kontaminácia povrchu obrobku prvkom *Zn* nepatrná. Vhodným výplachom je možné čo najviac eliminovať usadenie uvoľnených častíc z elektródy. Ich množstvo je v priamom súvisle s energiou výboja. Pri elektroerózii boli v kontakte častice z obrobku aj elektródy a vysoká teplota urýchlila ich preskupovanie.

4.6.2 Šírka rezu

Šírka rezu pozostáva z priemeru použitej elektródy a dvojnásobku šírky iskrovej medzery. Je dôležitou súčasťou rezného procesu pri *WEDM*, keďže udáva celkovú presnosť tvaru rezaného telesa. Predstavuje množstvo materiálu, ktoré bolo vplyvom elektroerózie odstránené. V mnohých prípadoch aj zbytočne. Ako udáva literatúra [40] veľkosť iskrovej medzery sa obvykle vyskytuje v rozmedzí 0,025–0,05 mm. Z toho vyplýva, že rozsah šírky rezu by mal byť 0,3–0,35 mm, pri dosiahnutí štandardnej iskrovej medzery. Problém nastáva predovšetkým v rezaní ostrých rohov, kedy má šírka rezu výrazný vplyv na výsledný rádius. Namerané hodnoty sú zobrazené v tab. 4.4 a detaily širok rezu *D* všetkých vzoriek sú uvedené v prílohe č. 5. Grafické znázornenie nameranej šírky rezu pre každú vzorku je dostupné na obr. 4.25.

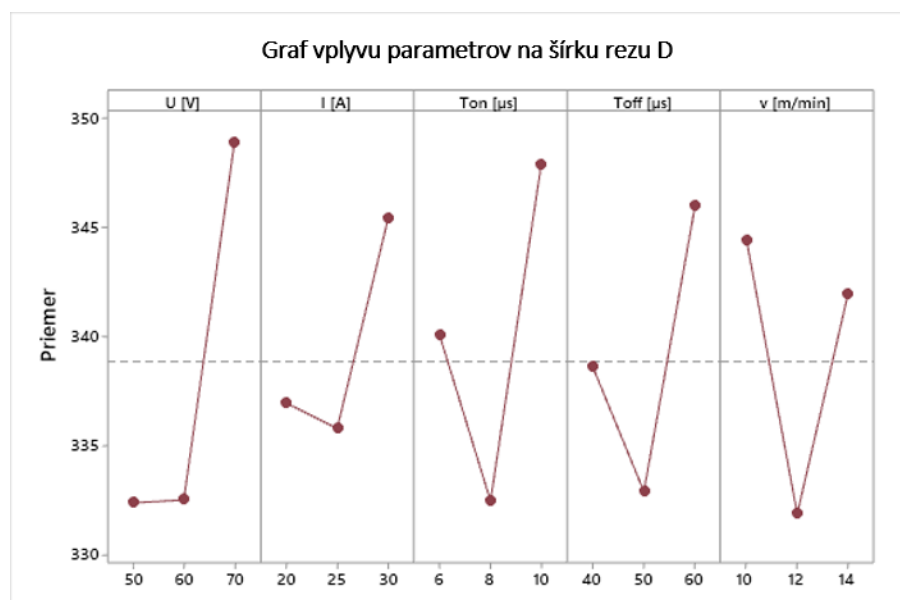


Obr. 4.25 Priradenie šírky rezu k príslušnému vzorku.

Tab. 4.11 ANOVA pre D [μm]; $\alpha=0,1$.

Faktor	Hodnota P
U [V]	0,003
I [A]	0,319
T_{on} [μs]	0,042
T_{off} [μs]	0,108
v [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	0,098

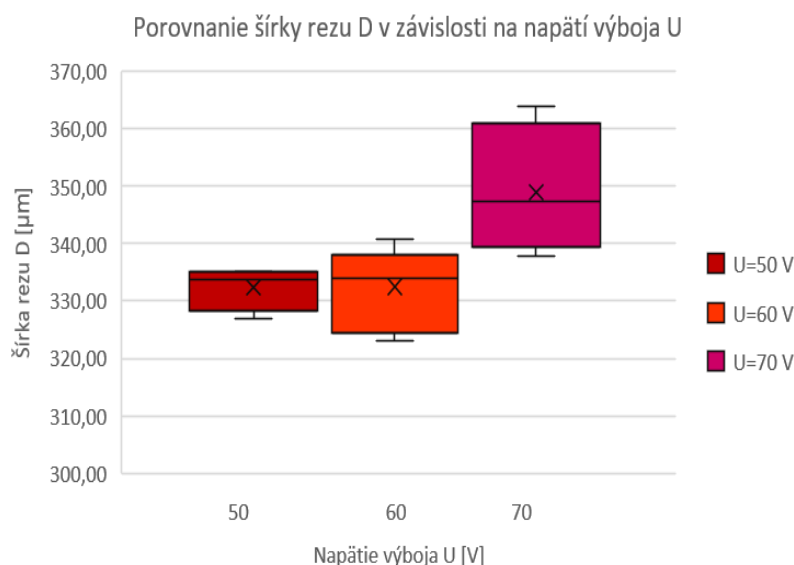
V tab. 4.11 je uvedené, že parametre U , T_{on} a v sú významné na hladine významnosti α . Na obr. 4.26 sú viditeľné grafy efektu jednotlivých procesných parametrov na danú výstupnú veličinu.

Obr. 4.26 Zmena šírky rezu D v závislosti na leveloch nastavených parametrov.

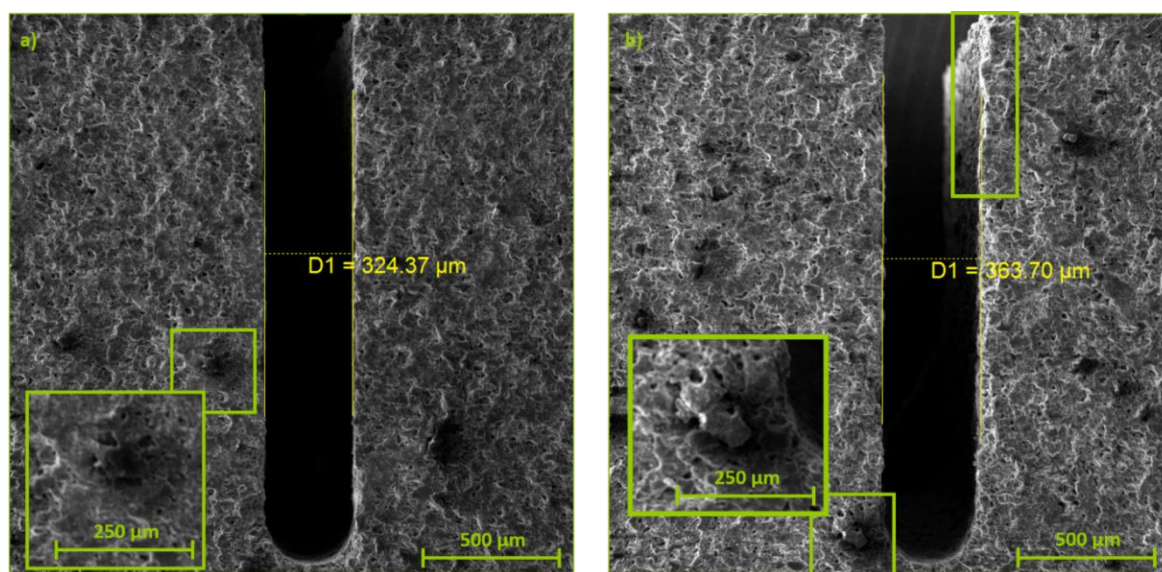
Z vykreslených závislostí mal najvyšší negatívny dopad na D parameter U , kde s jeho zvyšovaním vzrastá aj šírka rezu. Význam ostatných parametrov nebol jednoznačný. Je možné usúdiť, že kombinácia U spolu s nastavením maximálneho levelu T_{on} a minimálneho levelu v spôsobuje najväčšiu šírku rezu. Takáto kombinácia bola overená u vzoriek č. 12 a 11, kde bola stanovená tretia a štvrtá najhoršia šírka rezu.

Podľa obr. 4.25 len pri troch vzorkách bola veľkosť iskrovej medzery nad bežným štandardom. Najvyššie zaznamenané hodnoty D boli dosiahnuté pri vzorkách č. 12, 13, 14. Ich spoločným znakom sú veľkosti parametrov $U = 70 \text{ V}$ a $I = 30 \text{ A}$, teda ide o kombináciu najvyšších nastavených rozmerov. I bol stanovený ako nevýznamný na danej hladine významnosti α , preto jeho vplyv nebol ďalej študovaný a stanovený ako nepodstatný z hľadiska riešenia daného problému.

Rozdiel širok rezu za výskytu napätia výboja $U = 50 \text{ V}$ a $U = 60 \text{ V}$ bol veľmi nepatrný. Tento fakt je zobrazený nie len na obr. 4.26, ale aj na obr. 4.27, kde sa nachádzajú krabicové diagramy vzniknutej medzery, v závislosti na U . Pri procese rezania materiál akoby vybuchoval z miesta rezu a pre keramiky ako krehký materiál, tento dej nie je vhodný. Vysoká energia výboja v iskrovej medzere vplyvom vysokého napätia $U = 70 \text{ V}$ mala za následok nie len potrebné odstránenie materiálu, ale aj lavínu odtrhnutých kusov keramiky, ktoré zapríčinili nežiadúce rozšírenie medzery.



Obr. 4.27 Rozloženie veľkostí šírky rezu D pri jednotlivých hodnotách nastavenia napätia výboja U .



Obr. 4.28 Porovnanie šírky rezu vzoriek č. 3 (a) a 13 (b) s parametrami:
 a) vzorka č. 3: $U = 60 \text{ V}$, $T_{\text{on}} = 8 \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 50 \mu\text{s}$, $v = 12 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $I = 20 \text{ A}$,
 b) vzorka č. 13: $U = 70 \text{ V}$, $T_{\text{on}} = 6 \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 60 \mu\text{s}$, $v = 10 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $I = 30 \text{ A}$.

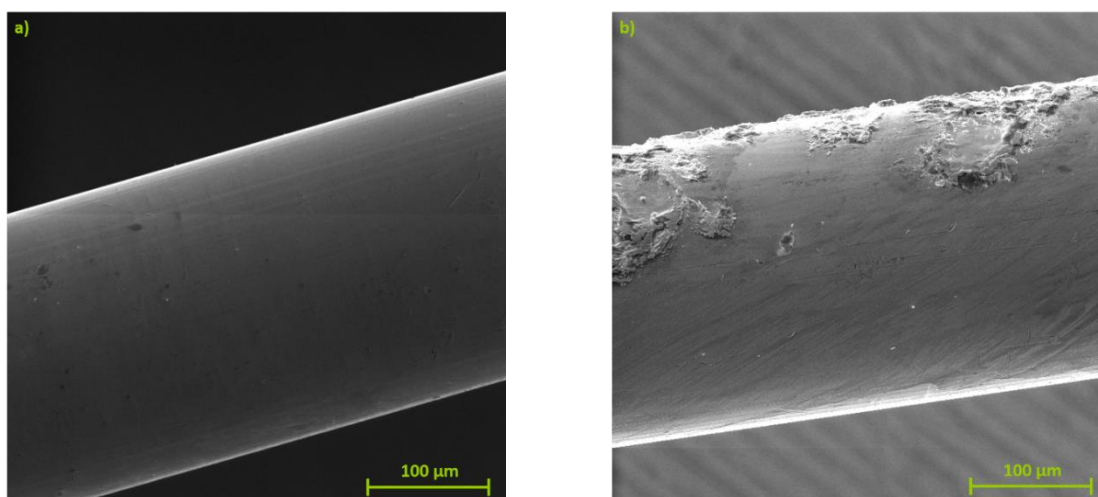
Obr. 4.28 zobrazuje rozdiel v geometrii výslednej šírky rezu. Tá bola pri vzorke č. 3 (obr. 4.28a) vyhodnotená ako veľmi priaznivá. Hrany materiálu boli tvorené výstupkami a krátermi približne v rovnakej výške, zatiaľ čo pri vzorke č. 13 (obr. 4.28b) boli značné kusy keramiky na viacerých miestach hrany odlúpené. Tým bol rez označený za neprijateľný z hľadiska presnosti. Pri pohľade na vzorku č. 13 je možno vidieť aj viacero vystúpených kráterov, ktoré zhoršili celkovú drsnosť povrchu.

Veľké kusy odtrhnutého materiálu (obr. 4.28b) vznikli následkom vysokého napätia výboja, ale aj skratom, ktorý viedol k pretrhnutiu drôtu. Ku skratom dochádzalo predovšetkým pri zmenách smeru rezania kontúry alebo výšky rezaného materiálu. Ďalšou možnosťou bol kontakt s nevodivou časticou prípadne neodplaveným materiálom. Vysokou početnosťou pretrhnutí drôtu spôsobených skratom nedochádza len k zvyšovaniu spotreby elektrickej energie a drôtu, ale aj ku strate kvality povrchu a celkovej geometrickej presnosti obrobku. O to vážnejší problém sa objavuje pri keramike, ktorá je vysoko náchylná na rozširovanie trhlin. Výskyt takejto priehlbiny je spojený aj so vznikom mikrotrhlin rôznych veľkostí, ktoré sa môžu ďalej šíriť materiálom.

4.7 Hodnotenie opotrebovania elektródy

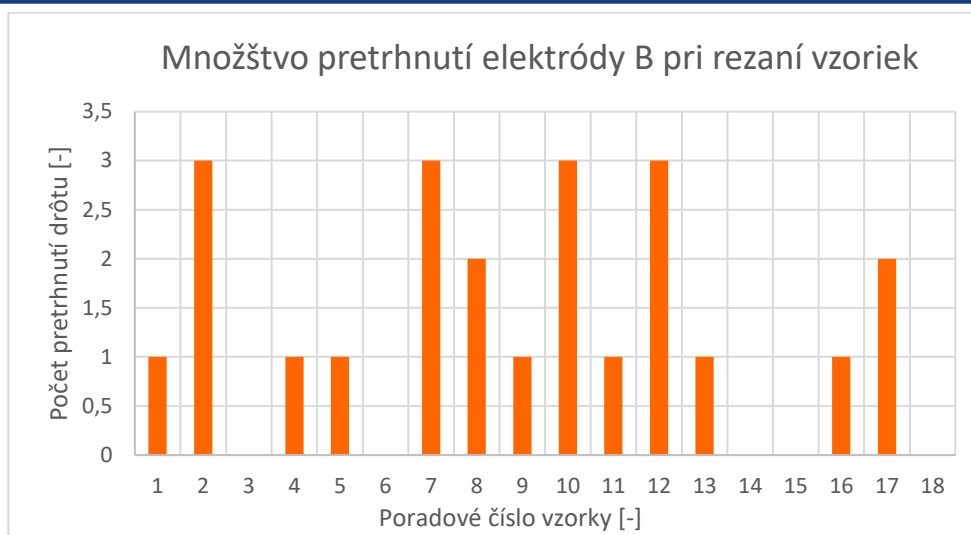
Elektróda pri *WEDM* rezaní predstavuje spotrebný materiál. Jej opätovné použitie vzhľadom na prerušovaný proces rezania nie je možný. Práve plynulosť rezného procesu je dôležitá nie len z pohľadu výslednej kvality povrchu, ale aj z ekonomického hľadiska. Každé jedno pretrhnutie drôtu predlžuje dobu rezania a zvyšuje náklady nie len na samotný materiál, ale aj na energiu. Drôty sa vyrábajú s istou vhodnosťou pre rôzne druhy materiálov. Na bežnú oceľ sú vhodné lacnejšie mosadzné drôty, kde sa cena pohybuje do 200 Kč/kg. Na rezanie keramiky, spekaných karbidov sa ponúkajú povlakované drôty s oceľovým alebo medeným jadrom, ktorých cena sa dokáže vyšplhať aj na 900 Kč/kg. Odpad z povlakovaných drôtov už nie je ďalej predajný, preto je jeho využitie nevýhodné.

Počas rezania je len jedna strana drôtu súčasťou elektroerózie. Tak ako u obrobku aj na povrchu elektródy vznikajú krátery. Ich rozsiahlosť určuje veľkosť výbuchov a teda energia výboja. Na obr. 4.29 je možné vidieť porovnanie povrchu drôtu pred (obr. 4.29a) a po obrábaní (obr. 4.29b).



Obr. 4.29 Mosadzný drôt *PENTA CUT G* pred (a) a po obrábaní (b).

Počas rezania vzoriek bola zaznamenaná frekvencia prerušenia drôtu pri obrábaní za daných podmienok - *B* (*Breaking-B*). Početnosť porušení je graficky zobrazená na obr. 4.30.

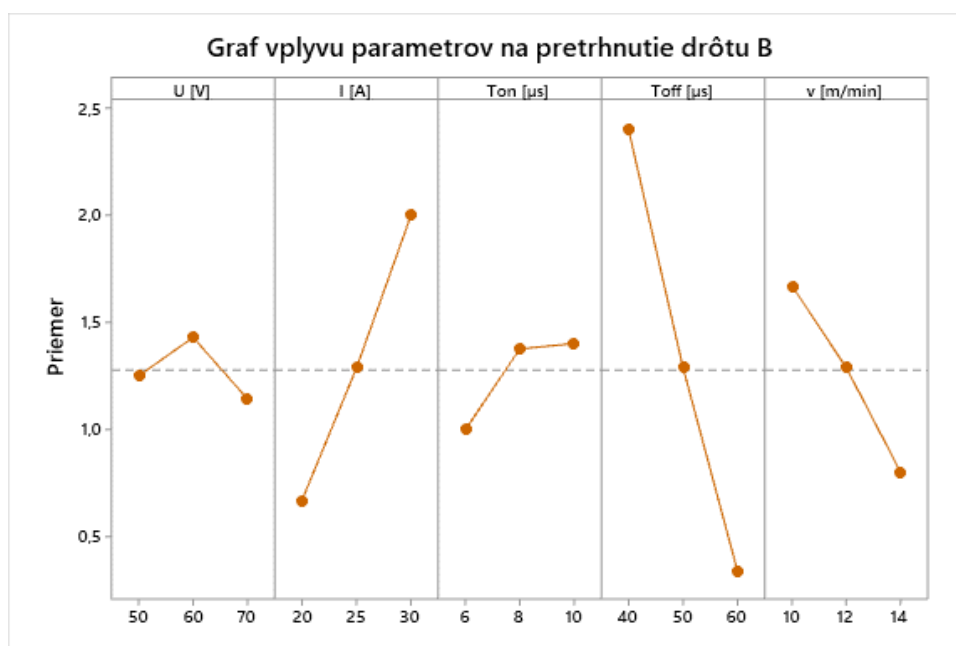


Obr. 4.30 Početnosť porušení drôtu pri rezaní jednotlivých vzoriek.

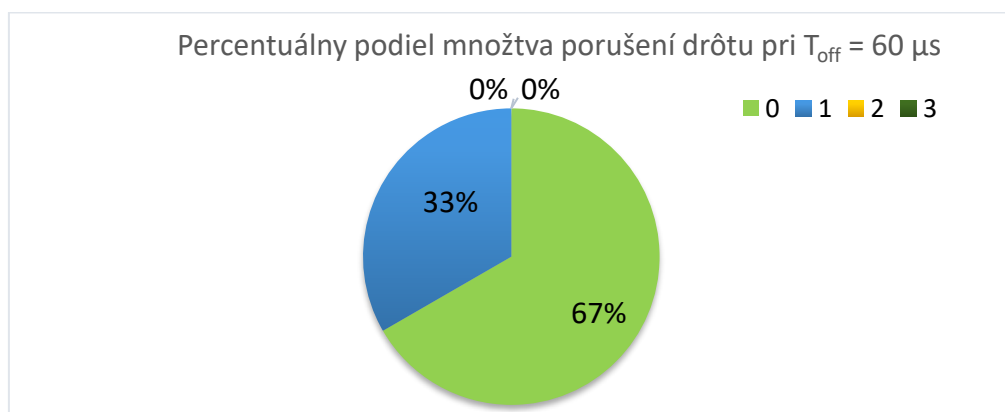
Z obr. 4.30 je možno vyčítať, že pri rezaní keramiky sa vyskytla vysoká frekvencia prerušovania drôtu. Len 5 z 18 vzoriek bolo rezaných plynulo, čo nepredstavuje ani 30 % z celkového počtu vzoriek. Pri 5 vzorkách bol drôt pretrhnutý až trikrát, čo je na stanovenú dĺžku rezu 7 mm veľký počet. Preto bol skúmaný význam vplyvu zadaných parametrov na hladine významnosti α uvedený v tab. 4.12.

Tab. 4.12 ANOVA pre B [-]; $\alpha=0,1$.

Faktor	Hodnota P
U [V]	0,904
I [A]	0,149
T _{on} [μs]	0,828
T _{off} [μs]	0,003
v [m·min ⁻¹]	0,474

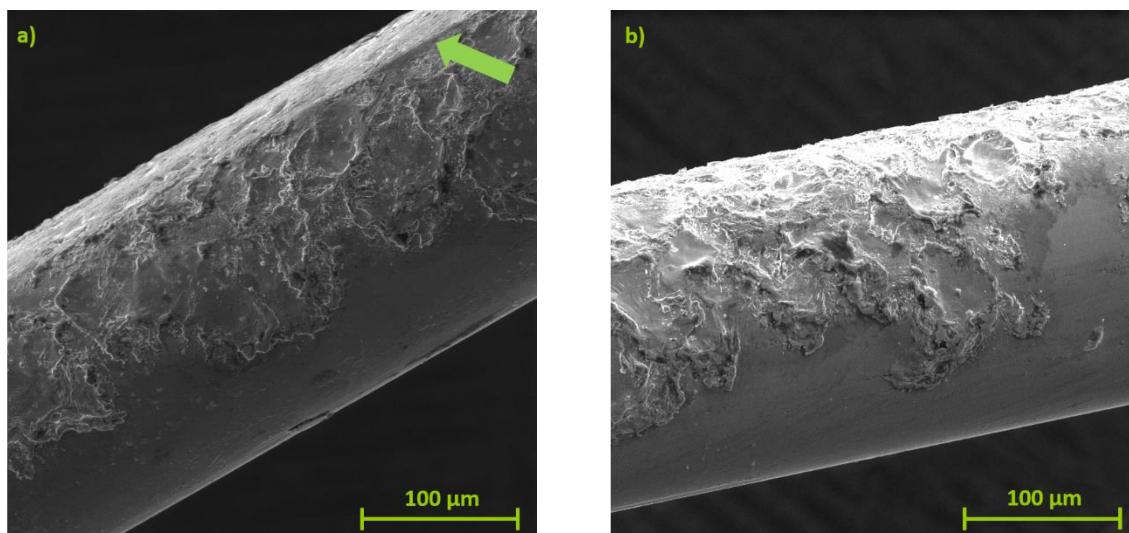
Obr. 4.31 Množstvo prerušení rezu B v závislosti na leveloch nastavených parametrov.

Z grafu vplyvu parametrov na pretrhnutie B (obr. 4.31) je možno vidieť značnú závislosť vplyvu T_{off} a I na B . Aj zvyšovanie doby impulzu T_{on} malo za následok vyššiu náchylnosť drôtu k porušeniu, pretože T_{on} predlžuje trvanie výboja a tým pádom aj pôsobenie vysokej teploty a to vedie ku pretrhnutiu elektródy. Rastom v došlo ku znižovaniu počtu pretrhnutí. Jej stanovenie na minimálny level za použitia vysokej v_c nemusí zaručiť ušetrenie financií. Vysoký level prúdu výboja I mal za následok nárast tepelnej energie miestami do takej miery až došlo k častému pretrhnutiu drôtu. Pri jeho minimálnej veľkosti bol proces rezania stabilný. Doba pauzy T_{off} mala podľa obr. 4.32 výrazný význam na plynulosť rezného procesu. Hodnota parametru $T_{off} = 60 \mu s$ bola použitá šesťkrát. Percentuálny podiel prípadov porušenia elektródy na tomto leveli nastavenia je zobrazený v podobe koláčového grafu na obr. 4.32.



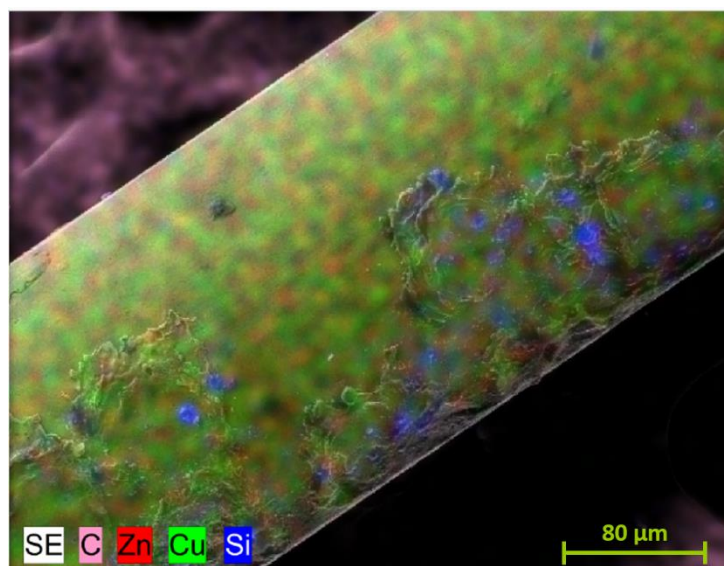
Obr. 4.32 Podiel porušení drôtu pri stálom nastavení $T_{off} = 60 \mu s$.

Samotný elektroerozívny proces nie je jediným faktorom ovplyvňujúcim výslednú formu nástroja. Pri rezaní môže byť drôt vedený cez prítlačné kladky, ktoré ho deformujú do splošteného tvaru. Porovnanie drôtu vedeného s prítlačnou kladkou a bez je uvedené na obr. 4.33. Sploštenie (obr. 4.33a) je zvýraznené zelenou šípkou.



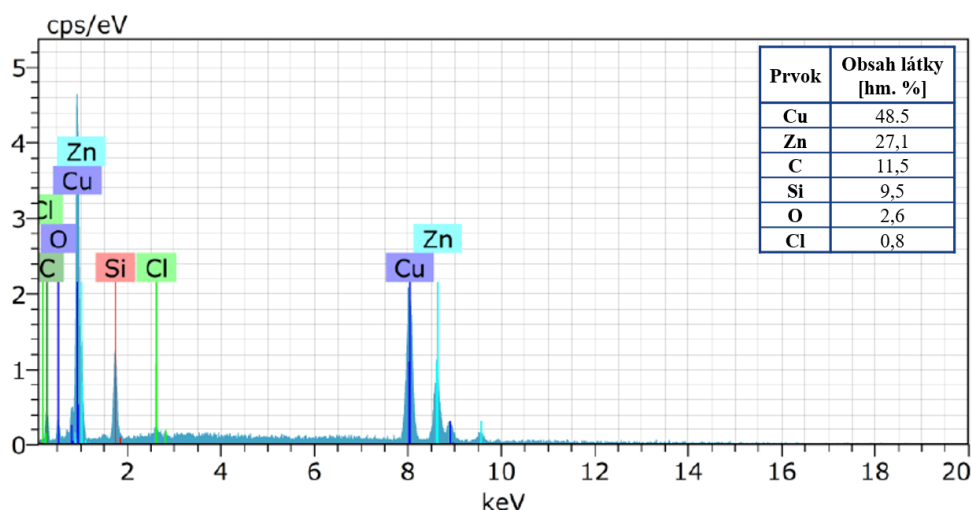
Obr. 4.33 Vedenie drôtu cez prítlačnú kladku (a) voľne (b).

V dôsledku tepelných účinkov v rozhraní medzi nástrojom a obrobkom sa nachádzalo množstvo odobratého materiálu nie len z obrobku ale aj z nástroja. Tieto častice boli väčšinou odplavené, no časť z nich sa usadila na elektróde. EDX analýza (obr. 4.34) zobrazuje výskyt a rozloženie objavujúcich sa prvkov na drôte po WEDM rezaní.



Obr. 4.34 Rozloženie prvkov na elektróde po obrábání.

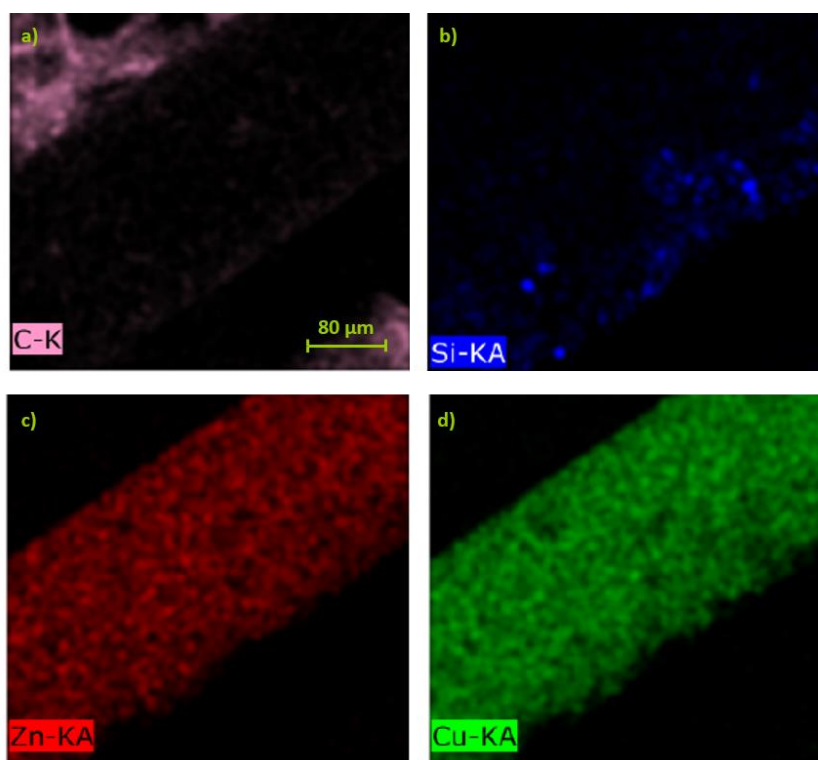
Z obr. 4.34 je možno spozorovať, že z prvkov vyskytujúcich sa v obrobku boli vo väčšej miere na elektróde usadené len kúsky *Si*, z dôvodu jeho vysokej koncentrácie v rezanom diele.



Obr. 4.35 EDX analýza elektródy.

Rozloženie prvkov vyskytujúcich sa na drôte bolo stanovené na 48,5 hm. % *Cu*, 27,1 hm. % *Zn*, 11,5 hm. % *C*, 9,5 hm. % *Si*, 2,6 hm. % *O*, 0,8 hm. % *Cl*. V porovnaní s obrobkom sa na drôte vytvorila menšia oxidická vrstva a taktiež bol zaznamenaný výskyt *Cl*. Ten bol súčasťou dielektika. Podľa EDX analýzy (obr. 4.35) je koncentrácia *C* vysoká, napriek tomu, že samotný materiál obrobku obsahoval nízke hm. % *C* v porovnaní s hm. % *Si*.

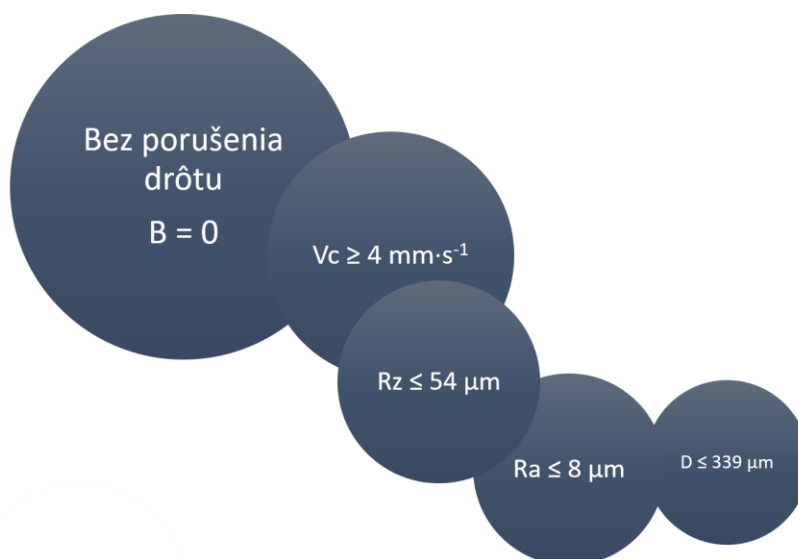
Na obr. 4.36a je možné vidieť, že nedošlo ku vyššej kontaminácii drôtu atómami *C*, ale pri analýze bolo mikroskopom zaznamenané okolie, ktoré obsahovalo častice *C*. Taktiež je zjavné, že ukladanie *Si* na elektróde bolo predovšetkým spôsobené stuhnutím vystrelených kúskov keramiky pri elektroerózii a v minimálnej miere obsahom *Si* v dielektriku, keďže vysoká koncentrácia modrých flakov bola sústredená len na strane drôtu, ktorá bola využitá pri obrábání (obr. 4.36b).



Obr. 4.36 Výskyt častíc prvkov na drôte po obrábání.

4.8 Technologické vyhodnotenie

Vhodná voľba technológie je výsledkom analýzy dát získaných po ukončení rezania. Miera dôležitosti jednotlivých faktorov, ktorými sú množstvo pretrhnutí drôtu B , rezná rýchlosť v_c , parametre drsnosti Ra , Rz a šírka iskrovej medzery D určuje práve vhodnosť zvolených parametrov pre prípadné ekonomické využitie WEDM rezania SiSiC keramiky. Obr. 4.37 vyjadruje význam získaných dát, čím väčší je kruh, tým je daný faktor podstatnejší.



Obr. 4.37 Miera dôležitosti získaných dát.

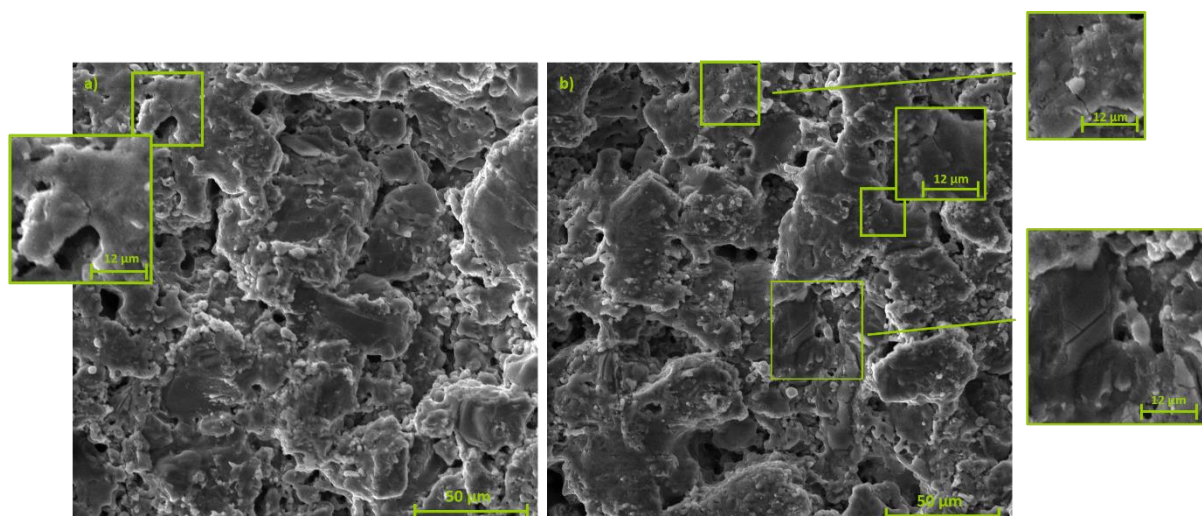
Pri zväžení faktu, že dĺžka rezanej kontúry bola iba 7 mm, je najpodstatnejšie, aby za daných podmienok rezania drôt nebol prerušovaný, teda $B = 0$. Okrem plynulosti procesu je výrazne dôležitá rezná rýchlosť v_c , ktorá určuje dobu rezania. Vzhľadom na podmienku $B = 0$, žiadne z vyfiltrovaných dát nezahrňovali nadpriemernú reznú rýchlosť. Parameter drsnosti Rz

má vyššiu výpovednú hodnotu než parameter Ra a to z dôvodu hlbokých kráterov. Z pohľadu šírky iskrovej medzery je vhodné, aby jej veľkosť bola čo najnižšia v danej skupine dát. Číselné hodnoty uvedené na obr. 4.38 boli určené na základe priemerov nameraných hodnôt, tak aby výsledkom zvolenej technológie bola najvyššia kvalita za čo najkratší čas.

Tab. 4.13 zobrazuje vyfiltrované vzorky, pre ktoré platí $B = 0$. Z vopred stanovených obmedzení veľkostí vyplýva, že najlepšiu kombináciu získaných hodnôt nadobudli vzorky č. 3 a 6. Pri vzorke č. 3 môže vzniknúť problém rezaním dlhšej kontúry, kvôli veľkosti parametru $T_{\text{off}} = 50 \mu\text{s}$, keďže ide o dobu, kedy je iskrová medzera vyplachovaná dielektrikom. Menšia energia výboja vyvinutá pri tejto vzorke môže eliminovať mikrotrhliny na povrchu čo dokazujú aj snímky z mikroskopu. Porovnanie snímok je možné vidieť na obr. 4.40.

Tab. 4.13 Hodnoty zadaných parametrov a získaných dát pri vzorkách bez prerušenia drôtu.

Číslo vzorky	Parameter					Dáta			
	T_{on} [μs]	T_{off} [μs]	v [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	U [V]	I [A]	v_c [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	D [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
3	8	50	12	60	20	4,4	324,37	6,292	44,928
6	8	60	12	60	25	4,2	329,65	5,878	46,366
14	10	60	14	70	30	5	360,88	8,642	71,86
15	6	60	14	70	20	3,4	339,33	6,532	48,847
18	6	60	10	50	20	3,2	335,18	5,791	40,553



Obr. 4.38 Porovnanie kvality povrchu vzorky č. 3 (a) a vzorky č. 6 (b) s veľkosťami parametrov:

- a) vzorka č. 3: $U = 60 \text{ V}$, $T_{\text{on}} = 8 \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 50 \mu\text{s}$, $v = 12 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $I = 20 \text{ A}$,
 b) vzorka č. 6: $U = 60 \text{ V}$, $T_{\text{on}} = 8 \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 60 \mu\text{s}$, $v = 12 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $I = 25 \text{ A}$.

Z hľadiska vyhodnocovania kvality povrchu bolo na vzorke č. 6 (obr. 4.38b) zaznamenaných viac výrazných mikrotrhlín než na vzorke č. 3 (obr. 4.38a). Podľa vyššie uvedených hodnôt dát aj analýzy povrchov, kombinácia parametrov u vzorky č. 3 bola vybraná ako najvhodnejšia.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE VÝROBY

Výpočet nákladov na výrobu je dôležitým faktorom pri zavádzaní nového produktu do výroby. WEDM rezanie sa radí medzi drahšie metódy obrábania a to z dôvodu dlhších výrobných časov a neopätovného použitia nástroja, ktorým je elektróda.

5.1 Porovnanie nákladov na rezanie jednotlivých vzoriek

Voľba vhodnej kombinácie parametrov nezahŕňa len výslednú dobrú kvalitu povrchu, ale aj náklady spojené s dosiahnutím takéhoto výsledku. Preto nie vždy je nutná najvyššia dokázateľná kvalita na úkor financií.

Rezanie osemnástich vzoriek prebiehalo za rôznych podmienok, ktorých výsledkom boli odlišné rezné rýchlosti v_{ci} . Doba procesu obrábania jedného vzorku t_i , nebola zaznamenaná, preto bola vypočítaná na základe dĺžky rezanej kontúry $l = 7$ mm a zaznamenatej rýchlosti rezania v_{ci} . WEDM rezanie SiSiC keramiky je zdĺhavá činnosť, najmä pri pravidelnom prerušovaní drôtu. Po pretrhnutí nasledovalo samonavliekanie elektródy, čo predĺžilo rezanie o 1 min. V bežnej praxi, sa nezvyknú rezať kontúry takej malej dĺžky a časté pretrhnutie v tomto prípade zvyšovalo predpokladanú dobu rezania niekoľkonásobne.

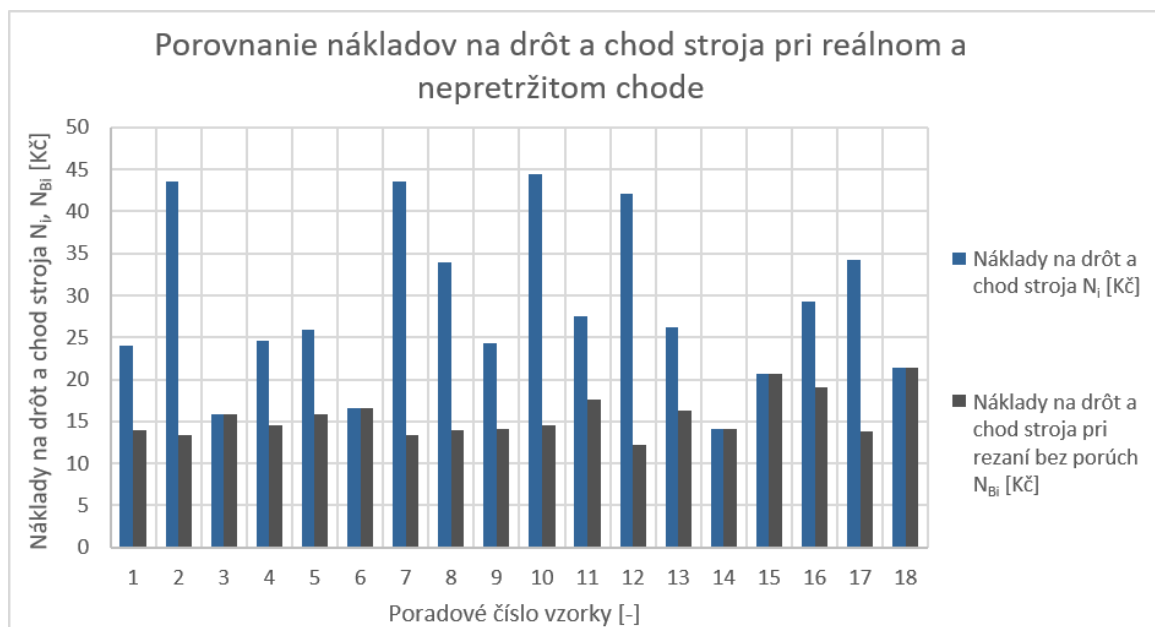
Spotreba drôtu sa taktiež navyšovala nie len z dôvodu jeho dlhšej doby odvíjania, ale aj opätovným navliekaním, pri ktorom sa spotrebovalo vždy o 2 m drôtu viac. Celkové náklady na rezanie jednotlivých vzoriek N_i zahŕňajú len náklady na spotrebovanú elektródu N_{Di} a náklady na hodinu chodu stroja N_{hs} . Tab. 5.1 zobrazuje vypočítané celkové náklady na rezanie jednotlivých vzoriek.

Náklady na hodinu chodu stroja N_{hs} - 550 Kč
Cena cievky rezacieho drôtu Penta CUT G (16 kg) - 2400 Kč

Tab. 5.1 Náklady na rezanie jednotlivých vzoriek.

Číslo vzorky	Počet pretrhnutí drôtu B [-]	Doba rezania t_i [min]	Spotreba drôtu L_{Di} [m]	Náklady na spotrebovaný drôt N_{Di} [Kč]	Celkové náklady na rezanie jednotlivých vzoriek N_i [Kč]
1	1	2,40	30,80	1,97	23,97
2	3	4,35	58,15	3,73	43,57
3	0	1,59	19,09	1,22	15,81
4	1	2,46	31,50	2,02	24,55
5	1	2,59	33,09	2,12	25,87
6	0	1,67	20,00	1,28	16,56
7	3	4,35	58,15	3,73	43,57
8	2	3,43	38,29	2,45	33,88
9	1	2,40	35,60	2,28	24,28
10	3	4,49	50,89	3,26	44,41
11	1	2,79	29,95	1,92	27,54
12	3	4,25	48,50	3,11	42,07
13	1	2,67	28,67	1,84	26,28
14	0	1,40	19,60	1,26	14,09
15	0	2,06	28,82	1,85	20,72
16	1	2,89	42,49	2,72	29,23
17	2	3,37	51,22	3,28	34,20
18	0	2,19	21,88	1,40	21,45

Z tab. 5.1 je možné si všimnúť, že porušenia drôtu výrazne zvyšujú náklady na výrobu. Vysoký rozdiel v cenách nie je spôsobený spotrebou drôtu, ktorého náklady tvoria približne 10 % z celkových nákladov, ale práve náklady na chod stroja. Preto je aj z tohto hľadiska vhodnejšie použiť na rezanie drôt vyššej triedy, ktorý nie len urýchli proces, ale aj zabezpečí dobrú kvalitu povrchu. Obr. 5.1 znázorňuje porovnanie nákladov na rezanie jednotlivých vzoriek N_i za reálnych podmienok a za ideálnych, kedy by v žiadnom prípade nedošlo k pretrhnutiu drôtu N_{Bi} .



Obr. 5.1 Náklady na rezanie jednotlivých vzoriek v porovnaní s nákladmi na rezanie bez porušenia drôtu.

Z grafického porovnania (obr. 5.1) sú zrejmé veľké rozdiely v nákladoch, ktoré boli spôsobené prerušením rezania. Diferencia sa teda vyšplhala pri troch prasknutiach drôtu až na vyše dvojnásobok v porovnaní s potenciálnym nepretržitým rezom.

Najnižšie náklady boli zaznamenané pri vzorke č. 14, ktoré predstavovali 14,08 Kč. Naopak najvyššie pri vzorke č.10 a to 44,41 Kč. Vzorka č. 3 nebola vyhodnotená ako najvýhodnejšia len z pohľadu kvality povrchu a rýchlosti rezania ale aj z finančného hľadiska, kde cena rezania dosiahla 15,81 Kč.

5.2 Celkové náklady na rezanie vybranou technológiou

Celkové náklady na rezanie istej kontúry zahŕňajú množstvo faktorov, ktoré nemožno zanedbať a vo veľkej miere ovplyvňujú cenu rezania. Sú to náklady na:

- hodinu stroja,
- nástroj a iný spotrebný materiál,
- údržbu, servis.

Vo všeobecnosti sa náklady rozdeľujú na priame a nepriame. Priame, jednicové, zahŕňajú financie, ktoré v plnej miere súvisia s výrobou daného produktu. Nepriame náklady určujú výdaje celého podniku, zahŕňajú aj takzvané režijné náklady.

a) Operačné náklady

Výpočet operačných nákladov bol vykonaný na potenciálnom rezaní dielu s dĺžkou kontúry 100 mm z materiálu SiSiC technológiou podľa vzorky č. 3 vo výskumnom pracovisku.

Operačné náklady sa vzťahujú na CNC stroj, na ktorom sa daná operácia vykonáva, teda MAKINO EU 64.

Určenie jednotkového času stroja t_{mA} podľa [56] pre jeden kus obrobku a operácie:

$$t_{mA} = t_{mA5} + t_{mA4} \text{ [min]} \quad (5.1)$$

kde: t_{mA} [min] – jednotkový čas stroja,
 t_{mA5} [min] – jednotkový čas stroja v pokoji,
 t_{mA4} [min] – jednotkový čas chodu stroja,

Súhrn činností vedúcich ku stanoveniu jednotkového času stroja v pokoji t_{mA5} :

- navliekanie drôtu – 1 min,
- upnutie obrobku – 3 min,
- polohovanie obrobku – 5 min,
- ručné meranie – 0,5 min .

$$t_{mA5} = 9,5 \text{ min}$$

Jednotkový čas chodu stroja pri hrubovaní súčasti s dĺžkou kontúry 100 mm bol podľa doby rýchlosti rezania vzorky č. 3 stanovený na $t_{mA4} = 22,7$ min.

Z vyššie uvedeného vzťahu (5.2) bolo možné vypočítať jednotkový čas stroja t_{mA} :

$$t_{mA} = t_{mA5} + t_{mA4} = 9,5 + 22,7 = 32,2 \text{ min}$$

Výpočet jednicových nákladov prevádzky stroja N_{Aps} , vzťahujúcich sa k jednotkovému času stroja je možný podľa vzťahu (5.2) uvedeného v [56]:

$$N_{Aps} = \frac{N_{hs}}{60} \cdot t_{mA} \text{ [Kč} \cdot \text{ks}^{-1}] \quad (5.2)$$

kde: N_{hs} [Kč·h⁻¹] – náklady na hodinu prevádzky stroja,
 t_{mA} [min] – jednotkový čas stroja.

Jednicové náklady prevádzky stroja N_{Aps} (5.2) dostupné v [56] boli stanovené na:

$$N_{Aps} = \frac{N_{hs}}{60} \cdot t_{mA} = \frac{550}{60} \cdot 32,2 = 295,17 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$$

Dávkové náklady prevádzky stroja N_{Bps} :

Dávkové náklady N_{Bps} sa vzťahujú na výrobnú dávku. Tá bola v tomto prípade tvorená 1 ks vyrobenej súčasti. Preto platí rovnosť 5.3 podľa [56]:

$$N_{Bps} = N_{Aps} [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}] \quad (5.3)$$

$$N_{Bps} = 295,17 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$$

Režijné náklady na prevádzku stroja N_{Rps}

Prevádzková réžia zahŕňa prvotné aj druhotné náklady, ktoré súvisia s riadením výroby. Zaraďujú sa tu režijné mzdové náklady, režijný materiál, náklady na pracovné miesto, upratovanie prevádzky, osvetlenie, náklady spojené s výrobnou halou. Keďže experiment bol vykonaný vo výskumnom stredisku, hodnota uvedených režijných nákladov bola nižšia, než by tomu bolo pri prepočte na výrobný podnik.

Po uvážení všetkých faktorov vplývajúcich na réžiu prevádzky bola jej hodnota stanovená na $R = 20 \%$ a ďalej vypočítaná vzťahom (5.4) získaného z [56].

$$N_{Rps} = (N_{Aps} + N_{Bps}) \cdot \frac{R}{100} [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}] \quad (5.4)$$

$$N_{Rps} = (295,17 + 295,17) \cdot \frac{20}{100} = 118,01 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$$

kde:	$N_{Rps} [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$	–	režijné náklady prevádzky stroja,
	$R [\%]$	–	prevádzková réžia,
	$N_{Aps} [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$	–	jednicové náklady prevádzky stroja,
	$N_{Bps} [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$	–	dávkové náklady prevádzky stroja.

Operačné náklady N_{op}

Operačné náklady N_{op} tvorí súčet všetkých vyššie uvedených nákladov podľa vzťahu (5.5) uvedeného v literatúre [56].

$$N_{op} = N_{Aps} + N_{Bps} + N_{Rps} [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}] \quad (5.5)$$

$$N_{op} = 295,17 + 295,17 + 118,01 = 708,35 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$$

kde:	$N_{op} [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$	–	operačné náklady,
	$N_{Aps} [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$	–	jednicové náklady prevádzky stroja,
	$N_{Bps} [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$	–	dávkové náklady prevádzky stroja,
	$N_{Rps} [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$	–	režijné náklady na prevádzku stroja.

b) Náklady na spotrebný materiál N_{sm}

Pri technológii WEDM rezania sa za spotrebný materiál považujú drôtené elektródy, deionizačná živica, filtre na filtráciu dielektrika.

Produkt	Množstvo	Nákupná cena	Životnosť	Cena v prepočte na požadované množstvo
Rezací drôt PENTA CUT G	16 kg	2400 Kč	52 hod	17,6 Kč
Filtre	2 ks	5900 Kč	400 hod	5,6 Kč
Deionizačná živica	25 l	4400 Kč	500 hod	2,8 Kč

Prepočtom na dobu chodu stroja, kde $t_{mA4} = 22,7$ min boli získané náklady na najčastejšie menené diely a materiál nutný k danej technológii:

$$N_{sm} = 26 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$$

c) Náklady na médiá a úver

Skupina zahŕňa financie určené na dielektrickú kvapalinu, stlačený vzduch. Všetky výdavky spojené s chodom stroja, či ide o náklady na jeho obstaranie, alebo elektrickú energiu, boli už zahrnuté v jeho hodinovej sadzbe.

Dielektrická kvapalina vzniká zmiešaním vody z obecných sietí s deionizačnou živicom podľa potreby výšky ionizácie. Voda sa nevymieňa, ale filtruje, prípadne dolieva pri dosiahnutí nízkej hladiny. Stlačený vzduch sa využíva na rýchle očistenie a osušenie povrchov. Získava sa z bežne dostupných kompresorov. Náklady na tieto médiá sú v prepočte na čas obrábania takmer nulové, preto neboli do výslednej ceny zahrnuté.

d) Náklady na údržbu stroja N_u

Pre zvýšenie životnosti stroja a zníženie jeho prípadnej poruchovosti sa vykonávajú jeho pravidelné údržby. Výrobca obvykle udáva kontrolu podávacieho systému, výmenu filtrov, čistenie pracovného prostredia, mazanie stroja v rôznych časových intervaloch. Taktiež udáva čas, mesačne venovaný práve údržbe, ktorá činí 2,35 hod/mes. Okrem uvedeného sa vykonáva pravidelná generálna údržba raz za rok. Časovú náročnosť určuje stav stroja a pracovníci servisu. V tomto prípade je stanovená na 72 hod/rok.

Druh údržby	Časová	Hodinová sadzba	Náklady v prepočte na jednotkový čas stroja
Pravidelná údržba stroja	2,35 hod/mes	200 Kč/hod	1,68 Kč
Generálna údržba stroja	72 hod/rok	300 Kč/hod	6,5 Kč

Celkové náklady na údržbu stroja v prepočte na 1 vyrobený kus boli určené na:

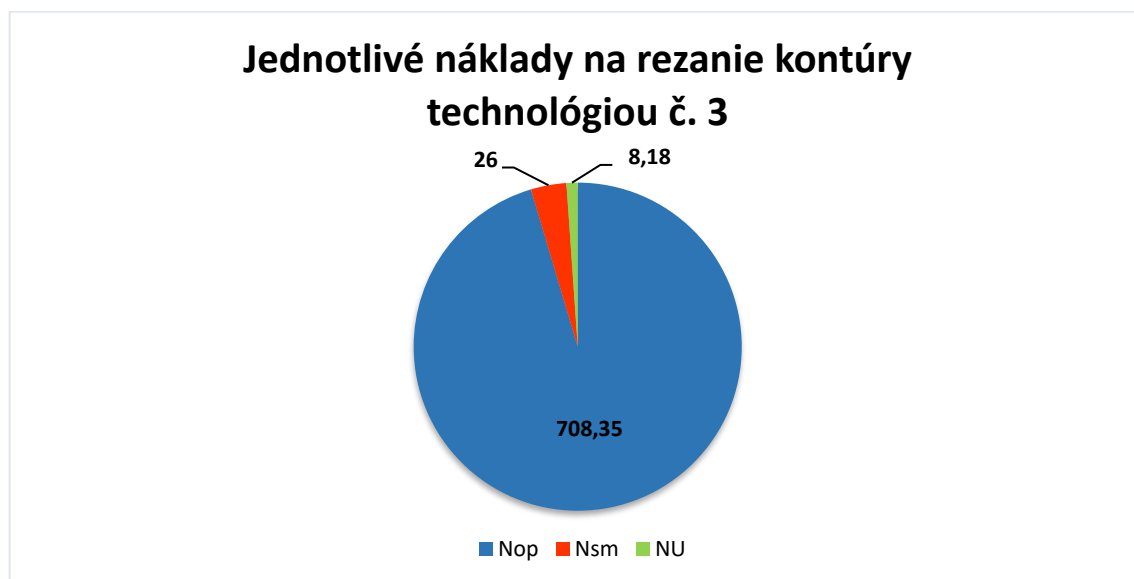
$$N_u = 8,18 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$$

e) Celkové náklady na rezanie vybranou technológiou N_c

Celkové náklady na rezanie technológiou č. 3 boli získané na základe súčtu jednotlivých dielčích nákladov N_{op} , N_u , N_{sm} vzťahom (5.6):

$$N_c = N_{op} + N_{sm} + N_u \text{ [Kč} \cdot \text{ks}^{-1}] \quad (5.6)$$

$$N_c = N_{op} + N_{sm} + N_u = 708,35 + 26 + 8,18 = 742,53 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$$



Obr. 5.2 Podiel jednotlivých zložiek nákladov.

Náklady na rezanie 100 mm kontúry na stroji MAKINO EU 64 vo výskumnom pracovisku boli stanovené na $742,53 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$.

DISKUSIA

WEDM rezanie keramiky na báze *SiC*, je determinované vodivosťou materiálu, jeho čistotou, materiálom elektródy, výkonom stroja a v neposlednom rade vhodným nastavením parametrov na stroji.

Pri uskutočnení prvých testov rezania keramiky s jej väčším objemom, bolo náročné vytvoriť takú kombináciu procesných parametrov, aby došlo k úspešnému vykonaniu rezu. Rezanie bolo uskutočnené mosadzným drôtom *PENTA CUT P*, ktorý je najlacnejšou variantnou elektródou od daného výrobcu. Bolo zreteľne dokázané, že *SiSiC* keramiky je možné rezať aj bežne používaným drôtom, no stabilizovať rezný proces je zdĺhavá činnosť. Podstatou bolo eliminovať porušovanie drôtu a postupne zrýchľovať proces obrábania. Počas pokusov o zrýchlenie rezania, boli dosiahnuté medzné hodnoty parametrov, pri ktorých prekročení drôt okamžite po prvom dotyku s materiálom praskol. Medzné parametre boli stanovené na $ON=12$, $OFF = 28$, $SV = 41$, $FR = 16$. Napriek nastaveniu takýchto hodnôt, nebolo dosiahnuté plynulé rezanie. Vysoká frekvencia porušovania sa vyskytovala iba na 2 miestach rezaného telesa, pričom zakaždým bol na ovládacom paneli stroja zobrazený symbol skratu. Po ukončení rezania, bolo zjavné, že problémy boli zapríčinené nevodivými nečistotami v materiáli, vysoký prúd výboja spôsobil v mieste nečistoty vysoké ťahové napätie, ktoré v materiáli viedlo k vytvoreniu minimálne povrchových trhlín s dĺžkou väčšou ako 3 mm. V prípade rezania reálnej zákazky, by takéto vady viedli k vyradeniu súčasti. Pre overenie parametrov, bol rez opakovaný. Po dosiahnutí najrýchlejšieho času rezania, bez porušenia drôtu, je možné usúdiť, že pokiaľ nie je zabezpečená vysoká čistota a akosť rezanej keramiky, *WEDM* technológia nie je vhodná voľba.

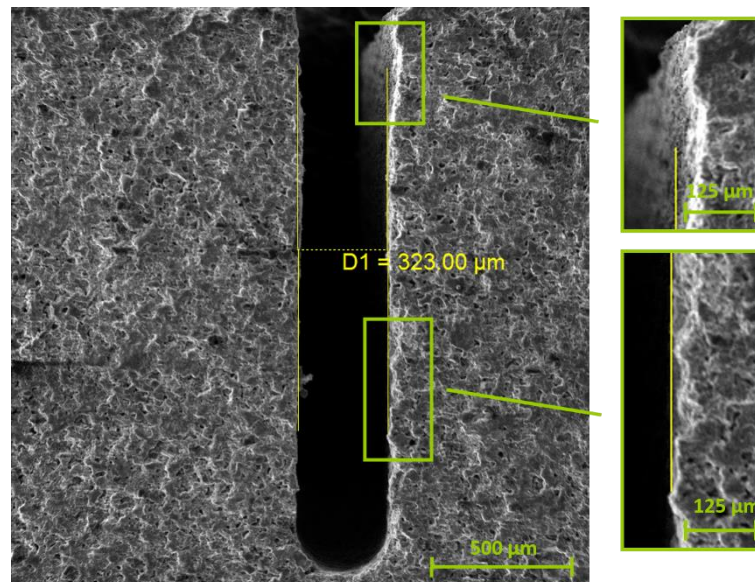
Podľa vyššie uvedeného pre zvýšenie stability rezania bol zvolený drôt vyššej triedy *PENTA CUT G*, rezanie vzoriek o dĺžke 7 mm predstavovalo vysoké riziko narazenia na nečistotu v materiáli, ktorá by zamedzila akýkoľvek ďalší výskum. Pri rezaní osemnástich vzoriek boli systematicky menené parametre: T_{on} , T_{off} , I , U , v .

Veľkosť prvej sledovanej veličiny v_c , závisela predovšetkým na leveloch nastavenia I , T_{on} a T_{off} . Nehľadiac na parametre nastavenia, v_c je možno zvýšiť, ako udáva literatúra [28], povlakovaným drôtom vyššej triedy, zväčšením prierezu drôtu, zosilnením výplachu. Vysoká hodnota T_{off} výrazne spomaľuje rezanie, preto práve vyšším tlakom výplachu je možno eliminovať prípadné porušenia drôtu aj pri znížení parametru T_{off} . Ako bolo dokázané pokusmi na dvoch rozdielnych strojoch, rýchlosť rezania pri nepretržitom hrubovaní *SiSiC* keramiky sa vyskytovala v oblasti $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Len v prípade silného výplachu, ktorý spôsobuje nežiadúce vibrácie a vychýlenie obrobku bolo možné túto hodnotu prekonať.

Vysoká kvalita získaného povrchu je práve dôvodom rozšírenia *EDM*. Najväčšia výhoda vzniká pri obrábaní materiálov s vysokou pevnosťou, keďže nevznikajú žiadne rezné sily. Zatiaľ čo R_a drsnosť povrchu pri *WEDM* hrubovaní dosahuje najviac $12,5 \mu\text{m}$, ako je aj uvedené v literatúre [22], pri *SiSiC* bola priemerná hodnota drsnosti R_a stanovená na $7,6 \mu\text{m}$. Najlepšia dosiahnutá drsnosť bola $R_a = 5,736 \mu\text{m}$, čo vykazovalo dobré výsledky v porovnaní s [22], kde bol rezaný keramický nanokompozit. Skrat spôsobujúci pretrhnutie drôtu pri rezaní bol hlavnou príčinou výskytu enormných drsností R_z , ktorá v najhoršom prípade predstavovala $72,502 \mu\text{m}$. Vysoký prúd výboja ($I = 30\text{A}$), ktorý podľa analýzy na obr. 4.17 spôsobil vznik hlbokých kráterov zobrazených na obr. 4.21, mal za následok aj rozsiahle povrchové trhliny pri týchto vzorkách. Najvyššia kvalita povrchu $R_z = 40,553 \mu\text{m}$ bola dosiahnutá za podmienok (tab. 4.7) ktoré boli zhodné s vytvorenou analýzou. Čím bola vyššia v_c , tým bol aj horší získaný povrch, často spôsobený aj skratmi.

Elektroerozívne procesy nevplývali dobre na keramiku, pri početných výbuchoch a kvôli kumulovanému ťahovému napätiu došlo k rýchlemu rozšíreniu trhlín, ktoré následne zapríčinili aj odlupovanie materiálu za vzniku výrazných nerovností. Vzhľadom na dosiahnutú minimálnu drsnosť, je nutné vykonať niekoľko dokončovacích rezov, aby bola docieľená štandardná kvalita povrchu. Povrch rezanej keramiky, ako je zobrazené na obr. 4.22, bol kontaminovaný prvkami elektródy len v minimálnom množstve, keďže podľa literatúry [40] môže byť kontaminácia aj viac než 10 hm. %. Nedošlo k strate požadovaných vlastností.

Jav odlupovania materiálu bol najvýraznejšie zaznamenaný pri analýze šírky rezu. Tú okrem menených parametrov na stroji ovplyvňuje aj bod tavenia obrábaného materiálu. To bolo jedným z dôvodov, prečo pri nastavení vysokej energie výboja a teda aj napätia U šírka rezu dosahovala dobré výsledky (obr. 4.28). Pri vyhodnotení dát bola zaznamenaná najužšia šírka rezu $D = 323 \mu\text{m}$, na vzorke č. 7 (obr. 6.1), pri ktorej bola zároveň nameraná najhoršia drsnosť povrchu $R_z = 72,502 \mu\text{m}$. Vplyvom vysokých nerovností viditeľných na obr. 6.1, vrcholy na povrchu striedajú hlboké zárezy. Metóda merania hodnotila práve priemernú vzdialenosť opačných plôch zo vzdialeností vo viacerých bodoch. Preto bola šírka iskrovej medzery vyhodnotená na takej nízkej úrovni.



Obr. 6.1 Vady vyskytujúce sa v šírke rezu u vzorky č. 7 s parametrami:
 $U = 60 \text{ V}$, $T_{\text{on}} = 8 \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 50 \mu\text{s}$, $v = 12 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $I = 30 \text{ A}$.

K porušovaniu drôtu podľa analýzy na obr.4.31 dochádzalo predovšetkým pri hodnote parametru $T_{\text{off}} = 40 \mu\text{s}$. Tým nebol dosiahnutý dostatočný výplach štrbiny a drôt bol v kontakte s odstránenými časticami, čo viedlo ku sekundárnej elektroerózii, prípadne skratu.

Po zohľadnení všetkých faktorov, kde najvyššiu úlohu zohrala plynulosť rezania, bola vyhodnotená ako najvhodnejšia kombinácia parametrov použitá pri vzorke č. 3, kde $U = 60 \text{ V}$, $T_{\text{on}} = 8 \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 50 \mu\text{s}$, $v = 12 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $I = 20 \text{ A}$. Tab. 4.13 zobrazuje výstupné veličiny vlastné tejto vzorke.

ZÁVER

Predkladaná diplomová práca bola zameraná na riešenie problematiky drôtového elektroerozívneho obrábania (*WEDM*) technickej keramiky na báze *SiC*. Pri obrábaní bolo zámerom vytvoriť povrch s čo najmenším množstvom trhlín a vád a určiť procesné parametre, ktoré zabezpečia stabilné obrábanie.

Teoretická časť pozostávala z vysvetlenia elektroerózie ako takej, rozboru *WEDM* technológie a vlastností obrábanej technickej keramiky na báze *SiC*, ktoré slúžili k pochopeniu problému elektroerozívneho obrábania technickej keramiky.

Voľba drôtu bola podmienená snahou, čo najviac sprístupniť *WEDM* rezanie *SiSiC* keramiky technickej praxi. Preto boli testy a následný experiment vykonávané bežne dostupnými mosadznými drôtmí. Návrh procesných parametrov pozostával z voľby vhodnej technológie z databázy stroja a následného experimentálneho overenia. Bolo zistené, že prednastavené hodnoty je nutné upraviť ešte pred začatím rezania a to znížením doby impulzu a zvýšením doby pauzy aspoň o dva stupne. Z vykonaných prvotných testov *WEDM* rezania vyplynuli nasledujúce poznatky.

- Stabilita *WEDM* rezania *SiSiC* keramiky závisí na čistote materiálu, narazením na nevodivú časticu dochádza ku skratu a prípadne trhlinám, ktoré môžu byť pre súčiastku fatálne.
- Bola dokázaná plynulosť rezu aj pri použití bežného mosadzného drôtu (37 % *Zn*, 63 % *Cu*).

Nadväzujúci experiment pozostával z rezania osemnástich vzoriek určených k podrobnej analýze vplyvu vstupných procesných parametrov na výslednú kvalitu povrchu. Každá vzorka bola obrábaná za rozdielnych podmienok rozdelených do troch levelov podľa svojej veľkosti (tab. 4.3), pričom na stroji boli menené parametre T_{on} , T_{off} , I , U , v . Zo získaných hodnôt výstupných veličín (rezná rýchlosť v_c , počet pretrhnutí drôtu B , parametre drsnosti Ra , Rq , Rz , Sa , Sq , Sz , šírka rezu D) boli na základe analýz vyvodené závery.

- Pre zrýchlenie procesu a získanie lepšej stability obrábania bolo výhodné zvoliť mosadzný drôt s vyšším podielom *Zn* a teda zložením (40 % *Zn*, 60 % *Cu*). Nevznikla potreba využitia drahého povlakovaného drôtu.
- Na veľkosť reznej rýchlosti v_c mali hlavný vplyv I , T_{on} , T_{off} . Pričom nastavenie I , T_{on} na najvyšší level ($I = 30$ A; $T_{on} = 10$ μ s) a T_{off} na najnižší ($T_{off} = 40$ μ s) viedlo k získaniu najväčšej rýchlosti rezania $v_c = 5.6$ m·min⁻¹, ale zároveň k nestabilnému procesu.
- Analyzované hodnoty drsnosti Ra , Rz záviseli primárne na I a T_{off} . Na docielenie čo najlepšej kvality povrchu bolo nutné nastaviť I na minimálny level ($I = 20$ A) a T_{off} na maximálny ($T_{off} = 60$ μ s). Parameter I mal za následok vznik hlbokých kráterov. Predĺženie T_{off} spôsobilo lepší výplach miesta rezu a tým menšie množstvo opätovne stuhnutého materiálu na povrchu obrobku. Najnižšia dosiahnutá drsnosť Rz bola stanovená za vyššie spomenutých podmienok, kde $Rz = 40,553$ μ m.
- *WEDM* rezaním *SiSiC* keramiky nevzniká problém kontaminácie povrchu časticami uvoľnenými z elektródy.

- Šírka rezu D bola výrazne ovplyvnená parametrom U . Najvyšší level nastavenia ($U = 70$ V) spôsobil nežiaduce rozširovanie šírky rezu bez ohľadu na veľkosť zvyšných parametrov. Vyhnutím sa extrémnym hodnotám U , bolo možné dosiahnuť vyhovujúcu šírku rezu D .
- Na množstvo porušení drôtu B mal závažný účinok T_{off} . Pričom k nepretržitému rezaniu došlo len pri rezaní necelých 30 % vzoriek. Predĺženie výplachu parametrom T_{off} zabezpečilo pokles teploty v kanáli a znížilo množstvo kontaktov elektródy s odobratými časticami.
- Najvhodnejšia kombinácia procesných parametrov v sebe zahŕňala podmienku nepretržitého chodu $B = 0$, nadpriemerné hodnoty drsnosti Rz a šírky rezu D . Podmienka pre v_c bola, aby sa čo najviac blížila priemernej hodnote (obr. 4.37). To splnila vzorka č. 3 aj vďaka dobrej integrite povrchu, bez zjavných povrchových trhlín a hlbokých kráterov, ktoré sú pre keramiku fatálne.
- Veľkosti najlepšie hodnotenej kombinácie parametrov boli: $T_{on} = 8$ μ s, $T_{off} = 50$ μ s, $I = 20$ A, $U = 60$ V, $v = 12$ m \cdot min $^{-1}$.
- Technicko-ekonomické zhodnotenie ukázalo, že časté porušovanie drôtu môže niekoľkonásobne navýšiť náklady na materiál a chod stroja. Následne bol vykonaný prepočet nákladov pri obrábaní súčasti technológiou podľa vzorky č. 3. Náklady sa vzťahovali na výskumné pracovisko, preto boli uvedené hodnoty dielčích nákladov nižšie, než by tomu bolo vo výrobnom podniku. Celkové náklady $N_c = 742,53$ Kč \cdot ks $^{-1}$ boli tvorené z 95 % samotným procesom obrábania.

Z vykonaných testov a experimentu je možno usúdiť, že *WEDM* rezanie technickej keramiky prináša so sebou množstvo úskalí. Rezanie za vyššej v_c je sprevádzané v najlepšom prípade vysokou výstupnou drsnosťou povrchu. Výhodou je, že po odladení technológie je možné rezať aj drôtom z nižšej cenovej kategórie a nie sú nutné drahé povlakované drôty. Vzhľadom na vysokú drsnosť povrchu, je potrebné vykonávať ešte niekoľko dokončovacích rezov, aby sa docielila výborná drsnosť charakteristická pre túto technológiu. Najpodstatnejším faktorom *WEDM* rezania *SiSiC* keramiky je veľká čistota materiálu, bez zaručenia tohto faktu, nie je možné využívať technológiu na obchodné účely.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 2. vyd. Viena, 2000, 275 s. ISBN 8070994304.
- [2] BOLJANOVIC, Vukota. *Metal Shaping Processes*. New York: Industrial Press, Inc., 2009, 428 s. ISBN ISBN 978-0-8311-3380.
- [3] MOURALOVA, K., KOVAR, J., KLAKURKOVA, L., PROKES, T. a HORYNOVA, M. Comparison of *morphology and topography of surfaces of WEDM machined structural materials*. Measurement [online]. Elsevier Ltd, 2017, 104, 12-20 [cit. 2020-06-21]. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.03.009. ISSN 0263-2241.
- [4] JAMESON, Elman. *Electrical discharge machining*. Dearborn, Mich: Society of Manufacturing Engineers, Machining Technology Association, 2001, xii, 329 s. : il. ; 24 cm. ISBN 0-87263-521-X.
- [5] SOMMER, Steve a SOMMER, Carl. *Complete EDM Handbook*. 2 vyd. Advance Publishing Incorporated TX, 2017. ISBN 978-1575373034. Dostupné z: <http://www.reliableedm.com/handbook.php>
- [6] YADAV, R. N. a YADAVA, V., *Electrical discharge grinding (EDG):A review* [online]. Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering, 2012, [cit 2020-01-07]. Dostupné z: https://pdfs.semanticscholar.org/4bc9/93c67b2b3af2477251fc6b13579d06da8d20.pdf?_ga=2.106511111.563644066.1592780836-1304557548.1591784791
- [7] DROZDA, Thomas. *Tool and Manufacturing Engineers Handbook: Machining v. 1. 4*. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1983. ISBN 978-0872630857.
- [8] ROMAN, Radovan. EDM=Elektroiskrové obrábanie (Electro Discharge Machining). *TriboTechnika*. Žilina: Vydavateľstvo Techpark,o.z, 2013, 6(4), 14-15. ISSN 1338-0524.
- [9] ASM – Metals Handbook. Volume 16, *Machining*. 9. Ohio: ASM International, 1989. ISBN 0871700220.
- [10] LELÁK, Jaroslav. Meranie elektrickej pevnosti izolantov. *MatNet.sav* [online]. ©2006-2020 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=360>
- [11] KOČMAN, Karel a PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [12] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [13] FLEMING, Benjamin. *The EDM How-To Book*. Fleming Publications, 2005. ISBN 978-0976759607.

- [14] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-518-9.
- [15] STORR, Manfred. *Important facts about spark erosion*. In: *Oelheld* [online]. 2006 [cit. 2020-01-9]. Dostupné z: https://www.oelheld.com/fileadmin/content/Broschueren/EN/Important_facts_about_spark_erosion_-BR-_EN_01.pdf
- [16] CHAKRABORTY, S, V DEY a GHOSH, S. K.. A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics. *Precision Engineering* [online]. Elsevier Inc, 2015, 40, 1-6 [cit. 2020-03-15]. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.11.003. ISSN 0141-6359.
- [17] KUMAR, Vinay, KUMAR Amit, KUMAR Sanjay a SINGH, N. K.. Comparative Study of Powder Mixed EDM and Conventional EDM Using Response Surface Methodology. *Materials Today: Proceedings* [online]. Elsevier Ltd, 2018, 5(9), 18089-18094 [cit. 2020-03-15]. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.143. ISSN 2214-7853.
- [18] EL-HOFY, Hassan. *Advanced Machining Processes: Nontraditional and Hybrid Machining Processes*. 1. vyd. McGraw-Hill Education, 2005. ISBN 978-0071453349.
- [19] POCO EDM Graphite: *Průvodce správné volby*. *Edmtechman* [online]. ©2012 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: http://www.edmtechman.com/library/EDM_Selection_Guide-Czech.pdf
- [20] STRAKA, Ľuboslav a Slavomíra HAŠOVÁ. Study of Tool Electrode Wear in EDM Process. *Key Engineering Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2016, 669, 302-310 [cit. 2020-03-15]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.669.302. ISBN 9783038356295. ISSN 1013-9826.
- [21] CZELUSNIAK, Tiago, Camila HIGA, Ricardo TORRES, Carlos LAURINDO, José PAIVA JÚNIOR, Armin LOHRENGEL a Fred AMORIM. Materials used for sinking EDM electrodes: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, 41(1), 1-25 [cit. 2020-01-29]. DOI: 10.1007/s40430-018-1520-y. ISSN 1678-5878.
- [22] SMIRNOV, A., A. SELEZNEV, N.W.S. PINARGOTE, Y. PRISTINSKIY, P. PERETYAGIN a J.F. BARTOLOMÉ. The influence of wire electrical discharge machining cutting parameters on the surface roughness and flexural strength of ZrO₂/TiN ceramic nanocomposites obtained by spark plasma sintering. *Nanomaterials* [online]. MDPI AG, 2019, 9(10) [cit. 2020-06-11]. DOI: 10.3390/nano9101391. ISSN 20794991.
- [23] KLOCKE, F, S SCHNEIDER, L EHLE, H MEYER, L HENSGEN a A KLINK. Investigations on Surface Integrity of Heat Treated 42CrMo4 (AISI 4140) Processed by Sinking EDM. In: *Procedia CIRP* [online]. Elsevier B.V, 2016, s. 580-585 [cit. 2020-01-30]. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.263. ISSN 2212-8271.
- [24] ZEILMANN, Rodrigo, Thiago VACARO, Fernando ZANOTTO a Mariana CZARNOBAY. Metallurgical alterations in the surface of steel cavities machined by

- EDM. Matéria (Rio de Janeiro) [online]. *Rede Latino-Americana de Materiais*, 2013, 18(4), 1541-1548 [cit. 2020-01-30]. DOI: 10.1590/S1517-70762013000400014. ISSN 1517-7076.
Dostupné z: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762013000400014&lng=en&tlng=en
- [25] KAWATA, Akiyoshi, Akira OKADA, Yasuhiro OKAMOTO a Haruya KURIHARA. Influence of Nozzle Jet Flushing on Wire Breakage in 1st-Cut Wire EDM from Start Hole. In: *Key Engineering Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2017, s. 130-135 [cit. 2020-03-15]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.749.130. ISBN 9783035711011. ISSN 1013-9826.
- [26] Wire EDM. *Manufacturing guide* [online]. Stockholm: Manufacturing Guide Sweden AB [cit. 2020-02-5]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/wire-edm>
- [27] PROHASZKA, J, A.G MAMALIS a N.M VAXEVANIDIS. The effect of electrode material on machinability in wire electro-discharge machining. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 1997, 69(1-3), 233-237 [cit. 2020-02-2]. DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00024-1. ISSN 0924-0136.
- [28] BUD GUITRAU, E.. EDM wire selection. In: *Novotec-edm* [online]. © 2013-2020 [cit. 2020-02-6]. Dostupné z: <https://www.novotec-edm.com/wire-selection>
- [29] PRAMANIK, A a A.K BASAK. Degradation of wire electrode during electrical discharge machining of metal matrix composites. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2016, 346-347(), 124-131 [cit. 2020-03-16]. DOI: 10.1016/j.wear.2015.11.011. ISSN 0043-1648.
- [30] ABYAR, Hamid, Amir ABDULLAH a Abdolhamid AKBARZADEH. Analyzing wire deflection errors of WEDM process on small arced corners. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. Elsevier Ltd, 2018, 36, 216-223 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.10.002. ISSN 1526-6125.
- [31] UHLMANN, Eckart, Markus RÖHNER, Malte LANGMACK a assilo-M. SCHIMMELPFENNIG. *Chapter 4 - Micro-electrical Discharge Machining. Micromanufacturing Engineering and Technology*. 2. vyd. William Andrew Publishing, 2015, 81-105 s. DOI: 10.1016/B978-0-323-31149-6.00004-9. ISBN 9780323311496.
- [32] TICHÝ, Štěpán. *Technologie drátové elektroeroze*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [33] LEE, Cheol-soo, Eun-young HEO, Jong-min KIM, In-hugh CHOI a Dong-won KIM. Electrode wear estimation model for EDM drilling. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* [online]. Elsevier Ltd, 2015, 36, 70-75 [cit. 2020-04-25]. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.02.001. ISSN 0736-5845.
- [34] Svenska Tanso ABE. Electrode material. In: *Tanso* [online]. ©2020 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <http://www.tanso.se/en/produkter/edm-drilling/electrode-material-2/>

- [35] PFLUGER, Brian. Ask the expert: Q&A on wire EDM slug removal. In: *Competitive Mold Maker: The publication from MAKINO that molds more competitive companies* [online]. 2015, 21(1), 8 [cit. 2020-02-15].
Dostupné z: <https://www.moldmakermag.com/articles/wire-edm-slug-removal/>
- [36] ALBERT, Mark. A Stitch in Time-A New Core-Retention Function for Wire EDM. In: *Modern Machine Shop* [online]. ProQuest Central, 08, 2017, vol. 90, no. 3. pp. 28-28, 30 [cit. 2020-02-20]. ISSN 00268003.
Dostupné z: <https://search.proquest.com/docview/1927143538>
- [37] SANCHEZ, J.A, J.L RODIL, A HERRERO, L.N. DE LACALLE a A LAMIKIZ. On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire-EDM corner-cutting. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2007, 182(1), 574-579 [cit. 2020-02-16]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.09.030. ISSN 0924-0136.
- [38] ROGERS, Barry. Buying a Wire EDM, Part 3: Speed, Accuracy and Finish. *Mmsonline* [online]. 2018-10-14 [cit. 2020-06-22].
Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/blog/post/buying-a-wire-edm-speed-accuracy-and-finish>
- [39] SHANAHAN, E. John. Machining Variables Influencing High-Performance Wire EDM. *Moldmakingtechnology* [online]. 2004-1-2 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/high-performance-wire-edm-speed-isn't-everything>
- [40] REOLON, Luca, Carlos HENNING LAURINDO, Ricardo TORRES a Fred AMORIM. WEDM performance and surface integrity of Inconel alloy IN718 with coated and uncoated wires. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer London, 2019, 100(5), 1981-1991 [cit. 2020-06-12]. DOI: 10.1007/s00170-018-2828-6. ISSN 0268-3768.
- [41] RUFÉ, Philip, D. *Fundamentals of Manufacturing. 3rd Edition*. Society of Manufacturing Engineers (SME), ©2013. ISBN 9780872638709. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpFME00023/viewerType:toc//root_slug:fundamentals-manufacturing/url_slug:fundamentals-manufacturing
- [42] O'BRIEN, Annette a SINNES, Kathy. *Welding Handbook: Volume 5 - Materials and Applications, Part 2*. 9. vyd. American Welding Society (AWS), ©2015. ISBN 9780871718563. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpWHVMAP13/viewerType:toc//root_slug:welding-handbook-volume/url_slug:welding-handbook-volume
- [43] CeramTec ceramic materials: Technical Ceramics from The Ceramic Experts. In: *CeramTec* [online]. ©2007–2020 [cit. 2020-02-20].
Dostupné z: <https://www.ceramtec.com/ceramic-materials/>
- [44] GORIN, Alexander a M., REDDY. Advanced Ceramics: Some Challenges and Solutions in Machining by Conventional Methods. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 42-47 [cit. 2020-03-2]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.624.42.

- [45] BIERMANN, Dirk a WÜRZ, Evelyn. Leistung steigern beim Schleifen keramischer Werkstoffe. *MM MaschinenMarkt*. Vogel, 2009, 41(9), 26-28.
- [46] BILAL, A. , Mp., JAHAN, D., TALAMONA a A., PERVEEN. Electro-Discharge Machining of Ceramics: A Review. *Micromachines* [online]. MDPI, 2019, 10(1) [cit. 2020-03-2]. DOI: 10.3390/mi10010010. ISSN 2072-666X.
- [47] ZHAO, Yonghua, Masanori KUNIEDA a Kohzoh ABE. Study of EDM cutting of single crystal silicon carbide. *Precision Engineering* [online]. Elsevier Inc, 2014, 38(1), 92-99 [cit. 2020-03-3]. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2013.07.008. ISSN 0141-6359.
- [48] CARTER, C., a M., NORTON. *Ceramic materials: science and engineering*. 2. vyd. New York: Springer, 2013, 766 s. ISBN 978-1-4614-3522-8.
- [49] SOMIYA, Shigeyuki a Yoshizo INOMATA. *Silicon Carbide Ceramics—1: Fundamental and Solid Reaction*. London: Elsevier, 1991. ISBN 1-85166-560-9.
- [50] HERRMANN, Mathias. Chapter 3.4 - Ceramic Bearings and Seals,. In: SOMIYA, Shigeyuki. *Handbook of Advanced Ceramics (Second Edition)* [online]. Academic Press, 2013. DOI: 10.1016/B978-0-12-385469-8.00017-4. ISBN ISBN 9780123854698.
Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123854698000174>
- [51] KOPELIOVICH, Dmitri. Fabrication of Ceramic Matrix Composites by Liquid Silicon Infiltration (LSI). In: *Substech* [online]. 2012 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z:
https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=fabrication_of_ceramic_matrix_composites_by_liquid_silicon_infiltration_lsi
- [52] ROCAR: Karbid křemíku. In: *CeramTec* [online]. ©2007–2020 [cit. 2020-04-05].
Dostupné z:
https://www.ceramtec.com/files/cz_rocar_cz.pdf?fbclid=IwAR1JIXFo3UL89UHcK9jL0PQraD39t9VAWi5YxCAK4Gr96J4hdwIWHNYul_I
- [53] FANUC ROBOCUT α -C600iB. In: *Penta-edm* [online]. ©2017-2020 [cit. 2020-06-08].
Dostupné z: <https://www.penta-edm.cz/fanuc-robocut-a-c600ib-dratova-rezacka/>
- [54] Bruker Dektak XT stylus profilometer. *Nano.yale* [online]. ©2020 [cit. 2020-06-08].
Dostupné z: <https://nano.yale.edu/book/export/html/24>
- [55] SEM-FIB Tescan Lyra. In: *Scientificservices* [online]. 2015 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://scientificservices.eu/item/sem-fib-tescan-lyra/1393>
- [56] OSIČKA, Karel. Technologické a ekonomické aspekty provozu CNC obráběcích strojů. [přednáška]. Brno: Přednášky z předmětu HTR, 2020.
- [57] Makino EU 64 CNC laser cutting machine. In: *Exapro* [online]. ©2004–2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.exapro.com/makino-eu-64-cnc-p91004037/?exaspot=1>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbol	Význam	Jednotky
A_{c1}	Teplota, pri ktorej vzniká austenit	[°C]
B	Počet pretrhnutí drôtu	[-]
C	Kapacita kondenzátora	[F]
d	Vzdialenosť medzi elektródami	[m]
D	Šírka rezu	[μm]
E_p	Elektrická pevnosť izolantu	[V·m ⁻¹]
f	Frekvencia výboja	[s ⁻¹]
FR	Tlak výplachu	[-]
HRC	Tvrdosť podľa Rockwella	[-]
I	Prúd výboja	[A]
K	Konštanta úmernosti	[-]
K_c	Experimentálne zistená konštanta	[-]
L_{Di}	Spotreba drôtu	[m]
N_{Aps}	Jednicové náklady prevádzky stroja	[Kč·ks ⁻¹]
N_{Bps}	Dávkové náklady prevádzky stroja	[Kč·ks ⁻¹]
N_c	Celkové náklady na rezanie vybranou technológiou	[Kč·ks ⁻¹]
N_{Di}	Náklady na spotrebovaný drôt	[Kč]
N_i	Celkové náklady na rezanie jednotlivých vzoriek	[Kč]
N_{RPS}	Režijné náklady prevádzky stroja	[Kč·ks ⁻¹]
N_{sm}	Náklady na spotrebný materiál	[Kč·ks ⁻¹]
N_U	Náklady na údržbu stroja	[Kč·ks ⁻¹]
OFF	Doba pauzy	[-]
ON	Doba impulzu	[-]
Q_v	Množstvo odobratého materiálu	[mm ³ ·s ⁻¹]
r	Experimentálne zistená konštanta	[-]
R_{max}	Maximálna výška profilu obrobku	[μm]
R_a	Priemerná aritmetická odchýlka profilu	[μm]
R_q	Stredná kvadratická odchýlka profilu	[μm]
R_z	Najvyššia výška profilu	[μm]
S_a	Priemerná aritmetická odchýlka povrchu	[μm]
S_q	Priemerná kvadratická odchýlka povrchu	[μm]
SV	Servo napätie	[-]
Sz	Výška z desiatich bodov povrchu	[μm]
T	Doba periódy	[s]
t_i	Doba rezania	[min]
t_{mA}	Jednotkový čas stroja	[min]
t_{mA4}	Jednotkový čas chodu stroja	[min]
t_{mA5}	Jednotkový čas stroja v pokoji	[min]
T_{off}	Doba pauzy	[μs]
T_{on}	Doba impulzu	[μs]
U	Napätie výboja	[V]
U_c	Prie1irazové napätie	[V]
U_p	Prierazné napätie izolantu	[V]
v	Rýchlosť odvíjania drôtu	[m·min ⁻¹]
v_c	Rezná rýchlosť	[mm·min ⁻¹]
V_i	Objemové množstvo odobraného materiálu	[mm ³]
V_n	Objemové opotrebenie nástroja	[mm ³]
V_o	Odobratý objem materiálu	[mm ³]

Symbol	Význam	Jednotky
W_j	Energia impulzu	[J]
W_k	Energia na kondenzátore	[J]
α	Hladina významnosti	[-]
η	Účinnosť generátoru	[-]
γ	Relatívny objemový úbytok	[%]

Skratka	Význam
Al	Hliník
Al₂O₃	Oxid hlinitý, alumina
ANOVA	Analysis of Variance (Analýza rozptylu)
BN	Nitrid boritý
CBN	Kubický nitrid bóru
CNC	Computer Numerical Control (Počítačové číselne riadenie)
CO	Oxid uhoľnatý
Cr	Chróm
Cu	Meď
EDG	Electrical Discharge Grinding (Elektroerozívne brúsenie)
EDM	Electrical Discharge Machining (Elektroerozívne obrábanie)
EDX	Energy-dispersive X-ray (Energiovo disperzný X-lúč)
HCl	Kyselina chlorovodíková
NaOH	Hydroxid sodný
NC	Numerical control (Číselné riadenie)
PKD	Polykryštalický diamant
PMEDM	Powder Mixed Electric Discharge Machining (Elektroerozívne obrábanie s kovovým práškom)
RC	Obvod s odporom a kondenzátorom
RLC	Obvod s odporom, cievkou, kondenzátorom
SEM	Scanning Electron Microscope (Skenovacia elektrónová mikroskopia)
Si	Kremík
Si₃N₄	Nitrid kremičitý
SiC	Karbid kremíka
SiN₄	Nitrid kremíka
SiO₂	Oxid kremičitý
Ti	Titán
TiC	Karbid titánu
W	Volfrám
WEDM	Wire Electrical Discharge Machining (Drôtové elektroerozívne obrábanie)
Zn	Zinok
ZnO	Oxid zinočnatý
Zr₂O	Oxid zirkoničitý
μ-EDM	Micro-Electro Discharge Machining (Mikro elektroerozívne obrábanie)

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha č. 1	Vlastnosti použitého materiálu
Príloha č. 2	Technický list stroja MAKINO EU 64
Príloha č. 3	Technický list stroja FANUC ROBOCUT α -C600iB
Príloha č. 4	Mikrosnímky osemnástich vzoriek
Príloha č. 5	Hodnoty šírky rezu na osemnástich vzorkách