VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ELEKTROEROZIVNÍ HLOUBENÍ TECHNICKÉ KERAMIKY
ELECTROEROSIVE SINKING OF TECHNICAL CERAMICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Tomáš Kudrna
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Karel Osička, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Bc. Tomáš Kudrna**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
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 hloubení 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 EDM hloubení.

Cíle diplomové práce:

Základní rozbor technologie EDM hloubení.
Rozbor vlastností materiálu na bázi SiC.
Návrh materiálu a tvaru elektrod pro experiment.
Návrh variant parametrů EDM hloubení pro materiál na bázi SiC.
Experimentální odzkoušení jednotlivých kombinací parametrů EDM hloubení.
Vyhodnocení experimentu z hlediska kvality povrchu obrobku a opotřebení elektrody.
Výběr optimální varianty nastavení parametrů EDM hloubení a její ekonomické vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

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

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

KOCMAN, 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

Diplomová práce se zabývá elektroerozivním obráběním. První část práce se věnuje studii technologie elektroerozivního hloubení. V experimentální části je provedeno elektroerozivní hloubení keramiky na bázi karbidu křemíku. Následné vyhodnocení zkoumá vliv technologických parametrů EDM hloubení, konkrétně pracovního proudu, zapalovacího napětí a času jednoho pulzu, na kvalitu obrobeného povrchu. Dále byl proveden rozbor nástrojových elektrod, zkoumáno bylo opotřebení v rozích, jedná se o nejvíce opotřebovávanou část elektrody, která má klíčový vliv na hloubení dle požadovaných rozměrů v dané přesnosti. Zkoumána byla také rychlost obrábění.

Klíčová slova

Elektroerozivní obrábění, EDM, elektroerozivní hloubení, keramika na bázi karbidu křemíku, opotřebení nástrojové elektrody

ABSTRACT

The master's thesis deals with the topic of electrical discharge machining. The first part of the thesis contains a study of the die-sinking EDM. The die-sinking EDM of the silicon carbide ceramic is realized in the experimental part of the thesis. The result of this work was to explore the influence of the EDM sinking parameters, specifically pulse current, open-voltage and pulse on-time, on the machined surface. Furthermore, the analysis of the tool electrode was made. This analysis was focused on the wear in the corners, which has key influence on accuracy of the machining. The machining time was also examined.

Key words

Electrical discharge machining, EDM, die-sinking EDM, silicon carbide ceramic, tool electrode wear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUDRNA, Tomáš. *Elektroerozivní hloubení technické keramiky* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124705. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osička.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Elektroerozivní hloubení technické keramiky* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

19. 6. 2020	
Datum	Bc. Tomáš Kudrna

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto mému vedoucímu práce Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi při vypracování diplomové práce poskytl. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Kateřině Mouralové, Ph.D. za odbornou pomoc při tvorbě této práce.

Chtěl bych tímto také poděkovat společnosti PENTA TRADING, spol s r.o., za umožnění provedení experimentální části diplomové práce v podmínkách této společnosti, dále děkuji všem jejím zaměstnancům za pomoc a poskytnuté rady.

Část práce byla provedena za podpory výzkumné infrastruktury CzechNanoLab (ID LM2018110, MŠMT, 2020–2022), CEITEC Vysoké učení technické v Brně.

OBSAH

ÚVOD 9
1 ROZBOR ELEKTROEROZIVNÍHO OBRÁBĚNÍ 10
1.1 Historie elektroerozivního obrábění 10
1.2 Princip elektroerozivního obrábění 10
1.2.1 Druhy elektrického výboje při elektroerozivním obrábění 11
1.2.2 Fáze elektrického výboje 12
1.3 Parametry elektroerozivního obrábění 14
1.4 Povrch a přesnost elektroerozivního obrábění 17
1.5 Druhy elektroerozivního obrábění 19
1.5.1 Elektroerozivní drátové řezání 19
1.5.2 Elektroerozivní vrtání 20
1.5.3 Elektroerozivní frézování 21
1.5.4 Elektroerozivní broušení 22
1.5.5 Elektroerozivní hloubení 22
1.6 Nástrojové elektrody 24
1.6.1 Materiály nástrojových elektrod 25
1.6.2 Příprava nástrojových elektrod 26
1.7 Dielektrikum 27
1.7.1 Funkce dielektrika 27
1.7.2 Druhy dielektrika 27
1.7.3 Způsoby výplachu dielektrika 28
1.8 Stroje pro elektroerozivní hloubení 29
1.8.1 Části elektroerozivních hloubicích strojů 29
1.8.2 Konstrukce hloubicích strojů 30
1.8.3 Řídicí a polohovací systém 30
1.8.4 Generátory elektroerozivních strojů 31
1.8.5 Upínací systém 32
1.8.6 Čerpací a filtrační systém 33
2 ROZBOR TECHNICKÉ KERAMIKY NA BÁZI KARBIDU KŘEMÍKU 35
2.1 Klasifikace technické keramiky 35
2.2 Výroba keramiky na bázi karbidu křemíku 36
2.3 Vlastnosti keramiky na bázi karbidu křemíku 37
2.3.1 Mechanické vlastnosti keramiky na bázi karbidu křemíku 37
2.3.2 Tepelné vlastnosti keramiky na bázi karbidu křemíku 38
2.3.3 Elektrické vlastnosti keramiky na bázi karbidu křemíku 38
2.4 Použití keramiky na bázi karbidu křemíku 38
2.5 Způsoby obrábění keramiky na bázi karbidu křemíku 39
3 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO EDM HLOUBENÍ TECHNICKÉ KERAMIKY 43
3.1 Představení společnosti PENTA TRADING, spol. s r.o. 43

3.2 Podmínky experimentu 44
3.2.1 Použitý stroj pro elektroerozivní hloubení 44
3.2.2 Hloubený obrobek 45
3.2.3 Návrh nástrojové elektrody 46
3.2.4 Pracovní prostředí 47
3.3 Návrh technologických parametrů EDM hloubení 47
4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENtÁLNÍHO EDM HLOUBENÍ 49
4.1 Vyhodnocení experimentu na základě úběru materiálu 49
4.2 Analýza topografie obrobených vzorků 51
4.3 Analýza morfologie povrchu 54
4.3.1 Chemické složení povrchu 54
4.3.2 Morfologie povrchu hloubených vzorků 55
4.3.3 Morfologie povrchu nástrojových elektrod 57
4.4 Analýza opotřebení nástrojových elektrod 58
4.4.1 Opotřebení nástrojových elektrod z boku 58
4.4.2 Opotřebení nástrojových elektrod v rozích z pohledu shora 61
4.4.3 Přesnost erodovaných rohů na obrobku 62
5 DISKUZE 65
5.1 Výběr optimálních variant nastavení parametrů EDM hloubení 65
5.2 Ekonomické vyhodnocení 65
5.2.1 Náklady na provoz stroje za hodinu 65
5.2.2 Porovnání nákladů variant nastavení parametrů EDM hloubení 68
ZÁVĚR 69
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 70
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 76
SEZNAM PŘÍLOH 79

ÚVOD

Elektroerozivní obrábění (zvané také zkratkou EDM – z anglického Electrical discharge machining) se řadí mezi nekonvenční obráběcí metody. Metodou elektroerozivního obrábění lze obrábět materiály, které jsou konvenčními způsoby těžce obrobitelné z důvodu jejich mechanických vlastností jako jsou velmi vysoká tvrdost a křehkost. Elektroerozivní obrábění není ovlivněno mechanickými vlastnostmi obrobku, jedná se o bezkontaktní metodu, při které nedochází k silovému namáhání obráběného materiálu. Úběr materiálu je způsoben vznikajícími elektrickými výboji mezi nástrojovou elektrodou a obráběným materiálem. Aby byl materiál obrobitelný elektroerozivním obráběním, musí splňovat podmínku dostatečné elektrické vodivosti.

V posledních letech roste zájem o obrábění technické keramiky, která má širokou škálu využití díky jejím vlastnostem, jako jsou odolnost proti korozi a opotřebení. Materiály z technické keramiky si tyto vlastnosti umí zachovat i za velmi vysokých teplot. Obrábění keramických materiálů zaujímá velký podíl nákladů, obzvlášť pokud se jedná o složité tvary, které není možné obrábět konvenčním obráběním [1, 2].

Tato diplomová práce je zaměřena na keramiku na bázi karbidu křemíku, jejíž použití je možné v mnoha průmyslových odvětvích. Pro plné využití potenciálu materiálů z technické keramiky na bázi karbidu křemíku je potřeba vyvinout metodu obrábění, která by snížila finanční náročnost zpracování tohoto materiálu a zároveň nezpůsobovala degradaci materiálových vlastností. Při obrábění keramických materiálů na bázi karbidu křemíku se dosahuje malé hodnoty objemového úběru materiálu, a naopak velkého opotřebení nástroje, což zapříčiňuje vysokou cenu obráběcího procesu. Elektroerozivní obrábění je vhodnou metodou pro obrábění materiálu na bázi karbidu křemíku, lze jí obrábět i složité geometrické tvary se zajištěním dostatečné kvality povrchu. Klíčové je volit vhodné technické parametry elektroerozivního obrábění pro dosažení požadované kvality povrchu, bez vzniku prasklin, k čemuž má keramiky na bázi karbidu křemíku sklony. Zároveň je vyžadováno dosáhnout co největší hodnoty objemového úběru materiálu a nízkého opotřebení nástrojové elektrody. V experimentální části diplomové práce je provedeno elektroerozivní hloubení materiálu z technické keramiky na bázi karbidu křemíku v podmínkách firmy PENTA TRADING, spol. s r.o. [3, 4, 5].

1 ROZBOR ELEKTROEROZIVNÍHO OBRÁBĚNÍ

Při elektroerozivním obrábění dochází k úběru materiálu pomocí elektrického výboje mezi katodou a anodou v podobě nástrojové elektrody a obrobku v prostředí dielektrika. V následující kapitole je podrobně popsán fyzikální princip průběhu elektrotepelného procesu elektroeroze, dále jsou rozebrány základní prvky a parametry elektroerozivního obrábění se zaměřením na elektroerozivní hloubení.

1.1 Historie elektroerozivního obrábění

Přestože se elektroerozivní obrábění využívá v průmyslových aplikacích poměrně krátce, historie objevení elektroerozivního jevu sahá až do roku 1768. Tehdy anglický fyzik Joseph Priestley objevil erozivní efekt elektrického výboje, když si všiml vzniku kráterů na povrchu vodičů z kovu. Avšak tento jev se pro obrábění začal využívat až ve 20. století. V období mezi světovými válkami se využívaly nízkofrekvenční výboje na vzduchu pro odstranění zlomených nástrojů, například závitníků z těžkoobrobitelných materiálů. Jednalo se však o velmi neefektivní proces [6, 7].

Zásadními postavami pro vývoj elektroerozivního obrábění byli manželé Lazarenkovi. Tito sovětští vědci zkoumali za druhé světové války opotřebení wolframových kontaktů elektrických výkonových spínačů elektroerozí při opakovaném spínání. Zjistili, že tento negativní jev se dá využít pro obrábění materiálů. Manželé Lazarenkovi objevili, že kratší výboje a ponoření obrobku do dielektrické kapaliny umožňuje obrábění těžkoobrobitelných kovů. Patentovali první zařízení pro elektroerozivní obrábění, pro generování pulzů byl využíván RC obvod [6, 8].

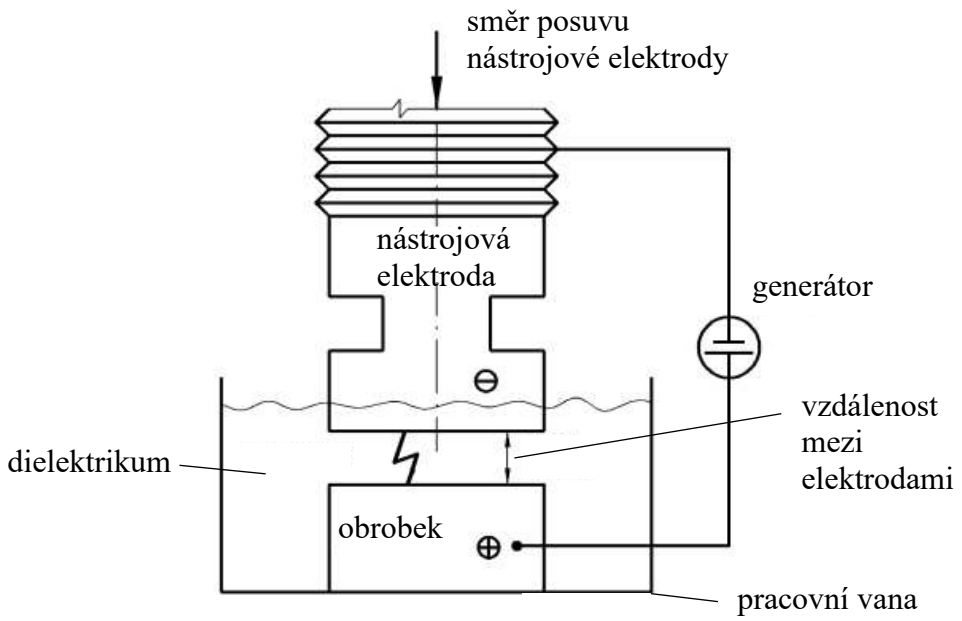
Během padesátých let 20. století byly vyvinuty stroje pro elektroerozivní obrábění s RLC obvody, které umožňovaly použití vyšších frekvencí výbojů. K výraznému rozvoji elektroerozivního obrábění však došlo až v letech sedmdesátých, kdy se začaly používat statické pulsní generátory na principu tranzistorových spínačů. Dalším výrazným milníkem pro elektroerozivní obrábění bylo použití mikroprocesorů, které umožňovalo rozvoj řídicích systémů a servopohonů [9].

1.2 Princip elektroerozivního obrábění

Proces úběru materiálu při elektroerozivním obrábění je založen na vzniku elektrického výboje, probíhajícího pomocí opakujících se periodických impulzů. Během elektrického výboje dochází k narušení materiálu, na elektrodách se vytváří kráter. Úběr materiálu je docílen tavením a vypařováním mikročástic, které jsou odplavovány dielektrickou kapalinou [10].

Na elektrody ponořené do dielektrika je připojen zdroj elektrického napětí. Schéma elektroerozivního obrábění je uvedeno na obr. 1.1. Důsledkem zvyšujícího se charakteru elektrického napětí dochází v prostoru mezi elektrodami ke vzniku pochodů, vedoucích k průrazu dielektrika a k následnému elektrickému výboji. Ten se uskutečňuje v místě, které se vyznačuje nejsilnějším elektrickým napěťovým polem. V napěťovém poli jsou do pohybu uvedeny volné kladné a záporné ionty. Po překonání odporu dielektrika vzniká ionizovaný kanál a mezi elektrodami začíná protékat elektrický proud, který způsobuje zrychlení částic. Vzniklé plazmové pásmo o velmi vysokých teplotách je příčinou strukturálních a tvarových změn elektrod. V důsledku přerušení elektrického proudu dochází k prudkému ochlazení, natavený materiál elektrod je odveden z místa výboje pomocí elektrodynamických sil a spádu

vnitřních napětí v důsledku teplotního pole. Důležité je, aby byl ztuhnutý materiál odveden z prostoru mezi elektrodami prostřednictvím dielektrika a nedošlo tak k ovlivnění dalšího výboje [10, 11, 12].



Obr. 1.1 Schéma elektroerozivního obrábění [7].

Hodnota napětí, při kterém dochází k výboji, závisí především na následujících faktorech [7]:

- vzdálenosti mezi elektrodami,
- vodivosti dielektrické kapaliny,
- znečištění dielektrika.

1.2.1 Druhy elektrického výboje při elektroerozivním obrábění

Při elektroerozivním obrábění mohou nastat dva typy výbojů [7]:

- nestacionární výboj (výboj s jiskrou),
- stacionární výboj (výboj s elektrickým obloukem).

Nestacionární výboj je charakteristický krátkou dobou trvání impulzů (udává se rozmezí 10^{-4} až 10^{-6} s). Při nestacionárních výbojích je dosahováno vysokých frekvencí, hustota elektrického proudu je řádově 10^{6} A·mm^{-2}. Teplota ve výbojovém kanálu dosahuje hodnot vysokých až 12 000 °C. Při výboji s elektrickou jiskrou převažuje elektronová vodivost, k většímu úběru materiálu tak dochází na anodě. Nestacionární výboje se vyznačují menším úběrem materiálu, jsou vhodné pro obrábění na čisto [7, 11].

Stacionární výboj má delší dobu trvání impulzu (větší než 10^{-4} s). Hustota elektrického proudu, pohybující se okolo 10^{2} až 10^{3} A·mm^{-2}, produkuje ve výbojovém kanálu teplotu asi 3 300 až 3 600 °C. Během stacionárního výboje převládá iontová vodivost, větší úběr materiálu je na katodě. Při výboji s elektrickým obloukem dochází k většímu úběru materiálu než při výboji s jiskrou, stacionární výboj je vhodný především pro hrubovací operace [7, 11].

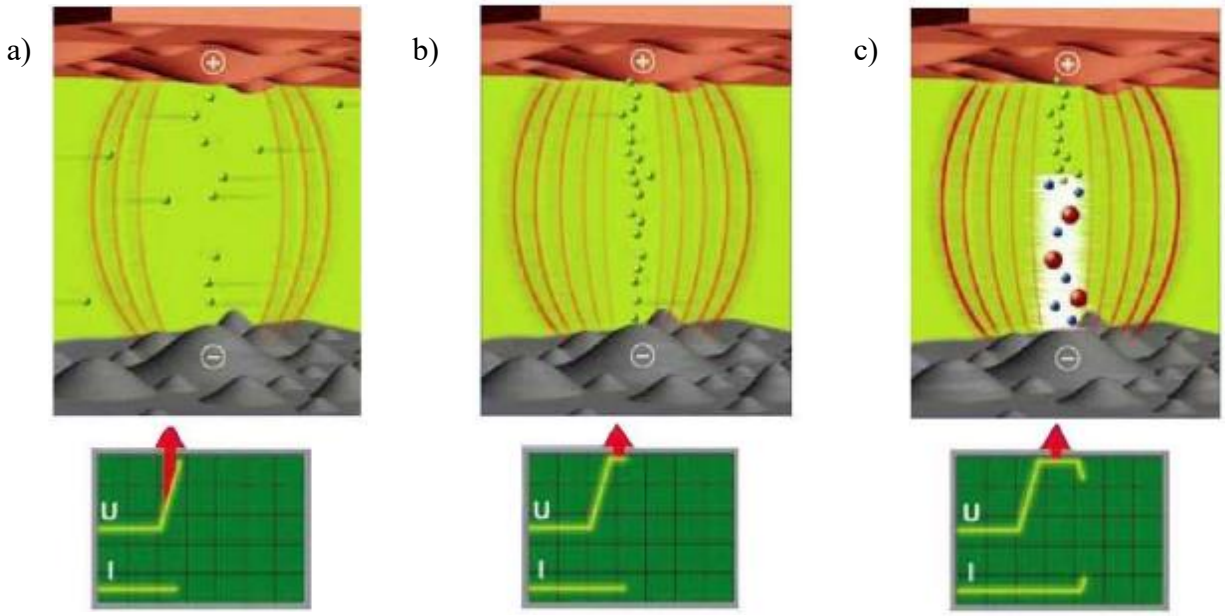
1.2.2 Fáze elektrického výboje

Průběh jednoho výboje mezi anodou a katodou se rozděluje do devíti fází [13, 14].

První fází elektrického výboje je vznik elektrického pole mezi elektrodou a obrobkem (viz obr. 1.2a). Vlivem zesílení elektrického pole dochází k polarizování molekul a iontů. V místě, kde je nejmenší vzdálenost mezi elektrodami, se vytváří maximální gradient, který pohlcuje elektricky vodivé částice [13, 14].

Během fáze 2 dochází k vytvoření vodivého můstku. Můstky, potřebné k zapálení výboje, jsou tvořeny vlivem maximální hodnoty napětí. Schéma 2. fáze elektrického výboje je zobrazeno na obr. 1.2b [13, 14].

Ve fázi 3 dochází k uvolnění elektronů ze záporné elektrody. Elektrony se sráží s neutrálními částicemi a tříští se, čímž vznikají kladné a záporné ionty. Tento jev, označován jako ionizace prostředí, je zobrazen na obr. 1.2c [13, 14].

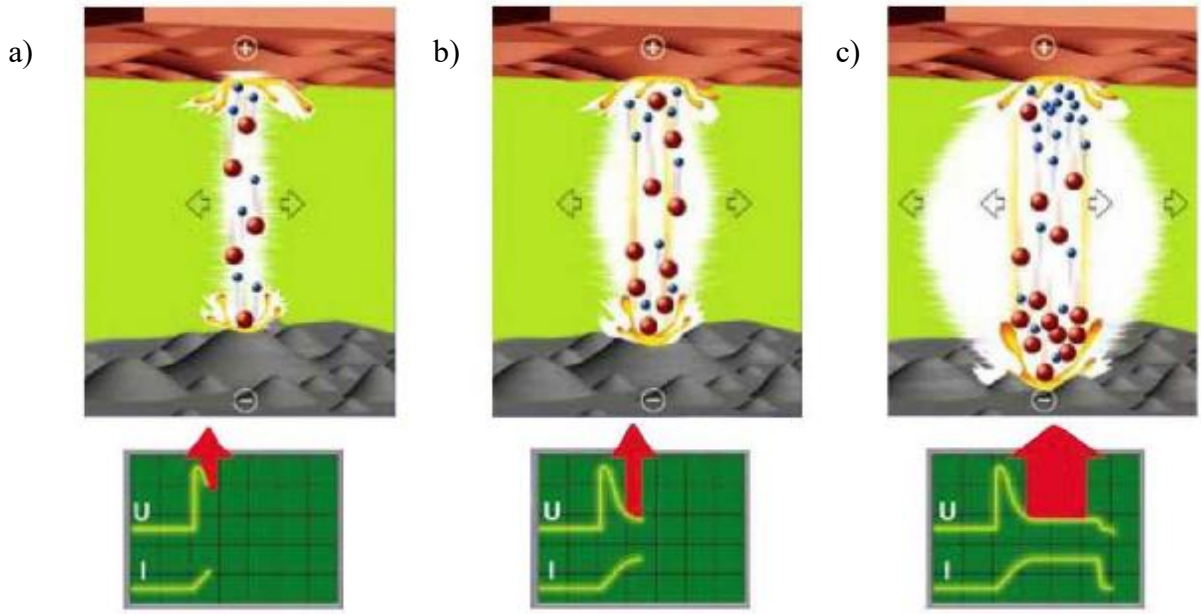


Obr. 1.2 Fáze elektrického výboje [15]:
a) fáze 1, b) fáze 2, c) fáze 3.

Ionty během fáze 4 obalují střed výbojového kanálu a dochází tak ke vzniku plazmy. Mezi elektrodami začíná protékat proud, roste proudová hustota a plazma vytváří vodivý kanál. Se zvyšujícím se proudem stoupá teplota a klesá napětí (viz obr. 1.3a) [12, 14].

Vlivem zvyšující se teploty během fáze 5 dochází k odpařování dielektrika a ke vzniku plynové bubliny. Jednotlivé částice do sebe neuspořádaně narážejí, dochází k tavení a odpařování na povrchu elektrod. Proud roste na maximální hodnotu, napětí dosahuje zápalné hodnoty (viz obr. 1.3b) [12, 14].

Průběh fáze 6 je zobrazen na obr. 1.3c. Dochází k intenzivní expanzi plynové bubliny a intenzivnímu tavení a odpařování materiálu elektrod [7, 14].

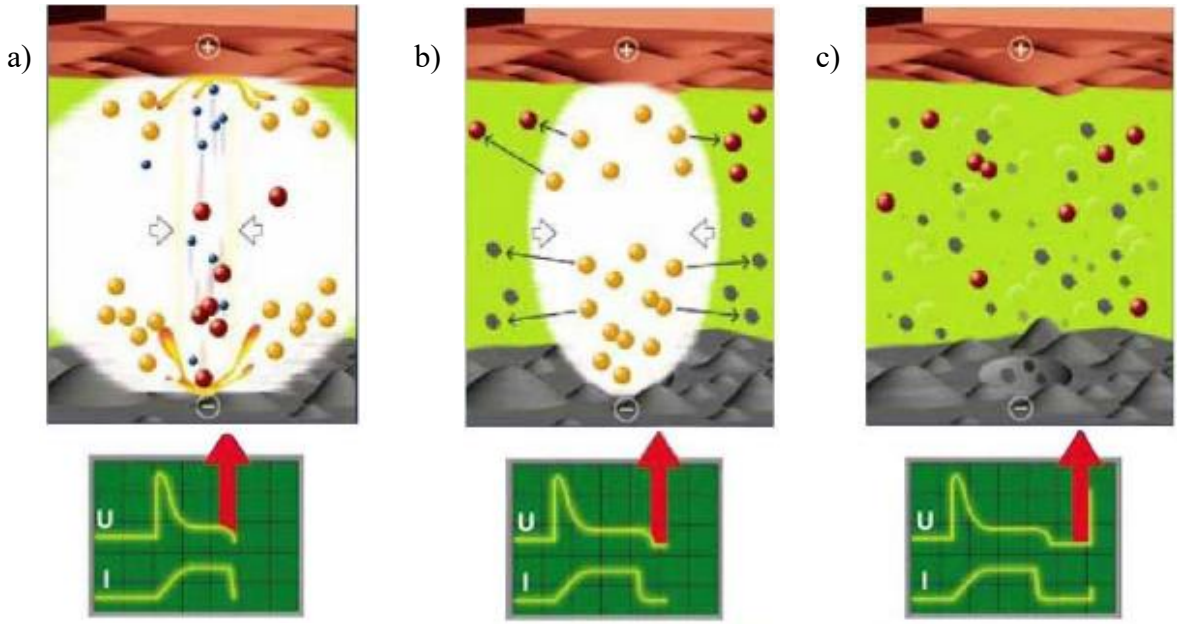


Obr. 1.3 Fáze elektrického výboje [15]:
a) fáze 4, b) fáze 5, c) fáze 6.

Během fáze 7 dochází k přerušení přívodu energie, proud a teplota klesají. Nastává imploze plynových bublin. V důsledku působení elektrického pole a poklesu tlaku plynu je narušený materiál z elektrod vtahován do prostoru mezi elektrodami a vzniká kráter (viz obr. 1.4a) [12, 14].

Ve fázi 8 klesají proud a napětí na nulovou hodnotu, výboj zaniká. Dielektrikum vniká do vzniklého kráteru, kde rychle ochlazuje materiál obrobku a zabraňuje průniku tepla do hlubších vrstev. Odebraný materiál ve formě mikročástic kulového tvaru zůstává v dielektriku (viz obr. 1.4b) [12, 14].

V poslední, deváté fázi elektrického výboje, je znečištěné dielektrikum míseno s čistým. Zbývající volné ionty v dielektriku slouží jako základ pro nový výboj. Schéma deváté fáze je zobrazeno na obr. 1.4c [12, 14].



Obr. 1.4 Fáze elektrického výboje [15]:
a) fáze 7, b) fáze 8), c) fáze 9.

1.3 Parametry elektroerozivního obrábění

Tvar a velikost vzniklého kráteru mají zásadní vliv na účinnost procesu úběru materiálu, jakost opracovávané plochy a na rozměrovou přesnost. Výsledné rozměry kráteru závisí především na hodnotě přivedené energie do výboje a na časovém průběhu impulzu, což lze ovlivňovat zvolením vhodných technologických parametrů obrábění. Na moderních strojích pro elektroerozivní obrábění lze nastavit množství technologických parametrů pro dosažení stabilního procesu obrábění a kontrolu průběhu impulzů. Většinou však není potřeba nastavovat všechny parametry obrábění, generátory současně vyráběných strojů mají adaptivní řízení hodnot technologických parametrů elektroerozivního obrábění, hodnoty jsou upravovány podle aktuálních pracovních podmínek v jiskrové mezeře [7, 8, 13, 16].

Základními parametry, kterými lze ovlivňovat proces úběru materiálu na elektroerozivních hloubicích strojích, jsou [16, 17]:

- pracovní proud,
- zapalovací napětí,
- vzdálenost mezi elektrodami,
- čas trvání jednoho pulzu,
- čas prodlevy mezi jednotlivými pulzy.

Pracovní proud (I) je jedním ze základních parametrů elektroerozivního hloubení. Hodnota pracovního proudu určuje množství přivedené energie do jiskry. Použití moc vysokého proudu způsobuje nežádoucí zahřátí elektrody, která má poté tendenci se nadměrně opotřebovávat. Tepelná deformace elektrody pak může ovlivnit konečný tvar a rozměr erodované plochy [16, 17].

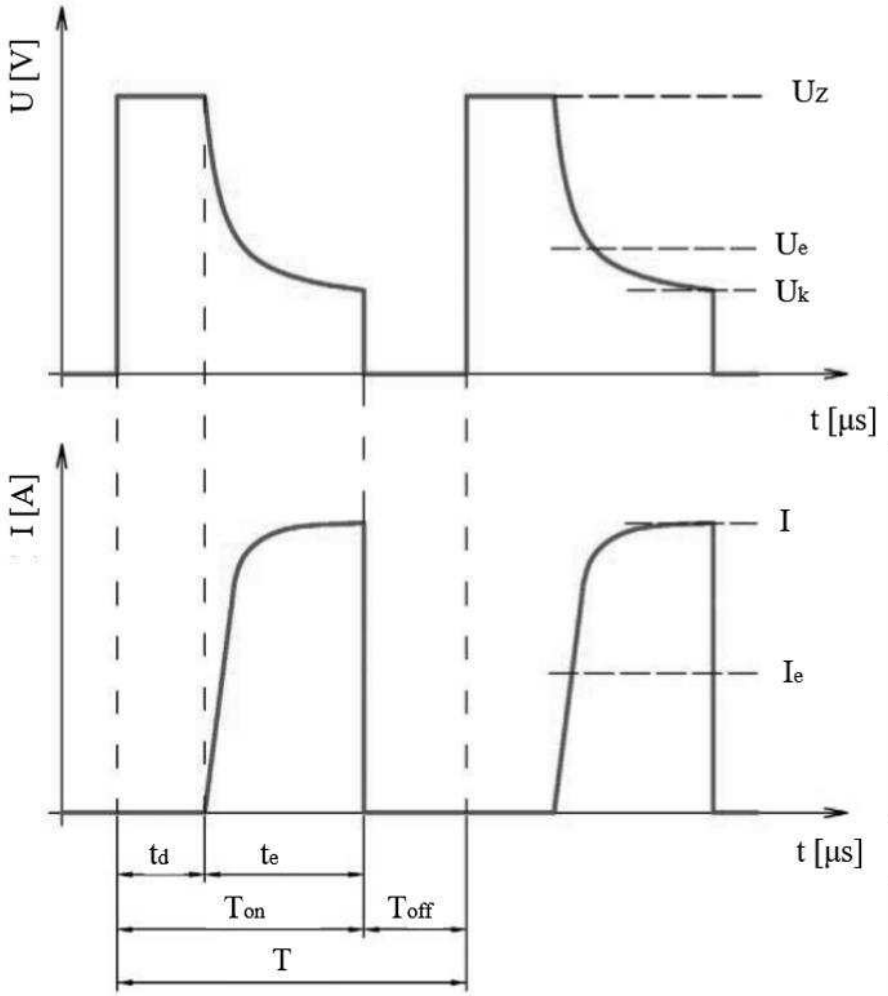
Zapalovací napětí (U_z) udává velikost napětí při zapojení generátoru, při tomto napětí dochází k průrazu dielektrika a vzniká výboj. Zapalovací napětí umožňuje zapálení jiskry z takové vzdálenosti, aby byla dodržena dostatečná vzdálenost mezi elektrodami. Větší zapalovací napětí dovoluje zvětšit jiskrovou mezeru a může napomoct ke stabilitě erodování, avšak příliš velká hodnota zapalovacího napětí může vést k nadměrnému proudu a množství zápalů. Zapalovací napětí určuje polaritu elektroerozivního obrábění. Při použití kladného zapalovacího napětí je obrobek anodou, nástrojová elektroda katodou, jedná se o tzv. přímou polaritu. V případě záporného zapalovacího napětí se jedná o nepřímou polaritu [16].

Hodnota vzdálenosti mezi elektrodami (GAP) závisí především na velikosti zapalovacího napětí a na vlastnostech dielektrika. V případě, že je vzdálenost mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem příliš velká, je náročné dosáhnout průrazu dielektrika. Pokud je naopak vzdálenost mezi elektrodami příliš malá, dochází k průrazu dielektrika ihned po přivedení napětí a vznikající oblouk doprovází intenzivní světelná emise, proces úběru materiálu se stává nestabilním. Pro elektroerozivní hloubení se běžně používá vzdálenost mezi elektrodami v rozmezí 0,01 až 0,5 mm [18].

Čas trvání jednoho výboje (T_{on}) je doba mezi zapojením a odpojením generátoru při jednom cyklu výboje. Objem odebraného materiálu závisí na velikosti energie, která je spotřebována během času T_{on}. Čím je větší hodnota času trvání jednoho výboje, tím je větší úběr materiálu během jednoho cyklu, vznikají větší krátery a teplo se dostane hlouběji do obrobku [13].

Pro zabezpečení stability výbojů je nutné zajistit znovuobnovení čistého dielektrika v prostoru mezi elektrodami a obstarat tak izolační schopnost dielektrika pro další výboj. To je docíleno vypnutím generátoru na předem určený čas T_{off} neboli čas prodlevy mezi jednotlivými cykly. Hodnota času T_{off} ovlivňuje rychlost obrábění. Čím menší hodnota T_{off}, tím dříve může začít další cyklus. Pokud by byl ovšem čas prodlevy mezi jednotlivými výboji moc krátký,

v pracovním prostoru by zbylo ionizované dielektrikum, což by zapříčinilo nestabilní výboj. Na obrázku 1.5 je zobrazen průběh napětí a proudu během výboje s vyznačením časů T_{off} a T_{on} [13].



Obr. 1.5 Průběh napětí a proudu během výboje [7].

Doba periody (T) se skládá z času jednoho výboje a času prodlevy mezi jednotlivými cykly výbojů. Převrácená hodnota periody udává frekvenci výbojů. Výpočet doby periody je dán vztahem (1.1).

$$T = T_{on} + T_{off}\ [\mu s] \tag{1.1}$$

kde: T [µs] - perioda,

T_{on} [µs] - čas jednoho výboje,

T_{off} [µs] - čas prodlevy mezi cykly.

Čas jednoho výboje se skládá z doby trvání výboje (t_e) a doby zpoždění výboje (t_d). Čas doby trvání výboje je skutečný čas působení výboje od průrazu dielektrika do odpojení generátoru. Doba zpoždění výboje je čas mezi zapojením generátoru a okamžiku průrazu dielektrika [7, 11].

Napětí při vyhasnutí výboje (U_k) je ovlivněno parametry dielektrika a druhem materiálu obrobku a nástrojové elektrody. Velikost napětí U_k nelze přímo nastavit [13].

Střední napětí U_e je dáno vztahem (1.2) [7]:

$$U_e = \int_0^{t_e} u\,(t)\,dt\ \ [V] \tag{1.2}$$

kde: U_e [V] - střední napětí,
t_e [µs] - doba trvání výboje,
u [V] - okamžitá hodnota napětí.

Střední proud I_e udává střední hodnotu proudu mezi okamžikem zapálení výboje a vypnutím generátoru. Je dán vztahem (1.3) [7]:

$$I_e = \int_0^{t_e} i\,(t)\,dt\ \ [A] \tag{1.3}$$

kde: I_e [A] - střední proud,
t_e [µs] - doba trvání výboje,
i [A] - okamžitá hodnota proudu.

Pomocí uvedených veličin lze vyjádřit energii vnesenou do výboje, viz vztah (1.4) [7]:

$$W_i = \int_0^{T} u\,(t) \cdot \mathrm{i}\,(\mathrm{t})\,dt\ \ [J] \tag{1.4}$$

kde: W_i [J] - energie jednoho výboje,
T [µs] - perioda,
u [V] - okamžitá hodnota napětí,
i [A] - okamžitá hodnota proudu.

Množství materiálu odebraného jedním výbojem pak lze vyjádřit vztahem (1.5) [7]:

$$Q_i = k \cdot W_i\ [mm^3] \tag{1.5}$$

kde: Q_i [mm^3] - množství materiálu odebraného jedním výbojem,
k [-] - součinitel úměrnosti pro katodu a anodu,
W_i [J] - energie jednoho výboje.

Celkové množství materiálu odebraného za jednotku času na obou elektrodách je vyjádřeno vztahem (1.6) [7]:

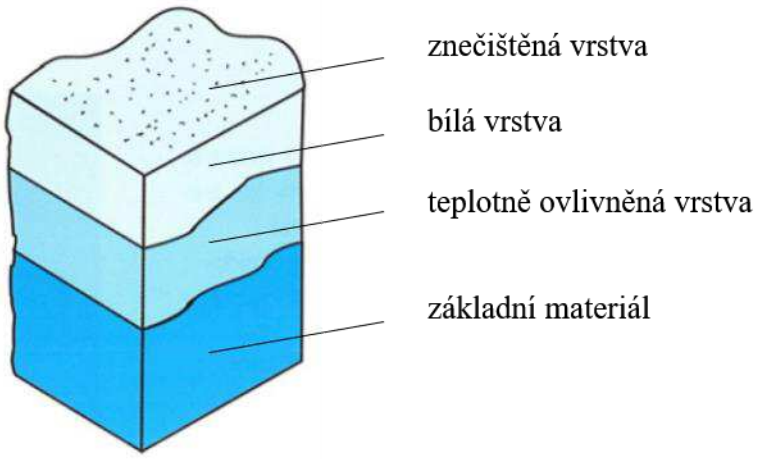
$$Q_V = k \cdot \mathrm{f} \cdot \mathrm{r} \cdot \eta \cdot \int_0^T u\,(t) \cdot \mathrm{i}\,(\mathrm{t})\,dt\ \ [mm^3 \cdot s^{-1}] \tag{1.6}$$

kde:

Q_V [$mm^3 \cdot s^{-1}$]	-	celkové množství odebraného materiálu,
k [-]	-	součinitel úměrnosti pro katodu a anodu,
f [Hz]	-	frekvence výbojů,
r [-]	-	účinnost elektrického výboje,
η [-]	-	účinnost generátoru,
T [μs]	-	perioda,
u [V]	-	okamžitá hodnota napětí,
i [A]	-	okamžitá hodnota proudu.

1.4 Povrch a přesnost elektroerozivního obrábění

Elektroerozivní obrábění je bezkontaktní metodou, povrchová vrstva vzniklá po úběru materiálu se značně liší od povrchu získaného běžnými metodami obrábění. Po elektrickém výboji vznikají na povrchu obrobku nepravidelné krátery. Tvar a velikost kráterů od jednotlivých výbojů závisí zejména na technologických parametrech elektroerozivního obrábění, materiálu elektrod a vlastnostech dielektrika. S rostoucím množstvím energie přivedené do místa, kde probíhá jeden výboj, roste i průměr a hloubka vzniklého kráteru, čímž roste i drsnost povrchu. Během elektroerozivního obrábění vznikají velmi vysoké teploty, které ovlivňují vnitřní část kráterů a jejich okolí. Natavený povrch je pak rychle ochlazen dielektrikem a dochází tak k jeho zakalení. Povrch obráběného materiálu je znečištěn pozůstatky usazeného materiálu nástrojové elektrody a nečistotami z dielektrika. Tyto zmíněné aspekty způsobují, že povrch materiálu po elektroerozivním obrábění se skládá z několika vrstev, tato skutečnost je zobrazena na obr. 1.6 [6, 14].



Obr. 1.6 Vrstvy elektroerozivně obrobeného materiálu [19].

Znečištěná vrstva na povrchu je tvořena chemickou reakcí materiálu elektrod s molekulami dielektrika. Tato přetavená vrstva má tloušťku kolem 25 µm, její dosah je ovlivněn materiálem nástrojové elektrody, jejíž částice kontaminují povrch obráběného materiálu, a čistotou dielektrika. Pod povrchovou znečištěnou vrstvou se nachází bílá vrstva. Tato vrstva je nejvíce rozdílná od základního materiálu. Bílá vrstva je silně nauhličená ztuhlá tavenina o vysoké tvrdosti. Struktura bílé vrstvy má pro ocelové materiály typicky charakter martenzitu. Tloušťka bílé vrstvy je závislá na energii výboje, pro dokončovací operace je okolo 40 µm, pro hrubovací operace je hodnota vyšší. Poslední vrstvou před základním materiálem je teplotně ovlivněná oblast, která na rozdíl od bílé vrstvy, nebyla roztavena, ale vlivem teplotních změn se do ní zaneslo pnutí. Velikost celé teplotně ovlivněné oblasti je řádově 0,1 mm [6, 7, 14].

Přesnost obráběných rozměrů závisí mimo jiné na přesnosti kinematických celků stroje, přesnosti vyrobené nástrojové elektrody a způsobu jejího upnutí. Odchylka od jmenovitého rozměru při elektroerozivním obrábění je určena vztahem (1.7) [7]:

$$\delta = \delta_{ST} + \delta_{T} + \delta_{NÁST} + \delta_{ER}\ [mm] \tag{1.7}$$

kde: δ [mm] - odchylka při elektroerozivním obrábění,

δ_{ST} [mm] - odchylka způsobená obráběcím strojem,

δ_{T} [mm] - chyba vzniklá ohřevem elektrod,

$\delta_{NÁST}$ [mm] - výrobní nepřesnost nástrojové elektrody,

δ_{ER} [mm] - chyba daná podstatou elektroerozivního obrábění.

Výše odchylky způsobené obráběcím strojem je dána deformacemi a nepřesnostmi kinematických mechanismů a systému upnutí elektrod. Tato odchylka bývá maximálně 0,003 mm. Chyba vzniklá ohřevem elektrod je způsobena vznikem vysokého tepla během obráběcího procesu, dochází tak k vzrůstu teploty dielektrika a elektrod. Hodnota této chyby je ovlivněna hodnotou teplotní roztažnosti nástrojové elektrody. Výrobní nepřesnost nástrojové elektrody závisí na způsobu opracování elektrody. Hodnota této odchylky je pro elektrody frézované běžným způsobem asi 0,01 mm, pro broušené elektrody přibližně 0,002 mm. Chyba daná podstatou elektroerozivního obrábění je řádově 0,001 mm [7].

Pro plochu obrobenou elektroerozivním obráběním se používá označení drsnosti povrchu dle normy VDI 3400. Většina výrobců CNC strojů pro elektroerozivní obrábění využívá právě stupnici dle VDI, v tab. 1.1 je zobrazen převod mezi vybranými hodnotami stupnice VDI a střední aritmetickou úchylkou povrchu Ra.

Tab. 1.1 Převod mezi hodnotami stupnice dle normy VDI 3400 a Ra [20].

VDI [–]	1	4	8	12	18	24	28	30	42
Ra [µm]	0,112	0,16	0,25	0,4	0,8	1,6	2,5	3,2	12,6

Převod mezi hodnotou ve stupnici VDI a průměrnou aritmetickou úchylkou povrchu se řídí vztahem (1.8) [20]:

$$VDI = 20 \cdot \log(10 \cdot Ra) \ [-] \tag{1.8}$$

kde: VDI [–] - stupeň drsnosti povrchu po elektroerozivním obrábění,

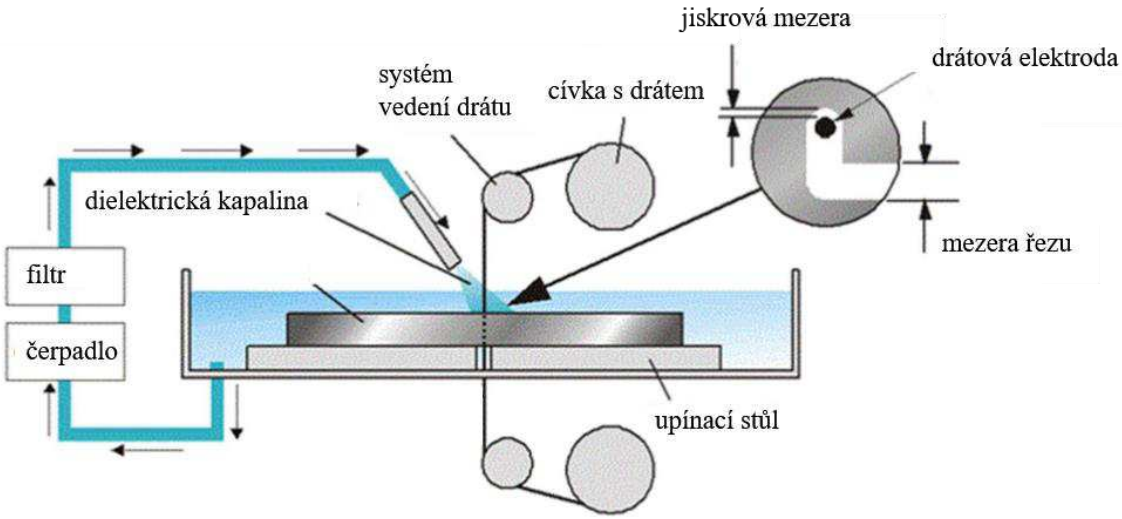
Ra [μm] - průměrná aritmetická úchylka profilu.

1.5 Druhy elektroerozivního obrábění

Na začátku této kapitoly jsou stručně přestaveny druhy elektroerozivního obrábění, podrobněji je pak rozebráno elektroerozivní hloubení.

1.5.1 Elektroerozivní drátové řezání

Elektroerozivní drátové řezání, běžně označováno zkratkou WEDM (wire electrical discharge machining), je způsob elektroerozivního obrábění, kdy má nástrojová elektroda podobu odvíjecího se drátu. Jedná se o v současnosti nejrozšířenější způsob elektroerozivního obrábění. Schéma elektroerozivního drátového řezání je zobrazeno na obr. 1.7 [6, 13].



Obr. 1.7 Schéma elektroerozivního drátového řezání [21].

Nástrojová elektroda v podobě tenkého drátu musí být dostatečně napnutá, aby byla dosažena požadovaná přesnost řezu. Drát je napnut mezi vodítky, které je možné polohovat a tím měnit úhel řezu. Drát může být použitý pouze jednou, jelikož dochází během erodování k jeho opotřebení. Je tedy nutné zajistit pohyb drátu během řezu, což je docíleno postupným odvíjením drátu ze svého zásobníku pomocí systému kladek. Zásobníkem drátu je zpravidla cívka. Rychlost odvíjení je regulováno řídicím systémem stroje tak, aby nedocházelo k přetržení drátu [6, 13].

Nejčastěji se používají dráty o průměru v rozmezí 0,1 až 0,3 mm. Dráty pro elektroerozivní řezání jsou běžně z mosazi nebo mědi, případně z wolframu či molybdenu. Časté je využití povlakovaných drátů, povlak zaručuje vysokou pevnost a dovoluje dosáhnout vyšší rychlosti řezání [22].

Drátové elektroerozivní řezání nachází využití především pro výrobu střižných a lisovacích nástrojů. Pomocí této metody obrábění se dají zhotovit díly se složitou geometrií, na obr. 1.8 jsou zobrazeny příklady drátově řezaných dílů [6].

Obr. 1.8 Součásti obrobené elektroerozivním drátovým řezáním [23].

1.5.2 Elektroerozivní vrtání

Při elektroerozivním vrtání se používají kulaté duté elektrody, rotující kolem své osy. Tyto elektrody bývají ve většině případů vícekanálové, aby byl materiál erodován i uvnitř elektrody a nedocházelo tak ke vzniku trnu. Na obr. 1.9 se nachází průřez vybraných používaných tvarů vícekanálových elektrod. Rotace nástrojové elektrody zajišťuje rovnoměrné opotřebení plochy nástroje. Důležitou roli hraje vhánění dielektrika středem elektrody pod vysokým tlakem tak, aby byly částice materiálu z erodované plochy rychle a efektivně odstraněny. V opačném případě by mohly vodivé částice obráběného materiálu způsobovat zkraty a mohlo by docházet k nežádoucímu obrábění boku díry [8, 24, 25].

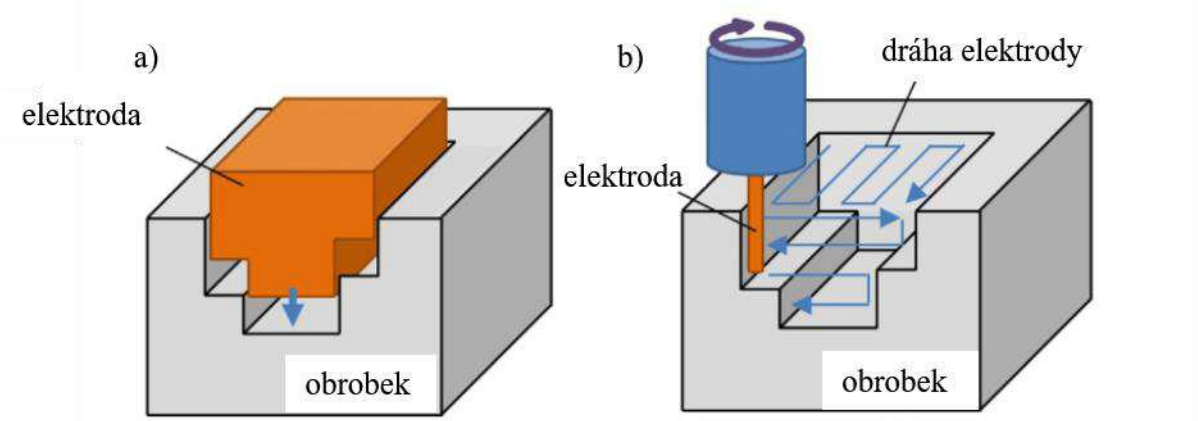
Obr. 1.9 Průřez vícekanálových elektrod pro elektroerozivní vrtání [24].

Elektroerozivní vrtání se používá hlavně pro vrtání děr malých průměrů, pohybujících se okolo hodnoty jednoho milimetru. Na obr. 1.10 je zobrazena aplikace elektroerozivního vrtání. Jelikož je elektroerozivní vrtání bezkontaktní metodou, je možné pomocí ní dosáhnout i velmi hlubokých děr. Možná je i aplikace vrtání šikmých ploch. Metoda elektroerozivního vrtání je vhodná pro tvrdé materiály, které vykazují dostatečnou vodivost. Mezi příklady využití této metody patří vrtání chladicích kanálků v turbínových lopatkách, vrtání děr pro vstřikovače paliva a vrtání startovacích otvorů pro drátové řezání [24, 25].

Obr. 1.11 Elektroerozivní vrtání [26].

1.5.3 Elektroerozivní frézování

Při elektroerozivním frézovaní se rotující elektroda pohybuje po numericky řízené dráze. Na rozdíl od elektroerozivního hloubení nemusí být elektroda pro elektroerozivní frézování tvarována podle požadovaného tvaru hloubené dutiny. Tento rozdíl je zobrazen na obr. 1.12. Elektroerozivní frézování tak nevyžaduje komplexní tvarování nástrojových elektrod, což způsobuje časovou úsporu při přípravě [8, 27].



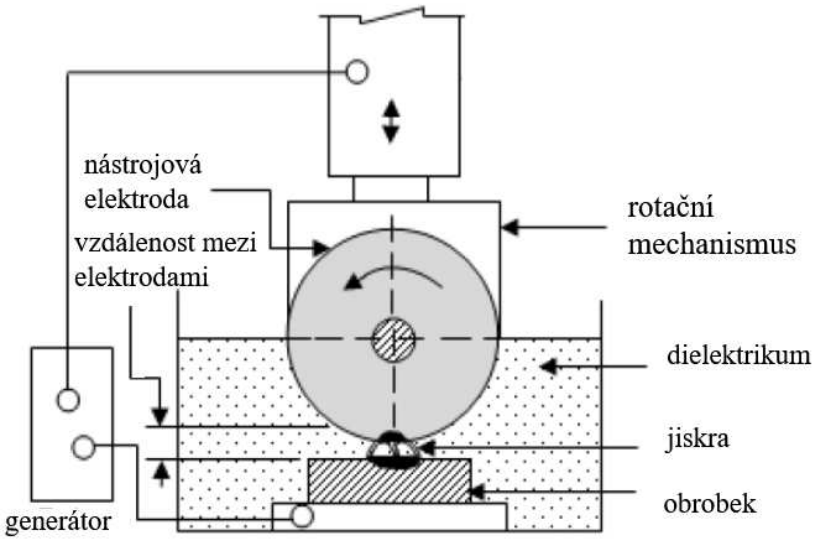
Obr. 1.12 Rozdíl mezi EDM hloubením a EDM frézováním [27].
a) konvenční EDM hloubení, b) EDM frézování.

Opotřebení elektrody během elektroerozivního frézování má značný vliv na tvar a kvalitu obrobeného povrchu. Pro zajištění požadovaného výsledného tvaru je nutné zohlednit průběh opotřebení elektrody. Je za potřebí vždy obnovit původní tvar elektrody, kterým se vyznačovala před opotřebením. Elektroerozivním frézováním nelze dosáhnout tak ostrých hran v porovnání s jinými EDM metodami. Touto metodou je náročné dosáhnout kvalitního povrchu na bocích obráběné dutiny [27, 28, 29].

Využití elektroerozivního frézování pro obrábění větších rozměrů není běžné, tato metoda je vhodná spíše pro mikro obrábění. Válcová nástrojová elektroda má v tom případě průměr menší než 0,3 mm [28].

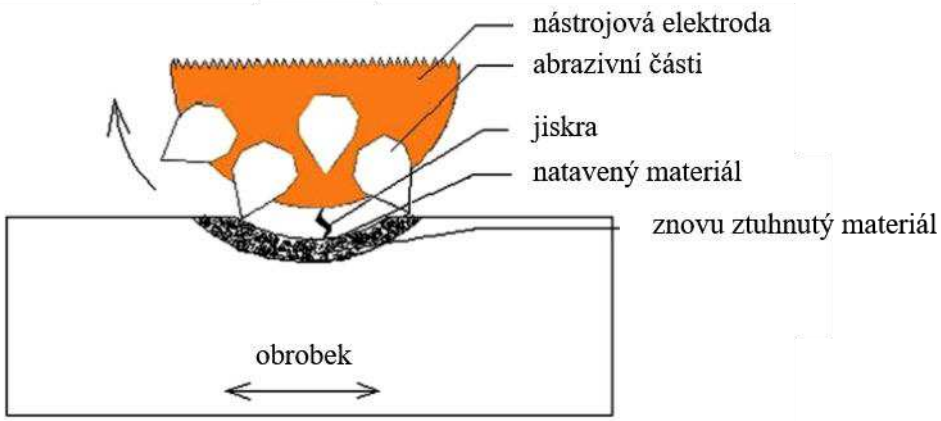
1.5.4 Elektroerozivní broušení

Elektroerozivní broušení využívá stejně jako ostatní elektroerozivní metody obrábění principu elektrických výbojů, obráběný materiál je odstraňován pomocí tání a odpařování. Nástrojová elektroda je elektricky vodivé rotující kolo z kovu. Rotace nástrojové elektrody způsobuje efektivnější výplach erodované plochy. Vzdálenost mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem bývá v rozmezí 0,013 až 0,075 mm. Schéma elektroerozivního broušení je zobrazeno na obr. 1.13 [30, 31].



Obr. 1.13 Schématické znázornění elektroerozivního broušení [31].

Elektroerozivní broušení je často používáno v kombinaci s konvenčním způsobem broušení. V tom případě přestává být bezkontaktní metodou obrábění, pro úběr nataveného materiálu během elektrického výboje je nástrojová elektroda opatřena abrazivními částicemi. Schéma úběru materiálu touto hybridní metodou je vyobrazeno na obr. 1.14, kde je zobrazena nástrojová elektroda z mědi opatřená diamantovými abrazivními částicemi [31, 32].

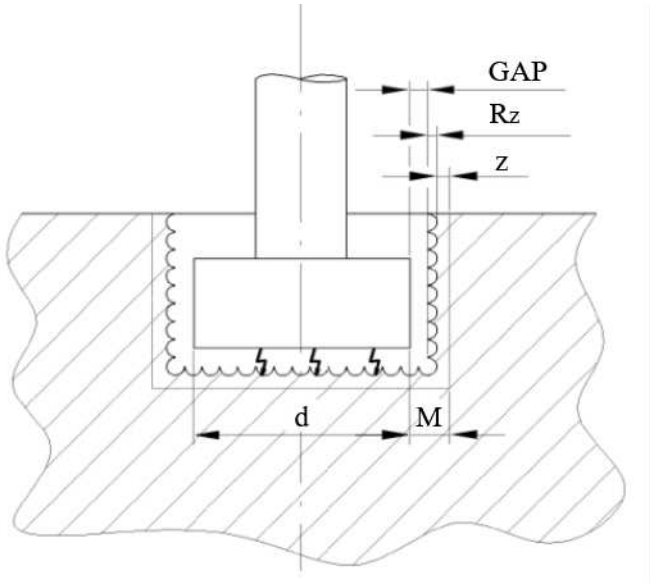


Obr. 1.14 Schéma úběru materiálu pomocí hybridní metody elektroerozivního broušení [32].

1.5.5 Elektroerozivní hloubení

Principem elektroerozivního hloubení je použití tvarové elektrody pro hloubení dutiny, která má stejný tvar jako elektroda. Je však třeba počítat s tím, že dutina je zvětšená o hodnotu GAP. Tato skutečnost je zobrazena na obr. 1.15. Proces elektroerozivního hloubení je realizován postupným pohybem nástrojové elektrody do koncové souřadnice v obrobku tak, aby byla

dodržena mezielektrodová vzdálenost GAP. V případě, že vzdálenost mezi nástrojem a obrobkem je nedostatečná, dochází ke zkratu zdroje. V takovéto situaci servomotory zajistí okamžité obnovení mezielektrodové vzdálenosti [7, 13].



Obr. 1.15 Zobrazení rozměru válcové hrubovací elektrody pro elektroerozivní hloubení [7].

Pro výpočet minimální vůle při hrubování, tedy hodnoty, o kterou musí být hrubovací elektroda kruhového průřezu menší než požadovaný obrobený cílový rozměr, platí vztah (1.9) [7]:

$$M = GAP + R_z \cdot 10^{-3} + z\ [mm] \tag{1.9}$$

kde: M [mm] - minimální vůle při hrubování,
GAP [mm] - mezielektrodová vzdálenost,
R_z [µm] - výška největší profilu obrobeného povrchu,
z [mm] - přídavek na základě tloušťky narušeného povrchu.

Pro rozměr hrubovací elektrody pak platí vztah (1.10) [7]:

$$d_{hrub} = D - 2 \cdot M_m\ [mm] \tag{1.10}$$

kde: d_{hrub} [mm] - průměr hrubovací nástrojové elektrody,
D [mm] - požadovaný cílový průměr dutiny.

Pro stanovení průměru dokončovací nástrojové elektrody se zanedbávají hodnoty tloušťky narušeného povrchu a výšky největšího profilu, které v případě dokončování bývají výrazně menší než při hrubování. Průměr dokončovací elektrody je tak určen dle vztahu (1.11) [7]:

$$d_{dok} = D - 2 \cdot GAP\ [mm] \tag{1.11}$$

kde: d_{dok} [mm] - průměr dokončovací nástrojové elektrody,
GAP [mm] - mezielektrodová vzdálenost.

Pro proces hloubení se běžně používá několik postupných operací s různým nastavením technologických parametrů. Postupuje se tedy od hrubovacích operací k dokončovacím operacím, a to hned v několika krocích. Vhodné je využití rozdílných elektrod pro hrubovací operace a dokončování. Před tím, než se elektroda dostane celou plochou do obrobku, je žádoucí provést tzv. zajiskření, tedy použití jemnější technologie před hrubováním. Jakmile je dosaženo nastaveného koncového bodu erodování, stroj zůstane na krátký čas na koncovém rozměru a provádí tzv. dojiskření. Poté může ještě následovat planetovací cyklus, při němž elektroda dle zvolené dráhy rozšíří objem obráběné plochy tak, aby se dostala do všech částí tvaru a dokončování tak proběhlo nejen v ose hlavního vektoru, ale i prostorově [13, 16].

Použití technologie elektroerozivního hloubení je v řadě případů nejefektivnějším způsobem úběru materiálu. Mezi výhody elektroerozivního hloubení patří [10]:

- možnost obrábění materiálů nezávisle na jejich mechanických vlastnostech,
- dosažení kvalitního povrchu obrobené plochy,
- možnost výroby tvarově složitých součástí,
- nízká náročnost výroby tvarově složitých ploch,
- žádné mechanické zatížení během obráběcího procesu,
- vysoký stupeň automatizace procesu,
- výsledné hrany bez otřepů.

Nevýhodami elektroerozivního hloubení jsou [10]:

- značné náklady na zhotovení elektrody,
- nízká produktivita obrábění,
- požadavek na schopnosti obsluhy,
- nutnost ponoření obrobku a elektrody do dielektrika.

Použití elektroerozivního hloubení je vhodné především pro obrábění děr s ostrými rohy, obrábění tvarů s malými detaily a tenkostěnných příček. Mezi příklady aplikace elektroerozivního hloubení patří hloubení drážek pro pera, hloubení vnitřního drážkování nebo vnitřního ozubení pro slepé otvory, obrábění zápustek, střižných nástrojů, forem pro vstřikování plastů nebo forem pro tlakové lití. Elektroerozivním hloubením je možné vyrábět i závity. Elektroerozivní hloubení je vhodnou metodou pro mikro obrábění, příkladem je výroba forem elektronických zařízení [13, 33].

V následující kapitole jsou podrobněji popsány elektrody pro elektroerozivní hloubení, kapitola 1.7 se pak zabývá dielektrickými kapalinami pro elektroerozivní hloubení. Kapitola 1.8 se věnuje strojům pro elektroerozivní hloubení.

1.6 Nástrojové elektrody

Vlastnosti nástrojové elektrody hrají důležitou roli pro výslednou kvalitu obrobené plochy. Během procesu úběru materiálu elektroerozivním hloubením dochází k postupnému opotřebení nástrojové elektrody. Nejvýraznější opotřebení postihuje rohy elektrod, tvar obrobené dutiny je ovlivněn schopnosti elektrody odolávat opotřebení v rozích a na hranách [8, 34].

1.6.1 Materiály nástrojových elektrod

Od materiálů, z kterých se vyrábí nástrojové elektrody pro elektroerozivní hloubení, jsou požadovány následující vlastnosti [8, 34]:

- vysoká elektrická vodivost,
- vysoká tepelná vodivost,
- vysoký bod tavení,
- nízká teplotní roztažnost,
- schopnost dosažení vysokého úběru obráběného materiálu při malém opotřebení nástrojové elektrody,
- dobrá obrobitelnost,
- nízká hustota,
- přijatelná cena.

Materiály, které se používají pro výrobu nástrojových elektrod pro elektroerozivní hloubení se řadí do tří skupin [34]:

- kovové elektrody,
- nekovové elektrody,
- kompozitní elektrody.

Nejpoužívanějším zástupcem materiálu kovových elektrod je měď. Dále se používají nástrojové elektrody z wolframu, mosazi, případně hliníku. Wolfram se většinou používá v kombinací s mědí nebo se stříbrem. Wolframové elektrody jsou těžce obrobitelné, jejich cena je vysoká. Wolfram-měděné elektrody se používají pro hloubení malých a hlubokých otvorů, vynikají malým opotřebením. Elektroerozivním hloubením za použití nástrojových elektrod z mědi lze dosáhnout jemných povrchů o nízké hodnotě průměrné aritmetické úchylky povrchu. Mosazné elektrody se vyznačují nižší pořizovací cenou, ale výrazně se opotřebovávají. Nejsou vhodné pro aplikace, kde jsou vysoké požadavky na kvalitu povrchu. Nejlevnější jsou hliníkové elektrody, ale mají podobné nevýhody jako mosazné, navíc mají tendenci korodovat [7, 8, 34].

Nekovové nástrojové elektrody jsou vyráběny z grafitu. Jedná se o nejčastěji používaný materiál elektrod pro elektroerozivní hloubení. Grafitové elektrody jsou snadno dostupné a poměrně levné. Použití grafitu je vhodné i pro výrobu rozměrných elektrod. Grafit se vyznačuje nízkou hustotou, hloubením grafitovými elektrodami se dosahuje nízkých hodnot opotřebení. Nástrojovými elektrodami z grafitu lze obrábět materiály s vysokou teplotou tání. Grafit se netaví, ale sublimuje při teplotě přibližně 3 350 °C. Grafitové elektrody se vyrábějí v různých stupních velikosti zrn. Pro méně náročné aplikace je dostačující použít grafit o větší zrnitosti, pro dosažení kvalitnějšího povrchu a jemných detailů je vhodné použít grafit s malými zrny. Příklad grafitové elektrody pro elektroerozivní hloubení je zobrazen na obr. 1.16. Nevýhodou použití grafitových nástrojových elektrod je vyšší míra kontaminace dielektrika [8, 34, 35].

Obr. 1.16 Příklad grafitové elektrody [36].

Kompozitní elektrody se skládají z mědi a grafitu, kombinace těchto materiálů zlepšuje jejich vlastnosti, hloubením těmito elektrodami lze dosáhnout výborné kvality povrchu erodovaného materiálu. Jsou vhodné k obrábění v náročných podmínkách. Avšak nevýhodou těchto kompozitních nástrojových elektrod je vysoká cena a velké opotřebení v rozích elektrod [34].

1.6.2 Příprava nástrojových elektrod

Náklady na přípravu nástrojové elektrody tak, aby měla požadovaný tvar a vykazovala požadovanou přesnost, tvoří výrazný podíl ceny za celý hloubicí proces, obzvláště pokud se jedná o obrábění elektrod složitých tvarů. Je pak běžné, že cena za obrábění nástrojové elektrody je několikanásobně vyšší než cena materiálu elektrody. Mezi způsoby přípravy nástrojových elektrod patří třískové obrábění, lití, lisování, prášková metalurgie nebo galvanoplastika. Pro obrobení elektrod se také může použít drátové elektroerozivní řezání [12, 35, 37].

Velmi dobře obrobitelné jsou elektrody z mosazi. Wolfram-měděné a wolfram-stříbrné elektrody se připravují spékáním, nejedná se o slitiny. Tyto elektrody jsou velmi těžce obrobitelné, vyznačují se vysokou křehkostí [34].

Jak již bylo zmíněno, nejpoužívanějšími elektrodami pro elektroerozivní hloubení jsou grafitové a měděné elektrody. Grafitové elektrody jsou opracovány snáze a rychleji než měděné. Pro obrábění grafitových elektrod se používá vysokých hodnot řezných rychlostí a posuvů. Grafit je dobře obrobitelný materiál, vhodné je jeho obrábění ve vysokorychlostních (HSC) obráběcích centrech. V současnosti je nejběžnějším postupem obrábět nástrojové elektrody na HSC frézkách. Nevýhodou grafitu je jeho prašnost při obrábění, grafit je nutno během frézování intenzivně odsávat [37, 38, 39].

Proces konstrukce a výroby tvarově složitých nástrojových elektrod je časově náročná, zjednodušení procesu je umožněno využitím vyspělých CAD/CAM softwarů. Tyto moduly slouží pro automatizaci návrhu tvaru a výroby nástrojových elektrod. Proces je odvozen od modelu obráběné součásti a výběru ploch, které budou obrobeny elektroerozivním hloubením. Následuje tvorba modelu nástrojových elektrod. Pro hloubení tvarově složitých součástí se používá až několika desítek nástrojových elektrod. Tvar a rozměry elektrod jsou poté přeneseny do CAM systému, ve kterém je možno tvořit a upravovat NC program pro obrobení elektrod [40, 41].

1.7 Dielektrikum

Pro vznik elektrického výboje je nutné, aby byl obrobek a nástrojová elektroda v prostředí dielektrické kapaliny. Udává se, že výška hladiny dielektrika by měla být alespoň 40 mm nad místem eroze. Dielektrická kapalina tvoří pracovní prostředí pro průběh procesu úběru materiálu, jedná se o kapalinu schopnou polarizace [42].

1.7.1 Funkce dielektrika

Dielektrická kapalina plní při elektroerozivním obrábění následující funkce [7, 11]:

- izoluje prostor mezi elektrodami,
- ohraničuje výbojový kanál,
- odvádí teplo a ochlazuje pracovní prostor,
- odstraňuje odebraný materiál z místa výboje,
- zabraňuje ulpívání částic odebraného materiálu na nástrojové elektrodě.

Dielektrická kapalina hraje v elektroerozivním obrábění důležitou roli, používané dielektrikum by mělo splňovat následující požadavky [7, 42]:

- nízká viskozita,
- dobrá smáčivost,
- chemická neutrálnost a stálost,
- vysoká teplota vzplanutí,
- dostatečná velikost elektrického odporu,
- zdravotní nezávadnost,
- ekologičnost,
- nízká cena.

Nízká viskozita a dobrá smáčivost zajišťuje schopnost rychlé obnovy izolace po výboji. Chemická neutralita a stálost je zásadní proto, aby nedocházelo ke korozi. Z bezpečnostních důvodů se od dielektrika vyžaduje vysoká teplota vzplanutí. Při práci s dielektrickou kapalinou by neměly vznikat žádné jedovaté výpary, dielektrikum by nemělo vykazovat nepříjemný zápach. Druh dielektrika ovlivňuje množství kouře vzniklého při obrábění, méně ho zpravidla vzniká při použití kapalin s menší viskozitou [7, 42].

1.7.2 Druhy dielektrika

Nejčastěji používanými dielektrickými kapalinami pro elektroerozivní hloubení jsou izolanty z ropných produktů, konkrétně petrolej, strojový olej nebo transformátorový olej. Použití petrolejových dielektrik umožnuje dobrou kontrolu výboje, navíc mají tyto dielektrické kapaliny teplotní stálost, na rozdíl od olejových dielektrik. Výrobci nabízejí druhy dielektrických kapalin speciálně pro hrubovací aplikace s velkým úběrem materiálu, i dielektrika určená pro přesné dokončování a obrábění mikro částí. Dále jsou na trhu i dielektrika speciálně určená pro obrábění konkrétních materiálů. Většinou se však používají univerzální dielektrika, vhodná pro všechny aplikace [7, 42, 43].

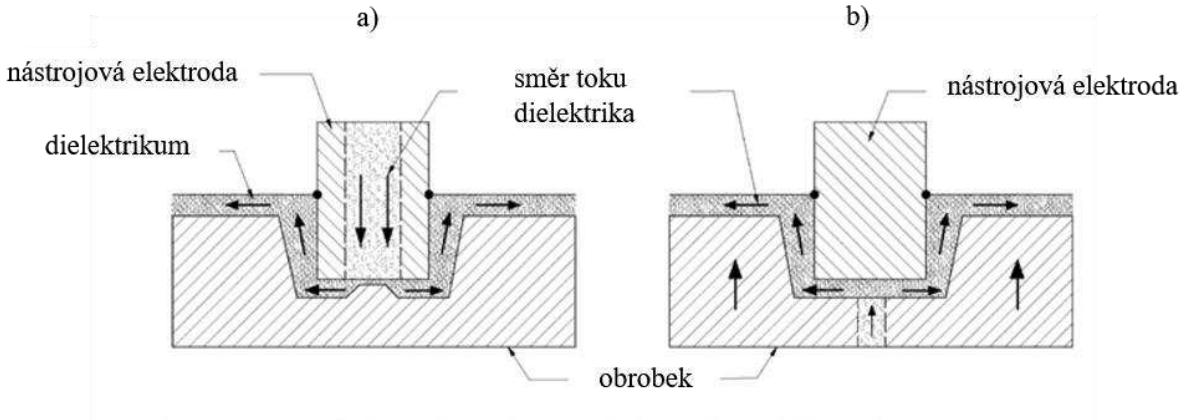
Dalším druhem dielektrické kapaliny pro elektroerozivní obrábění je deionizovaná destilovaná voda. Jedná se vodu zbavenou veškerých iontově rozpustných látek a křemíku. Použití tohoto typu dielektrika je vhodné spíše pro elektroerozivní drátové řezání než pro hloubení. Výhodou deionizované vody je vysoký stupeň bezpečnosti, nízká cena a nízká viskozita. Nevýhodou je možný vznik koroze u obrobků, které musejí v dielektrické kapalině setrvat delší čas [8].

1.7.3 Způsoby výplachu dielektrika

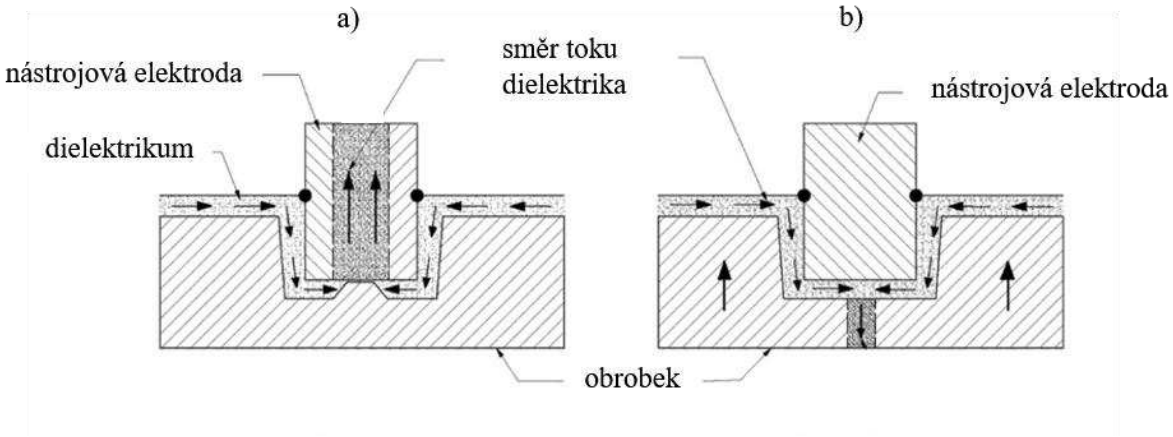
Pro zajištění výkonu funkcí dielektrické kapaliny je vyžadováno, aby do prostoru mezi elektrodami bylo přiváděno čisté, nezahřáté a deionizované dielektrikum. Přívod dielektrické kapaliny může být realizován několika způsoby [7, 8]:

- zaplavením,
- pulsním vyplachováním,
- vnitřním tlakovým vyplachováním,
- vyplachováním pomocí odsávání.

Zaplavení je základní způsob přivedení dielektrické kapaliny do prostoru pracovní vany. Nastavená výška hladiny dielektrika je udržována tak, aby obrobek a nástrojová elektroda byly po celou dobu obráběcího procesu pod touto hladinou. Zaplavení je běžně kombinováno s pulsním vyplachováním. Princip pulsního vyplachování spočívá v tom, že nástrojová elektroda se cyklicky v časových intervalech vzdaluje od obrobku a umožňuje přívod neznečištěného dielektrika. Vnitřní tlakové vyplachování je charakterizováno přívodem kapaliny pod tlakem otvorem v nástroji, případně otvorem v obrobku. Oba tyto způsoby tlakového vyplachování jsou zobrazeny na obr. 1.17. Vyplachování odsáváním znamená, že dielektrická kapalina je odsávána dutinou v elektrodě, případně dutinou v obrobku. Schéma vyplachování pomocí odsávání je na obr. 1.18 [7, 8].



Obr. 1.17 Vnitřní tlakové vyplachování [8].
a) přívod dielektrika otvorem v nástroji, b) přívod dielektrika otvorem v obrobku.



Obr. 1.18 Vyplachování odsáváním [8].
a) odsávání dutinou v nástrojové elektrodě, b) odsávání dutinou v obrobku.

1.8 Stroje pro elektroerozivní hloubení

Stroje pro elektroerozivní hloubení jsou běžně označovány jako hloubičky. V současnosti se jedná o CNC stroje s vyspělým systémem sledování průběhu impulzů a technologických parametrů, jakožto i s jejich adaptivním řízením. Na obr. 1.19 je zobrazen příklad elektroerozivního hloubicího stroje od firmy Exeron GmbH.

Obr. 1.19 Stroj značky Exeron pro elektroerozivní hloubení [44].

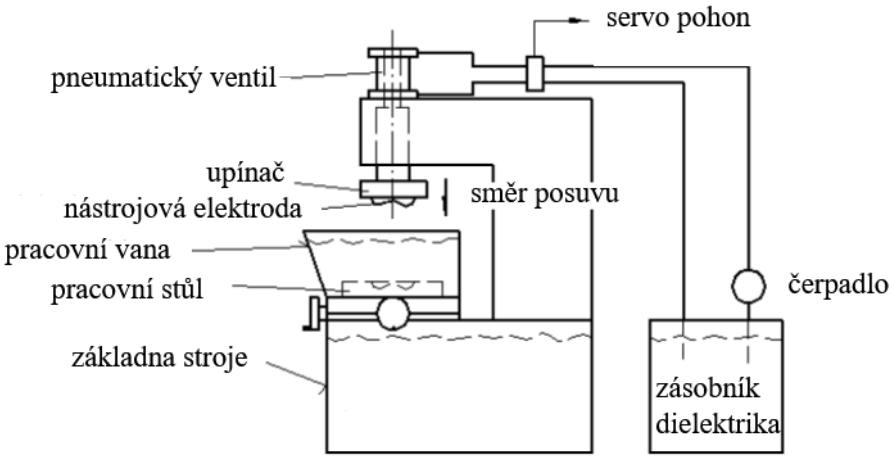
1.8.1 Části elektroerozivních hloubicích strojů

Stroje pro elektroerozivní hloubení se skládají z následujících základních částí:

- rámu stroje,
- pracovní nádrže,
- zásobníku hydraulické kapaliny,
- generátoru,
- systému upínání a ustavení,
- systému polohování,
- řídicího systému,
- zásobníku na elektrody,
- čerpacího, filtračního a chladicího systému.

1.8.2 Konstrukce hloubicích strojů

Konstrukce elektroerozivního hloubicího stroje je zobrazena na obr. 1.20.



Obr. 1.20 Konstrukce elektroerozivního hloubicího stroje [6].

Základnou elektroerozivního stroje je rám, v němž jsou umístěny další části stroje. Rám stroje se musí vyznačovat tuhostí, jelikož je namáhán hydraulickými silami. Další vhodnou vlastností rámu elektroerozivního stroje je schopnost tlumení chvění. Rám by měl být vyroben s dostatečnou geometrickou přesností a měl by se vyznačovat teplotní stabilitou. Při výraznějších výkyvech tepla dochází k nepřesnostem obrábění. Tepelně namáhané součásti jsou ochlazovány prouděním dielektrické kapaliny, elektrické součásti generující více tepla jsou izolovány, případně umístěny samostatně. Zakrytování stroje a izolace umožňují zmírnit vliv změn teplot okolního prostředí. Rám stroje se nejčastěji vyrábí z litiny s lupínkovým grafitem, případně z polymerbetonu [6, 7, 45].

Pro obrábění rozměrných součástí je potřeba zvolit stroj s dostatečnou plochou pracovního stolu a rozměrem pracovní vany, s čímž souvisí maximální možná hladina dielektrika. Některé hloubicí stroje mají vyjížděcí vanu, což dovoluje snadnější přístup k pracovnímu stolu a umožňuje stroj zapojit do automatizované linky. Ostatní stroje mají přístup k pracovnímu stolu řešen pomocí otevíracích dveří [44, 45].

1.8.3 Řídicí a polohovací systém

Numerický řídicí systém se stará o kontrolu a koordinaci dílčích částí stroje. V řídicím systému lze nastavit technologické parametry elektroerozivního obrábění, načíst nebo vytvořit NC program. Software řídicího systému je možno ovládat buď přímo na obrazovce u stroje, ručním dálkovým ovladačem, případně je možno načíst program vytvořený ze vzdáleného počítače. Současné CNC elektroerozivní hloubicí stroje disponují víceosými souřadnými systémy, umožňujícími hloubit i tvarově složité prvky bez náročnosti na upnutí [46].

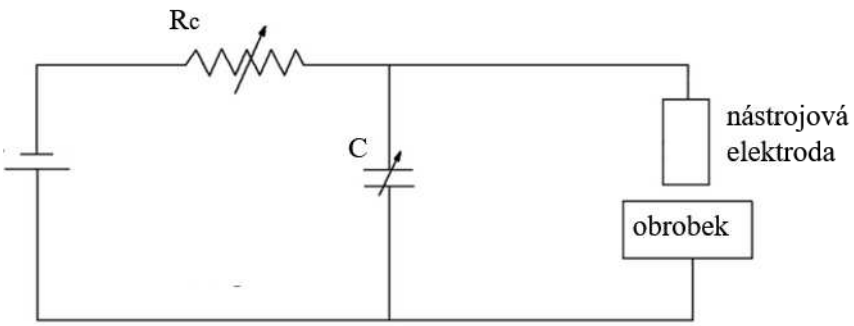
Pohyby jednotlivých částí v příslušných osách jsou zajištěny servomotory. Mimo pozicování po pracovním prostoru musí servomotory zajistit regulaci přísuvu nástrojové elektrody tak, aby byla dodržena vhodná vzdálenost mezi elektrodami podle aktuálních podmínek v jiskrové mezeře. Pro elektroerozivní hloubení se využívá jedna ze dvou variant, a to buď krokový motor s převodem rotačního pohybu pomocí kuličkových šroubů, nebo lineární motor [47].

1.8.4 Generátory elektroerozivních strojů

Zásadní částí elektroerozivního stroje je generátor. Generátor přivádí mezi nástrojovou elektrodu a obrobek elektrické impulzy o určité frekvenci, napětí a proudu. Generátory elektroerozivních strojů se dělí na [7]:

- závislé,
- nezávislé.

Závislé generátory využívají zapojení ve formě relaxačních obvodů. Činnost těchto generátorů je závislá na poměrech v pracovním prostoru. Závislé generátory jsou nejstarším typem generátorů používaných pro elektroerozivní obrábění. Mezi závislé generátory elektrických impulzů se řadí RC a RLC obvody. Schéma RC obvodu je zobrazeno na obr. 1.21. Princip je založen na opakovaném nabíjení kondenzátoru zdrojem stejnosměrného napětí na hodnotu průrazného napětí dielektrika. Tato hodnota se mění dle aktuálních podmínek v prostoru mezi elektrodami, je tedy závislá. Po dosažení této hodnoty dochází k výboji a následnému vybití kondenzátoru. Celý cyklus se pak opakuje. RLC obvody navíc využívají zapojení indukčního prvku, kterým lze dosáhnout změny průběhu vybíjení. Závislé generátory vynikají svou spolehlivostí a jednoduchostí, avšak jejich velkou nevýhodou je velké opotřebení elektrody a nízká energie pulzů [7, 8, 48].

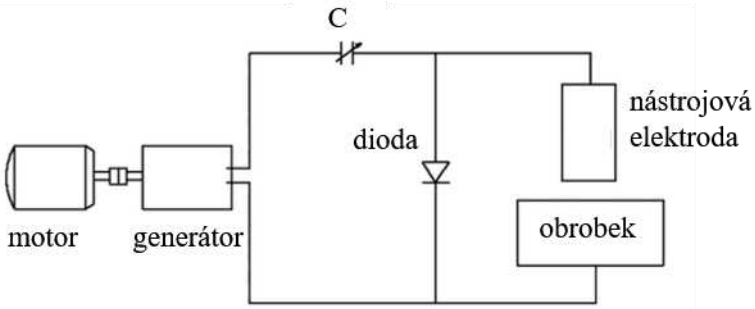


Obr. 1.21 Schéma RC obvodu pro generování impulzů pro EDM hloubení [8].

Nezávislé generátory umožňují nastavovat pracovní parametry erodování nezávisle na stavu v mezielektrodovém prostoru. Existují dva druhy nezávislých generátorů [7]:

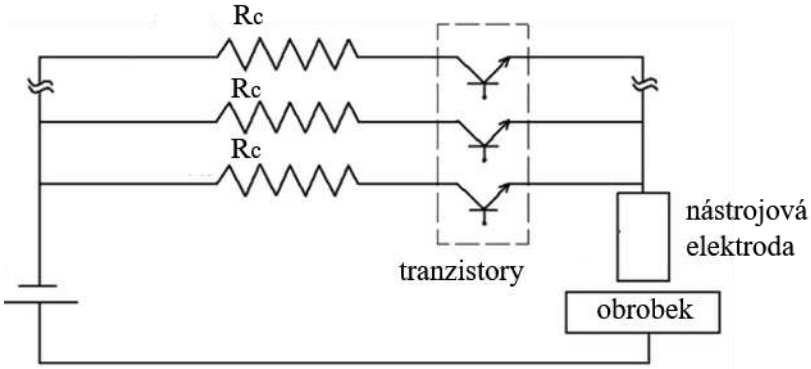
- rotační,
- tranzistorové.

Rotační generátory využívají pro tvorbu opakujících se elektrických impulzů rotaci motoru. Generované střídavé napětí je usměrňováno diodou. Na obr. 1.22 je zobrazeno schéma rotačního generátoru. U těchto generátorů převládá iontová vodivost, pro obrábění je tedy výhodnější použít nepřímou polaritu. Tento typ generátoru je vhodný pouze pro hrubování [7].



Obr. 1.22 Schéma rotačního generátoru [8].

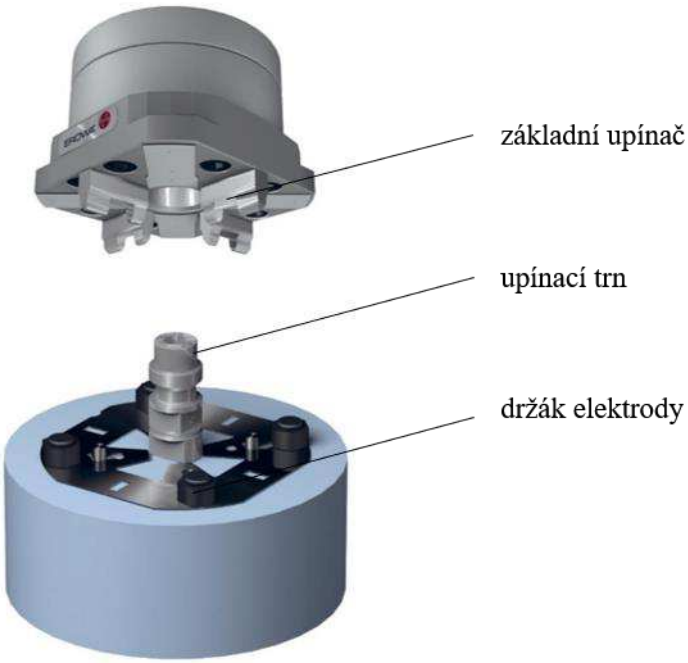
Tranzistorové generátory vynikají širokou škálou možností nastavení pracovních parametrů. Tyto polovodičové generátory se skládají z výkonových tranzistorů, buzených zesilovačem, který dodává impulzy od multivibrátoru. Množství paralelně zapojených tranzistorů ovlivňuje hodnotu pracovního proudu. Schéma tranzistorového generátoru je zobrazeno na obr. 1.23 [7, 8, 49].



Obr. 1.23 Schéma tranzistorového generátoru [8].

1.8.5 Upínací systém

Pro upínání elektrod se běžně používají univerzální upínací systémy. Kromě ruční výměny je tak možné využít i automatické výměny elektrod prostřednictvím výměníku nebo robotizovaného pracoviště. Upínací systém nástrojových elektrod se skládá z několika částí, viz obr. 1.24. Pro výpočet přesnosti se pak musí brát v potaz chyby přesazení jednotlivých částí upínacího systému [50, 51].



Obr. 1.24 Části univerzálního upínacího systému elektrod [52].

Základní upínače jsou nejčastěji pneumatické. Jsou určeny k montáži na pinolu, případně C-osu hloubicího stroje. Upínaní držáků elektrod je do základních upínačů realizováno pomocí univerzálních upínacích trnů, které mají středicí funkci. Otevírání upínače je pneumatické, tlak vzduchu je kolem 6 barů. Základní upínače bývají vybaveny tryskami pro čištění dosedacích referenčních ploch, tlak vzduchu se také využívá ke kontrole správnosti upnutí držáku nástrojových elektrod [51, 53].

Držáky a palety pro nástrojové elektrody jsou vyráběny v různých vyhotoveních, aby bylo možno upnout elektrody různých tvarů a rozměrů. Některé typy jsou zobrazeny na obr. 1.25 [51, 52].

Obr. 1.25 Držáky nástrojových elektrod [54].

Obrobek je upnut v prostoru pracovního stolu, k upnutí slouží soustava lišt, upínek, svěráků nebo jiných upínacích přípravků. Obrobky, které jsou feromagnetické, jsou často upnuty pomocí magnetických upínačů. Není nutné používat velké upínací síly, elektroerozivní hloubení je bezkontaktní obráběcí metoda, obrobek je však namáhán přívodem dielektrické kapaliny [52].

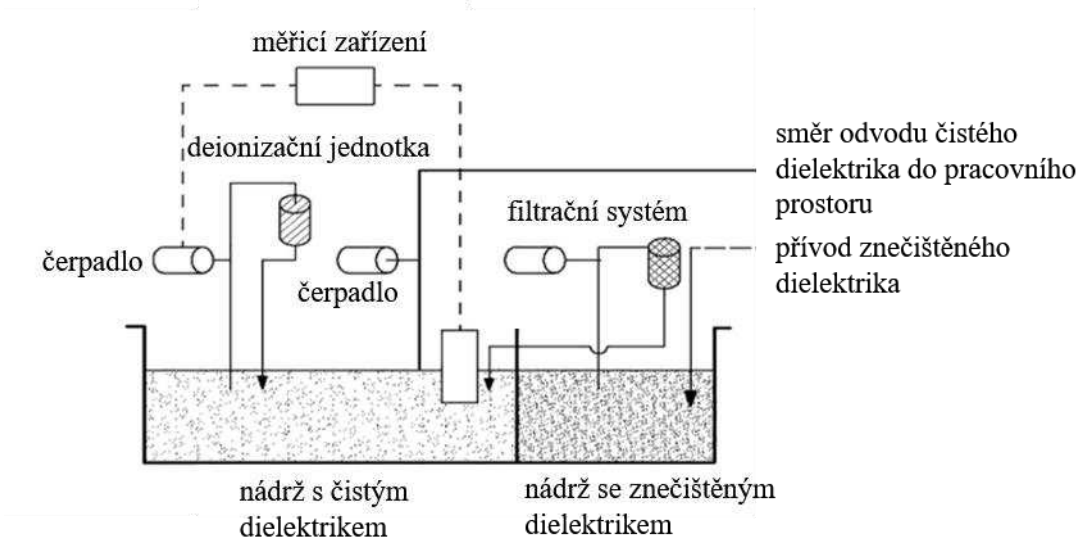
1.8.6 Čerpací a filtrační systém

Systém čerpání a filtrace obstarává přívod dielektrické kapaliny do místa hloubení, dielektrická kapalina by neměla být znečištěná, stav znečištění dielektrika zásadně ovlivňuje proces elektroerozivního úběru materiálu. Nejvýraznější vliv znečištění na vlastnosti dielektrika má přítomnost pevných vodivých částic z materiálu elektrod, dále pak kontaminace rozpustnými částicemi. Zmíněné nečistoty snižují izolační schopnosti dielektrika a způsobují nerovnoměrnosti obráběného povrchu. Dalším nežádoucím vlivem na kvalitu obráběného povrchu je kolísání teploty dielektrika. Aby nedocházelo k těmto jevům, jsou hloubicí stroje vybaveny systémem, který obstarává filtraci, deionizaci a chlazení dielektrické kapaliny [8, 42].

Okruh dielektrického systému se skládá z [8, 42]:

- nádrže s čistým dielektrikem,
- filtrační jednotky,
- chladicí jednotky,
- zásobníku použitého dielektrika,
- čerpadel,
- snímače hladiny
- měřicích systému.

Schéma okruhu dielektrického systému je zobrazeno na obr. 1.26. Cirkulaci dielektrické kapaliny zajišťuje čerpadlo. Použité dielektrikum obsahující částice odebíraného materiálu je z pracovní vany odváděno do zásobníku s použitým dielektrikem. Odtud je dielektrikum odvedeno do filtrační jednotky. Ta je tvořena soustavou filtrů, jedná se o filtry papírové, usazovací nebo odstředivé. Nejčastěji používaným typem filtru jsou papírové lamelové vložky. Filtry jsou charakterizovány propustností, mají určitou životnost, pohybující se v řádu stovek až tisíců hodin, poté je nutná jejich výměna. Chlazení dielektrika probíhá buď řízenou cirkulací vnějším chladičem, nebo pomocí deskového výměníku, který je připojen k chladicímu systému výrobního procesu a nachází se v nádrži s čistým dielektrikem. K nádrži s dielektrikem je připojeno měřicí zařízení, které sleduje stav vodivosti čistého dielektrika. V případě, že používané dielektrikum je destilovaná voda, se v systému dielektrika nachází ještě deionizační jednotka. Pro deionizaci se většinou používá deionizační pryskyřice [8, 42].



Obr. 1.26 Schéma okruhu dielektrického systému [8].

2 ROZBOR TECHNICKÉ KERAMIKY NA BÁZI KARBIDU KŘEMÍKU

Díky svým dobrým mechanickým, tepelným a elektrickým vlastnostem nachází materiály z technické keramiky na bázi karbidu křemíku využití v mnoha odvětvích, tyto materiály si navíc zachovávají své vlastnosti i za náročných podmínek. Materiály na bázi karbidu křemíku se navíc vyznačují chemickou stabilitou a biokompatibilitou [4].

2.1 Klasifikace technické keramiky

Keramika na bázi karbidu křemíku se řadí mezi materiály technické keramiky, označované někdy také jako konstrukční keramika. Jedná se o anorganické nekovové materiály vyráběné ze syntetických surovin [55].

Materiály technické keramiky se dělí na [56, 57]:

- oxidovou keramiku,
- neoxidovou keramiku.

Oxidová keramiky je tvořena většinou jedním oxidem, méně často i směsí více oxidů. U skupiny těchto materiálů převažuje iontová vazba. Nejběžněji používanými zástupci oxidové keramiky jsou keramické materiály na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) a keramické materiály na bázi oxidu zirkoničitého (ZrO_2) [56].

Mezi neoxidovou keramiku patří [57]:

- karbidy,
- nitridy,
- boridy,
- silicidy.

Karbidy se vyznačují vysokou teplotou tání a tvrdostí. Kromě keramiky na bázi SiC, podrobněji rozebrané v následujících kapitolách, patří mezi významné zástupce karbidové neoxidové keramiky například karbid titanu (TiC), používaný pro výrobu cermetů. Dále pak karbid wolframu (WC), který se používá pro výrobu řezných destiček, nebo karbid bóru (B_4C), používaný jako abrazivum při leštění a lapování [57, 58].

Nejvýznamnějším zástupcem nitridové keramiky je nitrid křemíku (Si_3N_4). Keramické materiály na bázi nitridu křemíku nachází uplatnění pro výrobu součástí plynových turbín, raketových trysek, tavicích kelímků a pro výrobu řezných nástrojů. Další důležitou nitridovou keramikou je keramika na bázi nitridu boru (BN), která se užívá jako abrazivní materiál. Z boridů jsou pro technickou praxi důležité především keramiky na bázi boridu zirkonu (ZrB_2) a boridu titanu (TiB_2). Ze silicidů má největší uplatnění keramika na bázi $MoSi_2$, vhodná pro výrobu topných článků [57, 58].

U neoxidových keramik převažuje kovalentní vazba (platí pro keramiku na bázi SiC, dále pak B_4C, BN, Si_3N_4), případně vazba kovová (například keramika na bázi WC, TiC, TiN, TaC). Pro keramiky s převažující kovalentní vazbou je typické polovodičové chování a poměrně vysoký elektrický odpor. Pro kovalentní vazbu platí, že elektrony jsou dvěma sousedícími atomy, vzniká zde směrová vazba. Materiály s kovalentní vazbou se vyznačují vysokou tvrdostí, malou tepelnou roztažností a dobrou chemickou odolností [55, 59].

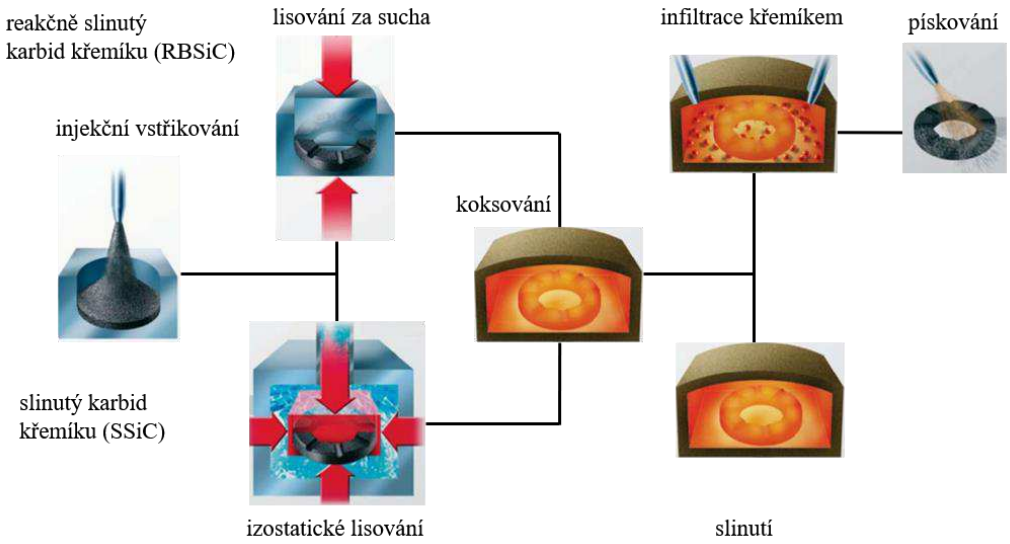
2.2 Výroba keramiky na bázi karbidu křemíku

Technická keramika na bázi karbidu křemíku se vyrábí dvěma různými způsoby úpravy práškové směsi, dle toho se rozlišuje [55, 60]:

- reakčně slinutý karbid křemíku,
- slinutý karbid křemíku.

Reakčně slinutý karbid (RBSiC – z anglického reaction bonded silicon carbide) je často označován také jako karbid křemíku infiltrovaný křemíkem (SiSiC). Technická keramika na bázi reakčně slinutého karbidu křemíku se vyrábí lisováním za sucha ze směsi karbidu křemíku a uhlíku, následovaném silicizačním procesem. Pro míchání složek se používá injekční vstřikování, případně i jiné metody tvarování keramiky jako např. suspenzní lití. Během silicizačního procesu je směs infiltrována roztaveným tekutým křemíkem v neoxidační atmosféře při teplotách kolem 1 600 °C, během toho dochází k difúzi uhlíku přes tekutý křemík a vzniká sekundární karbid křemíku krystalizující na částicích původního karbidu křemíku. Zrna karbidu křemíku se propojují do trojrozměrné kosterní struktury, křemík vyplňuje dutiny a póry. Při následném výpalu dochází jen k nepatrnému smrštění. Po vypalovacím procesu se provádí pískování [55, 59, 60, 61].

Slinutý karbid křemíku (SSiC) je připravován pomocí izostatického lisování a následného slinovacího výpalu. Během izostatického lisování se využívá mokrá forma, hodnota tlaku je až 200 MPa. Použitý prášek karbidu křemíku o vysoké čistotě se vyznačuje jemnými zrny do velikosti 1 µm. Během slinování, které probíhá v ochranné atmosféře při teplotě přibližně 2 100 °C, dochází k růstu krystalů z použitých prášků karbidu křemíku a ke smrštění. Výsledkem je pevné monolitické těleso. Schéma přípravy slinutého karbidu křemíku a porovnání rozdílu s přípravou reakčně slinutého karbidu křemíku je zobrazeno na obr. 2.1 [59, 60, 61].



Obr. 2.1 Příprava reakčně slinutého karbidu křemíku a slinutého karbidu křemíku [60].

2.3 Vlastnosti keramiky na bázi karbidu křemíku

Karbid křemíku je polymorfní materiál, vyskytuje se ve dvou modifikacích [57]:

- nízkoteplotní β modifikace,
- vysokoteplotní α modifikace.

Nízkoteplotní modifikace SiC má kubické uspořádání krystalové mřížky. Vysokoteplotní modifikace vzniká nad teplotou 2 100 °C a má hexagonální krystalickou mřížku [57].

Existuje několik druhů technické keramiky na bázi karbidu křemíku, jejichž přesné materiálové vlastnosti jsou dány chemickým složením, mikrostrukturou a způsobem výroby.

Experimentální část diplomové práce se konkrétně věnuje reakčně slinované keramice na bázi karbidu křemíku, pro úplnou specifikaci se jedná o produkt pod označením ROCAR SIG od výrobce CeramTec Czech Republic, s.r.o., jehož vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Vlastnosti keramiky na bázi karbidu křemíku označené názvem ROCAR SIG [60].

Veličina	Jednotka	Hodnota
Hustota	kg/m^3	3 070
Modul pružnosti	GPa	380
Pevnost v tlaku	MPa	3 500
Pevnost v ohybu (při 20 °C)	MPa	340
Poissnovo číslo	-	0,17
Lomová houževnatost	$MPa \cdot m^{1/2}$	4
Měrný elektrický odpor (při 20 °C)	Ω· cm	0,7
Tepelná vodivost (20–100 °C)	W/m·K	115
Koeficient lineární tepelné roztažnosti (20–200 °C)	K^{-1}	$3{,}4 \cdot 10^{-6}$

V následující kapitole jsou uvedeny charakteristické vlastnosti, které obecně mají materiály z technické keramiky na bázi karbidu křemíku.

2.3.1 Mechanické vlastnosti keramiky na bázi karbidu křemíku

Mezi mechanické vlastnosti keramiky na bázi karbidu křemíku patří [2, 4]:

- vysoká tvrdost,
- odolnost proti opotřebení,
- křehkost,
- špatná obrobitelnost,
- nízká hustota,
- vysoká tuhost,
- výborná odolnost proti korozi,
- vysoká pevnost v tlaku.

2.3.2 Tepelné vlastnosti keramiky na bázi karbidu křemíku

Tepelnými vlastnostmi materiálů na bázi karbidu křemíku jsou [4]:

- tepelná odolnost,
- nízká teplotní roztažnost,
- odolnost proti záření,
- velmi dobrá tepelná vodivost.

2.3.3 Elektrické vlastnosti keramiky na bázi karbidu křemíku

Mezi elektrické vlastnosti keramiky na bázi karbidu křemíku se řadí [62]:

- nižší elektrická vodivost,
- vysoké průrazné napětí,
- vysoká mobilita elektronů.

Karbid křemíku v čisté formě SiC má elektrické vlastnosti vhodné pro aplikaci v elektrotechnice jako polovodičová součástka. Oproti obyčejnému Si polovodiči má SiC polovodič vhodnější elektrické a fyzikální vlastnosti, které umožňují použití pro výkonovou elektroniku. Součástky vyrobené z SiC jsou více účinné, mohou pracovat i v prostředí za vysokých teplot a napětí, dokáží pracovat s větší intenzitou elektrického pole a mají větší tepelnou vodivost [63].

2.4 Použití keramiky na bázi karbidu křemíku

Využití materiálů na bázi karbidu křemíku je velmi široké. Nachází uplatnění hlavně v elektrotechnickém průmyslu, leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu a petrochemickém průmyslu. Použití technické keramiky na bázi karbidu křemíku je vhodné i pro extrémní podmínky, materiály na bázi karbidu křemíku mohou nacházet využití v oblastech, kde se obvykle používají superslitiny [3, 4].

Z materiálů na bázi karbidu křemíku se vyrábí například součásti turbín, tepelné výměníky (viz obr. 2.2), trysky, komponenty tepelného motoru, těsnění, ventily, součástky brzdných systémů nebo potrubí. Keramika na bázi karbidu křemíku je vhodná pro tribologické aplikace, například pro ložiska pracující za vysokých teplot. Díky dobrým mechanickým vlastnostem se tento materiál používá pro brusné nástroje. Dalším využitím materiálu na bázi karbidu křemíku jsou aplikace pro balistickou ochranu osob, vozidel a letadel. Materiály na bázi karbidu křemíku se vyznačují biokompatibilitou, nachází využití i v medicíně, lze je použít i v potravinářském průmyslu pro přímý styk s potravinami [4, 60].

Obr. 2.2 Tepelné výměníky z technické keramiky na bázi karbidu křemíku [64].

2.5 Způsoby obrábění keramiky na bázi karbidu křemíku

Mechanické vlastnosti technické keramiky na bázi karbidu křemíku způsobují náročnost obráběcího procesu tohoto materiálu. Konvenční způsoby obrábění, jako soustružení, vrtání a frézování, nejsou vhodné k efektivnímu obrábění materiálů s velmi vysokou tvrdostí a křehkostí. Z konvenčních způsobů obrábění karbidu křemíku se používá broušení diamantovými nástroji, kterým ovšem nelze dosáhnout složitých tvarových ploch. Zásluhou vysokému opotřebení nástroje z drahých materiálů je broušení keramiky na bázi karbidu křemíku finančně náročné [4, 5, 62].

K nekonvenčním obráběcím metodám vhodným k obrábění tvrdých materiálů patří [5]:

- obrábění vodním paprskem,
- obrábění ultrazvukem,
- laserové obrábění,
- obrábění paprskem elektronů,
- obrábění plazmou,
- elektrochemické a chemické obrábění,
- elektroerozivní obrábění.

Pro obrábění keramiky na bázi karbidu křemíku je možné použít řezání abrazivním vodním paprskem, obrábění ultrazvukem, laserové obrábění a elektroerozivní obrábění [5].

Použitím metody řezání abrazivním vodním paprskem je možné dosáhnout vysokých řezných rychlostí bez vzniku tepelně ovlivněné zóny. Tato metoda však není vhodná pro řezání tenkých částí a nedá se s ní dosáhnout složitějších geometrií. Navíc obrobený povrch nedosahuje dostatečné kvality [65].

Obráběním keramiky na bázi karbidu křemíku pomocí ultrazvuku lze dosáhnout dobré kvality povrchu, pokud nástroj vykonává současně i rotační pohyb a je použito diamantových abrazivních zrn. To však dělá proces velmi nákladným, navíc je hodnota objemového úběru materiálu malá a dosažení komplexnější geometrie velmi náročné [66, 67].

Laserovým obráběním keramických materiálů se dosahuje vysoké rozměrové přesnosti. Obrábění laserem nezávisí na vodivých vlastnostech obráběného materiálu. Nevýhodou této metody je vznik rozsáhlé tepelně ovlivněné oblasti [5, 68].

Elektroerozivním obráběním keramických materiálů na bázi karbidu křemíku se dají obrábět složité geometrické tvary. V porovnání s ostatními nekonvenčními způsoby obrábění matriálů na bázi karbidu křemíku je elektroerozivní obrábění nejvhodnější způsob i z ekonomického hlediska [4, 5].

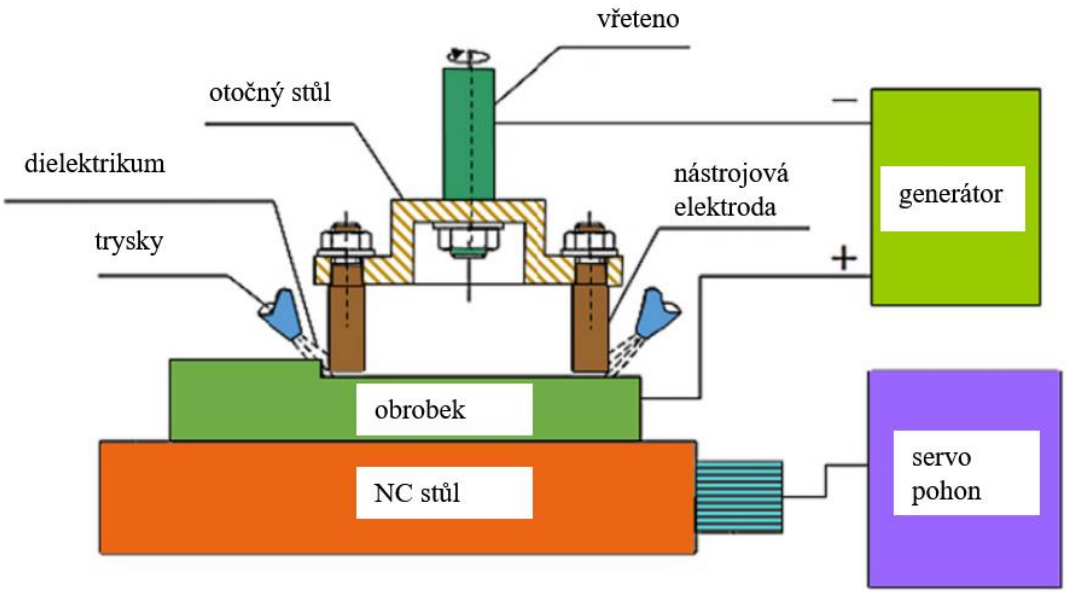
V současnosti nejvíce zkoumanými způsoby elektroerozivního obrábění keramických materiálů na bázi karbidu křemíku jsou [5]:

- drátové elektroerozivní řezání,
- mikro elektroerozivní obrábění,
- elektroerozivní frézování,
- elektroerozivní obrábění s pomocnou elektrodou.

Drátové elektroerozivní obrábění je vhodnou metodou pro řezání tvrdých materiálů jako je technická keramika na bázi karbidu křemíku. Elektroda v podobě drátu může být z mědi, wolframu nebo mosazi. Použití mosazné drátové elektrody je vhodné pro omezení vzniku vibrací. Omezujícím parametrem při drátovém řezání keramiky na bázi karbidu křemíku je opakující se lámání drátu. Kromě řezání drátovou elektrodou je v současnosti zkoumaným způsobem elektroerozivního řezání metoda, při níž se používá nástrojová elektroda v podobě tenké fólie z mědi. Touto metodou lze dosáhnout zlepšení efektivity řezání keramiky [69, 70].

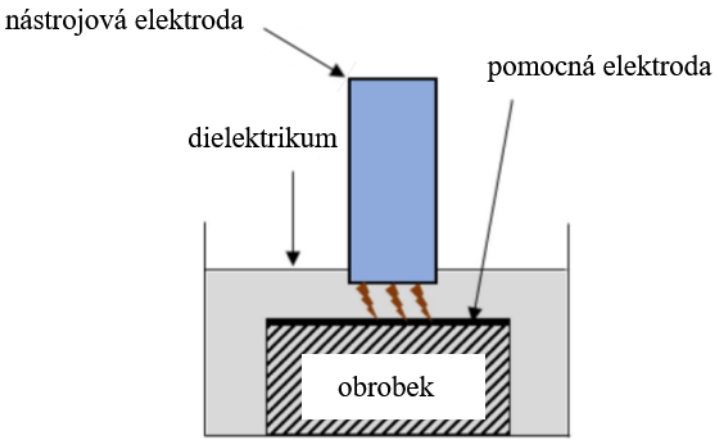
Mikro elektroerozivní obrábění keramiky na bázi karbidu křemíku se používá pro obrábění mikro komponentů pro elektrický průmysl, případně pro obrábění mikro geometrie na větší součásti, jako například chladicí díry v lopatkách turbín. Mikro elektroerozivním obráběním se dají obrábět plochy až 50 µm malé [5].

Schéma metody elektroerozivního frézování technické keramiky na bázi karbidu křemíku je zobrazeno na obr. 2.3. Skládá se z několika elektrod, vyrobených z mědi, spojených s otočným stolem, který je napojen na otočné vřeteno. Úběr materiálu je docílen pomocí kombinace elektroerozivního obrábění a mechanického obrábění. To je dosaženo přidáním diamantových brusných částí, rozmístěných symetricky na obvodu elektrod. Tímto způsobem obrábění lze dosáhnout větší hodnoty úběru materiálu a je možné obrábět větší plochy [5, 71].

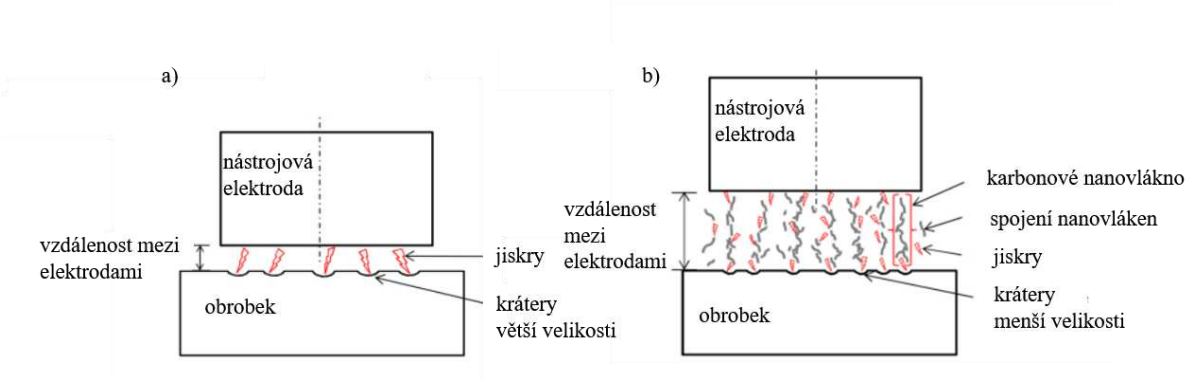


Obr. 2.3 Schéma metody elektroerozivního frézování [71].

Elektroerozivní obrábění s pomocnou elektrodou se používá pro obrábění keramických materiálů, které nemají dostatečnou elektrickou vodivost. Uvádí se, že minimální hodnota měrné elektrické vodivosti pro EDM obrábění je 0,01 $\Omega^{-1}m^{-1}$. Pro zlepšení elektrické vodivosti se aplikuje pomocná elektroda v podobě elektricky vodivé vrstvy na povrch obráběného povrchu. Tato vrstva způsobuje vznik elektrické jiskry mezi obráběným materiálem a nástrojovou elektrodou. Schéma použití pomocné elektrody je zobrazeno na obr. 2.4. Jako pomocná elektroda se může použít například tenká měděná fólie. Další možností je přidání elektricky vodivého materiálu do dielektrika. Příkladem může být přidání karbonových nanovláken, viz obr. 2.5, kde je porovnání této metody s konvenčním EDM hloubením. Přidáním karbonových nanovláken do dielektrika lze docílit větší hodnoty úběru materiálu a snížit opotřebení nástrojové elektrody [5, 72, 73].



Obr. 2.4 Schéma elektroerozivního hloubení s pomocnou elektrodou [5].



Obr. 2.5 Porovnání konvenčního EDM hloubení
a hloubením s využitím směsi karbonových nanovláken [72].
a) konvenční EDM způsob hloubení,
b) hloubení s přidáním směsi karbonových nanovláken do dielektrika.

3 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO EDM HLOUBENÍ TECHNICKÉ KERAMIKY

V této kapitole je představen návrh experimentálního elektroerozivního hloubení technické keramiky na bázi karbidu křemíku. Experiment byl proveden v podmínkách společnosti PENTA TRADING, spol s r.o.

3.1 Představení společnosti PENTA TRADING, spol. s r.o.

PENTA TRADING, spol. s r.o., je firmou specializovanou v oboru elektroerozivního a HSC obrábění. Tato společnost je největším dodavatelem elektroerozivních strojů v České republice, mnoho jejích zákazníku je i ze zahraničí. Kromě prodeje a servisu elektroerozivních strojů se společnost zabývá i vývojem a výrobou vlastních elektroerozivních strojů. PENTA TRADING, spol. s r.o., dále poskytuje služby elektroerozivního obrábění a výrobu nástrojových elektrod na zakázku [74].

PENTA TRADING, spol. s r.o., byla založena v roce 1991. Hlavní sídlo firmy se nachází v Říčanech. Další pobočky společnosti se nachází v Postřelmově, Lounech, Brně a Žďáru nad Sázavou. Jedná se o technologická centra, která poskytují služby elektroerozivního obrábění na zakázku, případně slouží pro představení technologie zákazníkům. Hlavní aplikační centrum společnosti v Postřelmově se zaměřuje na vývoj a testování nových technologií, dále na zkušební obrábění pro zákazníky. Dceřiná společnost PENTA SLOVENSKO, s.r.o., založená v roce 1996, má své centrum v Popradě [74].

Mezi produkty společnosti PENTA TRADING patří drátové řezačky, elektroerozivní hloubičky, elektroerozivní vrtačky a HSC obráběcí centra. Dále pak spotřební materiál pro elektroerozivní obrábění, jako například grafit pro výrobu nástrojových elektrod, řezací dráty, dielektrické kapaliny, filtry nebo deionizační materiály. Společnost PENTA TRADING je dodavatelem moderních CNC drátových řezaček od japonské společnosti FANUC, konkrétně se jedná o elektroerozivní drátové řezačky řady ROBOCUT α-CiB, příklad stroje je uveden na obr. 3.1. Z hloubicích elektroerozivních strojů nabízí společnost produkty německého výrobce Exeron a vlastní hloubicí stroje série PENTA CNC. Z EDM vrtaček nabízí PENTA TRADING manuální řady SY a vlastní CNC vrtačky řady P. PENTA TRADING je dodavatelem HSC obráběcích center značky Exeron, nabízí i vlastní HSC frézky pro obrábění nástrojových elektrod [74].

Obr. 3.1 Drátová řezačka FANUC ROBOCUT α-C600iB [75].

3.2 Podmínky experimentu

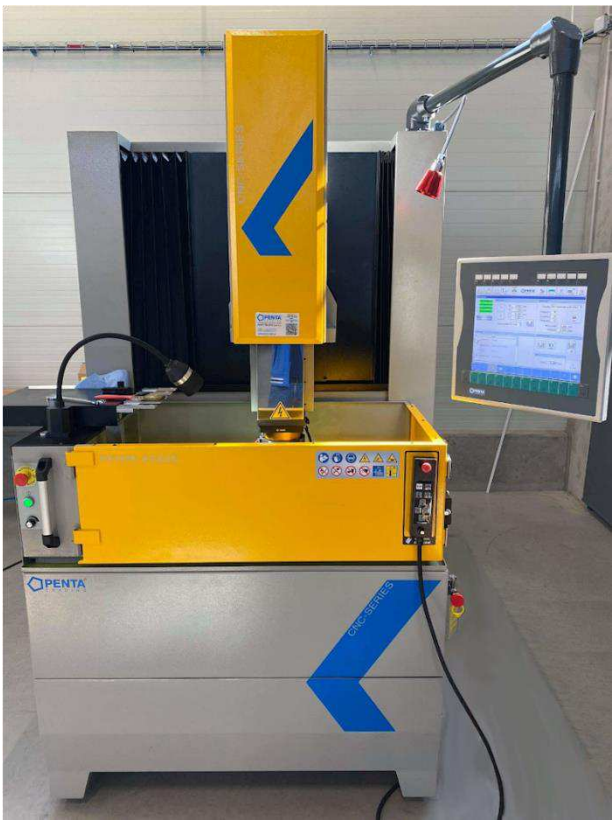
3.2.1 Použitý stroj pro elektroerozivní hloubení

Pro experimentální EDM hloubení technické keramiky na bázi karbidu křemíku byl použit stroj PENTA 433GS CNC. Jedná se o CNC stroj pro elektroerozivní hloubení, jehož řídicí systém je vyvinut firmou Beckhoff. Použitý generátor P-MG2 je nejnovějším typem generátoru od společnosti PENTA TRADING se spínacími unipolárními tranzistory. Řízení generátoru je provedeno pomocí programovatelného hradlového pole typu Spartan-6 od výrobce Xilinx, které má šestnáct jednotek digitálních signálových procesorů a obsahuje přes devět tisíc logických buněk [45].

Stroj PENTA 433GS CNC má pevný pracovní stůl, vyznačuje se tuhou konstrukcí, tělo stroje je vyrobeno z polymerbetonu. Bližší specifikace konstrukce stroje je uvedena v tab. 3.1, stroj je zobrazen na obr. 3.2 [45].

Tab. 3.1 Parametry stroje PENTA 433GS CNC [45].

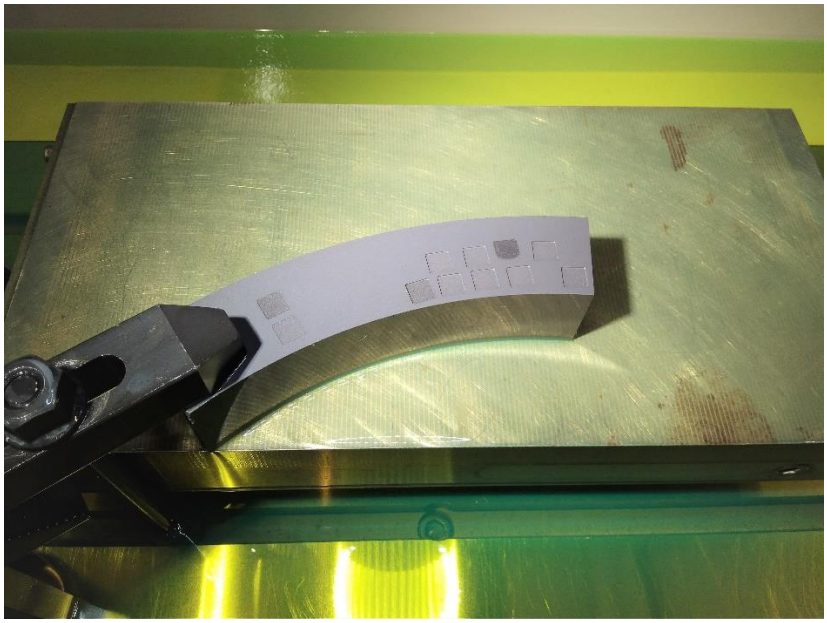
Parametr	Jednotka	Hodnota
Pojezdy os X × Y × Z	mm	400 × 300 × 300
Rozměr pracovní vany	mm	1 000 × 550
Maximální hladina dielektrika	mm	320
Upínací plocha stolu	mm	700 × 350
Odstup stůl – pinola (minimální – maximální)	mm	130–430
Maximální hmotnost obrobku	kg	700
Maximální hmotnost na pinole	kg	100
Rozměry stroje	mm	2 050 × 1 760 × 2 380
Hmotnost stroje	kg	2 210
Náplň dielektrika	l	300



Obr. 3.2 Stroj PENTA 433GS CNC použitý pro experimentální hloubení.

3.2.2 Hloubený obrobek

Hloubený obrobek je z materiálu s obchodním názvem ROCAR SIG od výrobce CeramTec Czech Republic, s.r.o., jedná se o technickou keramiku na bázi reakčně slinutého karbidu křemíku, bližší specifikace je uvedena v kapitole 2.3. Obráběný kus je konkrétně částí těsnicího kroužku, určeného pro aplikaci v náročných podmínkách, např. v petrochemickém průmyslu. Hloubený obrobek, upnutý na pracovním stole stroje PENTA 433GS CNC, je zobrazen na obr. 3.3.



Obr. 3.3 Hloubený obrobek upnutý na pracovním stole stroje.

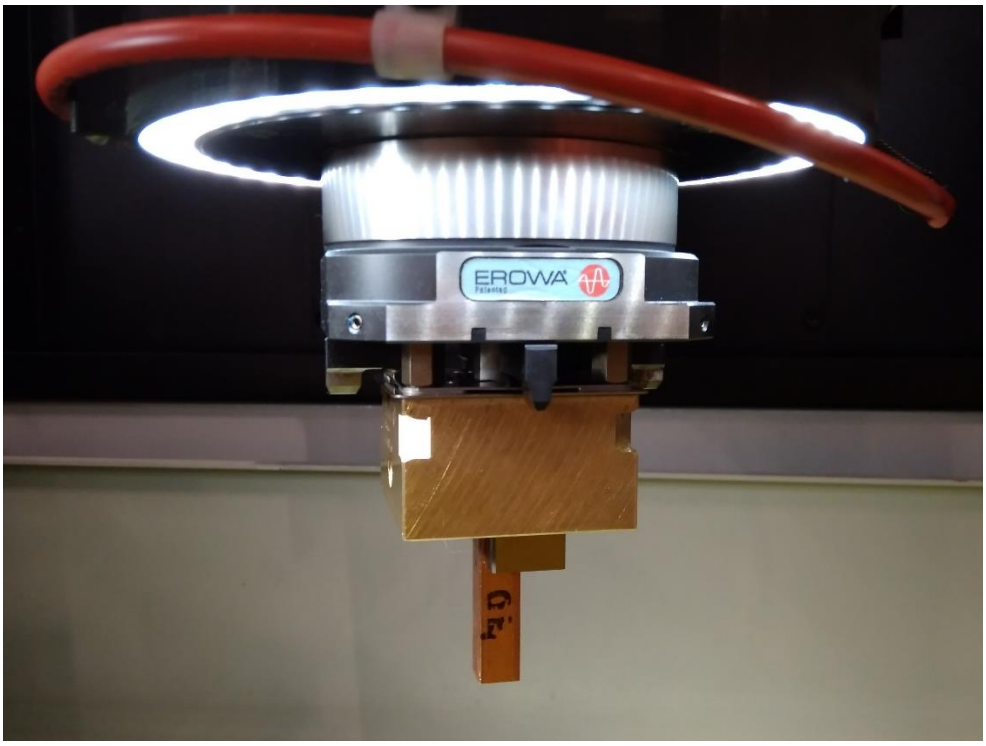
3.2.3 Návrh nástrojové elektrody

Pro experimentální hloubení byly použity nástrojové elektrody z mědi. Vlastnosti měděných elektrod jsou uvedeny v tab. 3.2. Každý vzorek byl obráběn zcela novou nástrojovou elektrodou. Všechny nástrojové elektrody měly čtvercový průřez o rozměrech 10 × 10 mm. Nástrojové elektrody byly upnuty pomocí univerzálního upínacího systému od společnosti Erowa. Na obr. 3.4 se nachází upnutá nástrojová elektroda z mědi, použitá pro experimentální elektroerozivní hloubení.

Pro experimentální hloubení bylo použito celkem deset elektrod, všechny vyrobené vzorky byly erodovány do hloubky 0,5 mm.

Tab 3.2 Vlastnosti měděné nástrojové elektrody [76].

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Hustota (při 20 °C)	kg/m^3	8 940
Tepelná vodivost (při 25 °C)	W/m·K	385
Teplota tání	°C	1 083
Koeficient lineární tepelné roztažnosti (20–100 °C)	K^{-1}	$16{,}4 \cdot 10^{-6}$
Měrný elektrický odpor (při 20 °C)	Ω·cm	$1{,}68 \cdot 10^{-6}$



Obr. 3.4 Upnutá nástrojová elektroda z mědi.

3.2.4 Pracovní prostředí

Obrobek a nástrojová elektroda byly ponořeny v dielektrické kapalině IonoPlus IME-MH od společnosti Oelheld. Jedná se o syntetickou dielektrickou kapalinu na bázi parafínového oleje, tvořenou alifatickými uhlovodíky. Tato univerzální dielektrická kapalina je vhodná pro hrubování i jemné dokončování. Vlastnosti dielektrické kapaliny IonoPlus IME-MH jsou uvedeny v tab. 3.3.

Tab. 3.3 Vlastnosti dielektrické kapaliny Oelheld IonoPlus IME-MH [42].

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Hustota (při teplotě 15 °C)	kg/m^3	790
Kinematická viskozita (při teplotě 40 °C)	mm^2/s	2,5
Bod vzplanutí	°C	107

3.3 Návrh technologických parametrů EDM hloubení

Parametry nastavení stroje pro výrobu experimentálních vzorků byly stanoveny dle doporučení vysoce kvalifikované obsluhy daného stroje v souladu s doporučenými parametry výrobce stroje. Experimentálně vyrobené vzorky byly hloubeny rozdílně nastavenými kombinacemi základních technologických parametrů EDM hloubení, které mají největší vliv na průběh erodování a výslednou jakost obrobeného povrchu. Jedná se o pracovní proud (I), zapalovací napětí (U_z), čas trvání jednoho výboje (T_{on}) a čas doby prodlevy mezi jednotlivými pulzy (T_{off}). Vstupní parametry pro výrobu deseti následně zkoumaných vzorků se nachází v tab. 3.4.

Tab 3.4 Vstupní parametry pro výrobu jednotlivých vzorků.

Číslo vzorku	I [A]	U_z [V]	T_{on} [µs]	T_{off} [µs]
1	30	280	90	22
2	30	220	90	22
3	25	280	90	22
4	25	220	90	22
5	25	280	90	11
6	25	220	40	22
7	20	280	90	22
8	20	280	40	22
9	10	280	40	22
10	6	280	40	22

Hodnota proudu I udává maximální proud, který je přiváděn do jiskry během erodování. Maximální proudová špička v generátoru na stroji PENTA 433GS CNC je 75 A, sloučením několika proudových sekcí lze dosáhnout i vyšších hodnot pracovního proudu.

Uvedené zapalovací napětí má kladnou hodnotu, jde tedy o zapojení s přímou polaritou, kdy obrobek je anodou a nástrojová elektroda katodou. Na stroji použitém pro experimentální hloubení lze nastavit tři stupně zapalovacího napětí (160 V, 220 V, 280 V).

Nastavené časy T_{on} a T_{off} mohou být v průběhu obrábění automaticky upravovány v závislosti na skutečných aktuálních podmínkách v jiskrové mezeře. Aktuální stav v jiskrové mezeře je zjišťován pomocí analogově digitálního převodníku s rychlostí 80 MHz. Pomocí digitálního signálového procesoru se signál zpracovává a dále vyhodnocuje. Podrobné vyhodnocení aktuálních hodnot parametrů v jiskrové mezeře probíhá během každého erodovacího cyklu proto, aby se zamezilo vzniku zápalu. Při zjištění jakékoliv anomálie parametrů mimo vyhrazenou toleranci dochází k pozastavení toku proudu a tím dochází k modifikaci časového průběhu impulzu, což znamená změnu časů T_{on} a T_{off}.

Přivedení čistého dielektrika do pracovního prostoru bylo docíleno pomocí pulsního vyplachování, při kterém se nástrojová elektroda cyklicky vzdaluje od obrobku. Nastavené parametry výplachu jsou uvedeny v tab. 3.5. Velikost zdvihu udává, o jakou vzdálenost se nástrojová elektroda od obrobku vzdálí, rychlost zdvihu pak určuje základní rychlost pohybu nástrojové elektrody. Interval výplachu stanovuje dobu erodování, po které nastane výplach. Tento čas se začíná počítat, jakmile dojde k zapálení jiskry.

Tab. 3.5 Nastavené parametry výplachu.

Parametr výplachu	**Jednotka**	**Hodnota**
Velikost zdvihu	mm	2
Rychlost zdvihu	mm/s	150
Interval výplachu	s	0,5

4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO EDM HLOUBENÍ

Deset vyrobených vzorků a příslušných nástrojových elektrod, kterými byly jednotlivé vzorky hloubeny, bylo dále podrobně zkoumáno. Vzorky po experimentálním EDM hloubení jsou zobrazeny na obr. 4.1.

Obr. 4.1 Vyrobené vzorky.

4.1 Vyhodnocení experimentu na základě úběru materiálu

Důležitým parametrem pro porovnání jednotlivých variant hloubení je velikost úběru materiálu na obrobku za čas. Při výrobě jednotlivých vzorků byl zaznamenáván čas erodování, který je uveden v tab. 4.1, grafické porovnání časů erodování jednotlivých variant je na obr. 4.2.

Pro jednotlivé varianty experimentálního EDM hloubení byl stanoven objemový úběr materiálu, značený MRR – z anglického material removal rate. Jedná se o objem materiálu odebraného za čas pouze na obrobku, objem materiálu odebraného na nástrojové elektrodě se v tomto vztahu nepromítá. Objemový úběr materiálu je určen vztahem (4.1).

$$MRR = \frac{V_O}{t_{erodování}} \; [mm^3 \cdot min^{-1}] \tag{4.1}$$

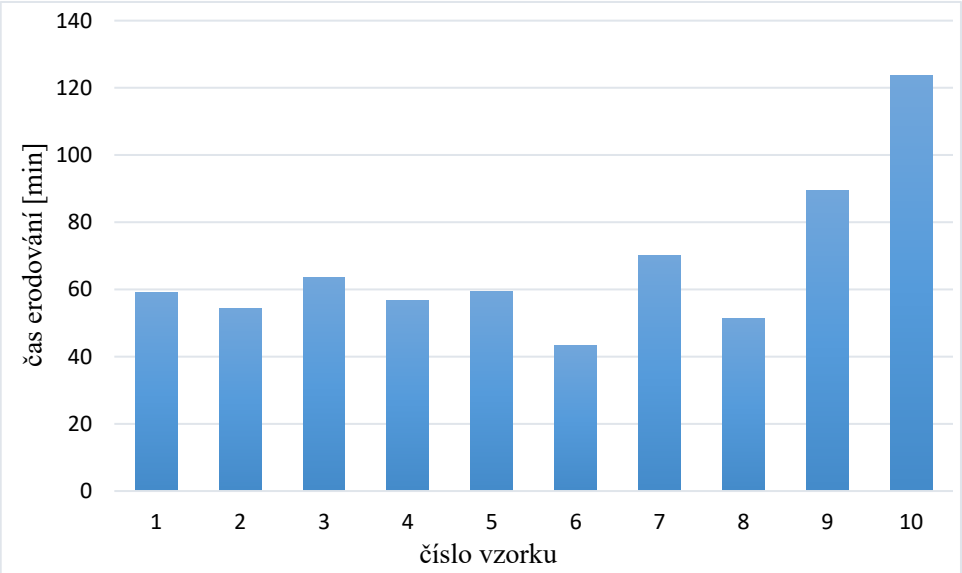
kde: MRR [$mm^3 \cdot min^{-1}$] - objemový úběr materiálu,

V_O [mm^3] - objem odebraného materiálu na obrobku,

$t_{erodování}$ [min] - čas erodování.

Tab. 4.1 Čas erodování a objemový úběr materiálu jednotlivých variant hloubení.

Číslo vzorku	I [A]	U_z [V]	T_{on} [µs]	T_{off} [µs]	$t_{erodování}$ [min]	MRR [$mm^3 \cdot min^{-1}$]
1	30	280	90	22	59,20	0,9135
2	30	220	90	22	54,27	0,9966
3	25	280	90	22	63,60	0,8053
4	25	220	90	22	56,85	0,9513
5	25	280	90	11	59,15	0,9102
6	25	220	40	22	43,43	1,2451
7	20	280	90	22	70,18	0,7713
8	20	280	40	22	51,30	1,0542
9	10	280	40	22	89,43	0,6047
10	6	280	40	22	123,74	0,4370



Obr. 4.2 Grafické porovnání času erodování jednotlivých vzorků.

Nejkratší čas erodování, a tím i největší objemový úběr materiálu, byl dosažen při hloubení vzorku 6 (I = 25 A, U_z = 220 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs). Druhý největší objemový úběr materiálu byl dosažen při hloubení vzorku 8 (I = 20 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs), dále vzorku 2 (I = 30 A, U_z = 220 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs). Varianty hloubení s napětím U_z = 220 V se vyznačují vyšším úběrem materiálu, než varianty s U_z = 280 V. U variant hloubení, lišící se pouze v T_{on}, se ukázalo, že většího úběru materiálu bylo dosaženo s nižší hodnotou T_{on} = 40 µs. To je způsobeno tím, že při nastaveném parametru T_{on} = 90 µs docházelo k nestabilnímu erodování v důsledku špatných vyplachovacích podmínek a systém na základě podmínek v pracovní mezeře přerušil výboj a prodloužil prodlevu mezi impulzy. Jednoznačně nejmenší objemový úběr materiálu byl dosažen během hloubení vzorku 10 (I = 6 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs), dále vzorku 9 (I = 10 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs), jedná se o varianty hloubení s nejnižšími hodnotami pracovního proudu.

4.2 Analýza topografie obrobených vzorků

Topografie povrchu byla vyhodnocena pomocí kontaktního 3D profilometru Dektak XT dodaného výrobcem Bruker, profilometr je zobrazen na obr. 4.3. Naměřená data byla následně zpracovávána v softwaru Vision 64.

Obr. 4.3 Kontaktní 3D profilometr Dektak XT [77].

Pro vyhodnocení topografie povrchu obrobených vzorků byly určeny profilové parametry dle normy ČSN EN ISO 4287 a jejich plošné ekvivalenty dle ČSN EN ISO 25178-2.

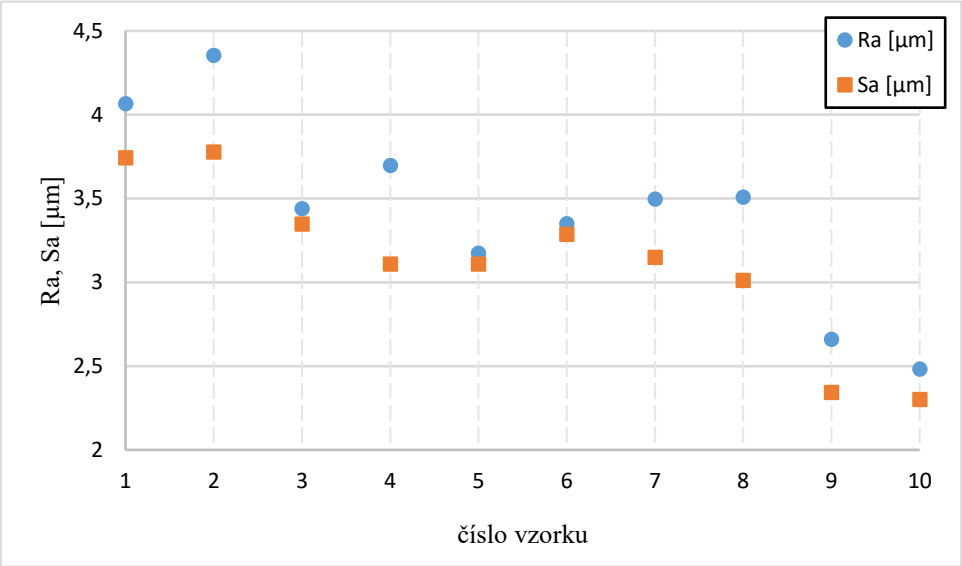
Vyhodnocovanými parametry topografie povrchu vzorků jsou:

- průměrná aritmetická úchylka profilu (Ra),
- průměrná kvadratická úchylka profilu (Rq),
- největší výška profilu (Rz),
- aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu (Sa),
- základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu (Sq),
- maximální výška omezené stupnice povrchu (Sz).

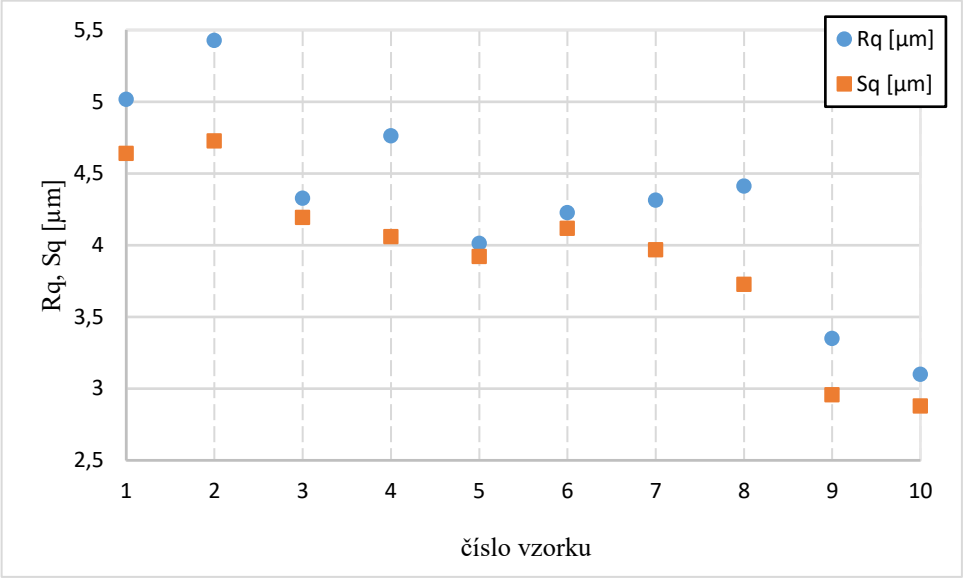
Plošné parametry Sa, Sq a Sz umožňují kvantitativní hodnocení celé plochy, pomocí těchto parametrů lze stanovit obecnou texturu a celkový tvar plochy. Použití těchto plošných parametrů je podobné jako jejich profilových ekvivalentů, od kterých jsou odvozeny. Ekvivalentem profilového výškového parametru Ra je plošný parametr Sa, podobně to je s parametry Rq a Sq, dále i s Rz a Sz. Uvedené parametry topografie povrchu pro jednotlivé vzorky se nachází v tab. 4.2. Na obr. 4.4 je zobrazen graf parametrů topografie povrchu Ra a Sa pro jednotlivé vzorky. Na obrázku 4.5 se nachází graf parametrů Rq s Sq jednotlivých experimentálně hloubených vzorků, na obr. 4.6 je pak dále grafické znázornění parametrů Rz a Sz.

Tab 4.2 Vyhodnocení topografických parametrů povrchu vzorků.

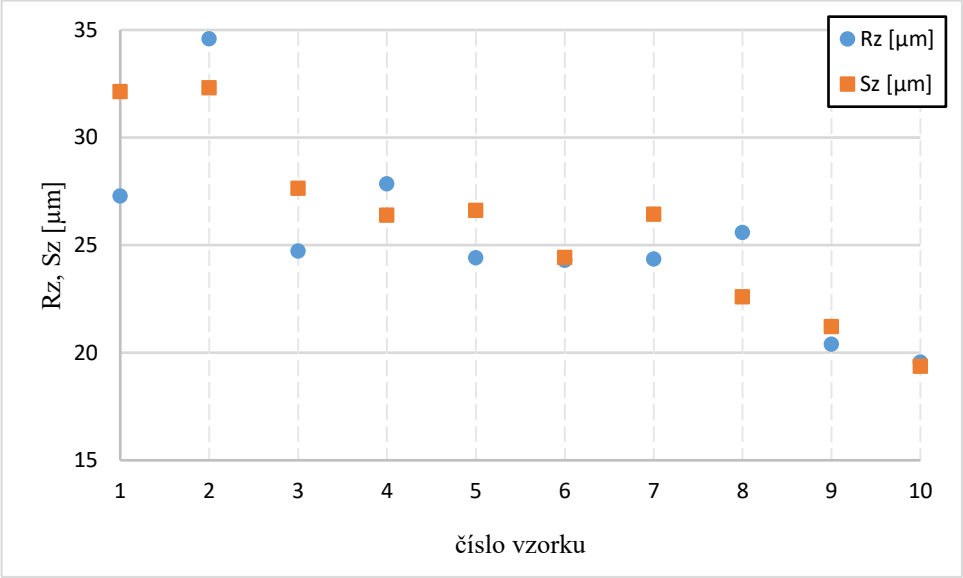
Číslo vzorku	I [A]	U_z [V]	T_{on} [µs]	T_{off} [µs]	Ra [µm]	Rq [µm]	Rz [µm]	Sa [µm]	Sq [µm]	Sz [µm]
1	30	280	90	22	4,065	5,018	27,299	3,743	4,639	32,151
2	30	220	90	22	4,354	5,427	34,594	3,778	4,726	32,318
3	25	280	90	22	3,439	4,328	24,728	3,347	4,193	27,653
4	25	220	90	22	3,697	4,763	27,859	3,108	4,060	26,395
5	25	280	90	11	3,173	4,013	24,415	3,109	3,922	26,623
6	25	220	40	22	3,349	4,227	24,305	3,286	4,117	24,443
7	20	280	90	22	3,496	4,315	24,363	3,149	3,968	26,453
8	20	280	40	22	3,507	4,413	25,603	3,012	3,727	22,605
9	10	280	40	22	2,66	3,350	20,398	2,342	2,957	21,224
10	6	280	40	22	2,483	3,100	19,571	2,301	2,879	19,373



Obr. 4.4 Graf parametrů Ra s Sa jednotlivých vzorků.



Obr. 4.5 Graf parametrů Rq s Sq jednotlivých vzorků.



Obr. 4.6 Graf parametrů Rz s Sz jednotlivých vzorků.

Nejnižších hodnot všech vyhodnocovaných parametrů povrchu bylo dosaženo při hloubení vzorku 10 (I = 6 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs), relativně nižších hodnot v porovnání s ostatními vzorky bylo také dosaženo při hloubení vzorku 9 (I = 10 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs), jedná se o vzorky s nejnižším pracovním proudem. Hodnota Ra vzorku 10 je pouze 2,483µm, Ra vzorku 9 je 2,660 µm. Plošné parametry Sa a Sq těchto dvou vzorků jsou velmi podobné. Nejvyšší hodnoty všech parametrů byly naměřeny na vzorku 2 (I = 30 A, U_z = 220 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs), Ra tohoto vzorku je 4,354 µm, nejvíce se lišícím topografickým parametrem v porovnání s ostatními vzorky je parametr Rz o hodnotě 34,594 µm. Druhé nejvyšší hodnoty zkoumaných parametrů měl vzorek 1 (I = 30 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs) s výjimkou parametru Rz, který byl vyšší u vzorku 4 (I = 25 A, U_z = 220 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs). Vzorky, jejichž parametry hloubení se liší pouze v U_z, jsou rozdílné především v profilových parametrech topografie povrchu. Hodnoty Ra, Rq a Rz jsou nižší u vzorků s vyšším napětím, tedy s U_z = 280 V, rozdíly v plošných parametrech topografie vzorků nejsou příliš výrazné. Hloubením vzorku 6 (I = 25 A, U_z = 220 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs) bylo dosaženo menších hodnot profilových parametrů topografie povrchu než hloubením vzorku 4, který se odlišoval parametrem

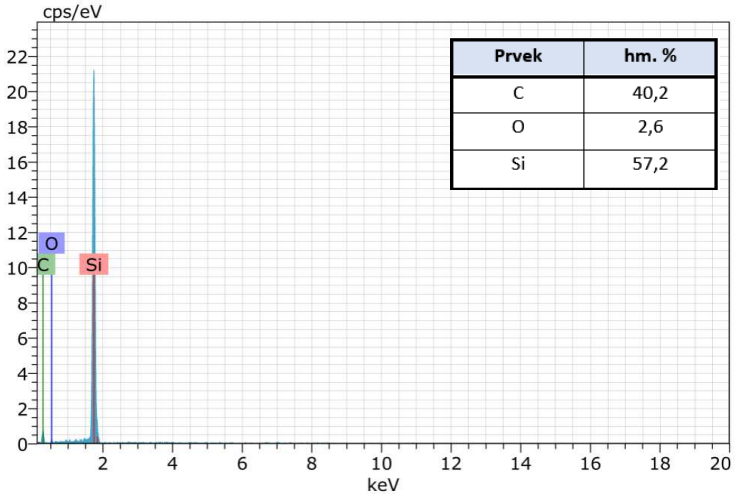
T_{on} = 90 µs. Rozdíl plošných parametrů Sa s Sq nebyl tolik výrazný, hodnoty těchto parametrů byly naměřeny nižší u vzorku 4. Mezi vzorky 7 (I = 20 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs) a 8 (liší se pouze v T_{on} = 40 µs) nejsou zásadní rozdíly v topografii povrchu, jediný výrazněji odlišný parametr je Sz. Vzorek 5 (I = 25 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 11 µs), který se liší oproti vzorku 3 pouze v hodnotě T_{off} (vzorek 3 byl hlouben s T_{off} = 22 µs), se vyznačuje nižšími hodnotami Ra, Rq a jejich plošnými ekvivalenty, parametry Rz a Sz se výrazně neliší.

4.3 Analýza morfologie povrchu

Všechny experimentálně vyrobené vzorky byly očištěny v ultrazvukové čističce a následně analyzovány pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu (SEM) LYRA3 od firmy Tescan. Elektronový mikroskop LYRA3 je vybaven energiově-disperzním detektorem rentgenového záření (EDX), který umožňuje studium chemického složení povrchu vzorků po elektroerozivním hloubení.

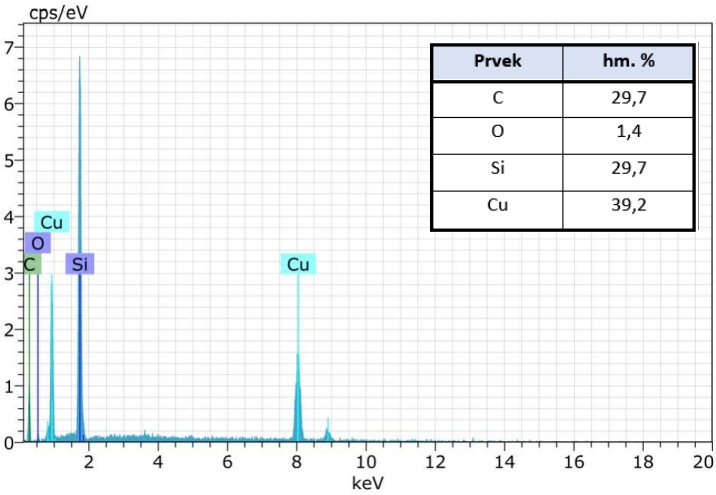
4.3.1 Chemické složení povrchu

Chemické složení povrchu vzorku 10 (I = 6 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs), tedy vzorku s nejnižšími hodnotami topografických parametrů, je zobrazeno na obr. 4.7. Chemické složení povrchu elektrody, použité k hloubení tohoto vzorku je na obr. 4.8. Na těchto obrázcích se nachází výsledné spektrum z EDX analýzy, ze kterého je možné identifikovat a kvantifikovat přítomné chemické prvky. Zastoupení jednotlivých prvků je uvedeno v hmotnostních procentech. Na obr. 4.9 se nachází mapa rozložení jednotlivých prvků, každá barva symbolizuje jednotlivý prvek. Místa s černou barvou jsou hlubší otvory a díry, v kterých zařízení nedokáže sekundární elektrony detekovat. Z analýzy chemického složení je patrné, že na povrchu pracovní části měděné nástrojové elektrody ulpívá množství materiálu odebraného z obrobku. Části povrchu elektrody, kde se vyskytuje pouze uhlík, ukazují místa, kde došlo k opálení od výboje. Povrch hloubeného vzorku není výrazně kontaminován mědí z nástrojové elektrody.



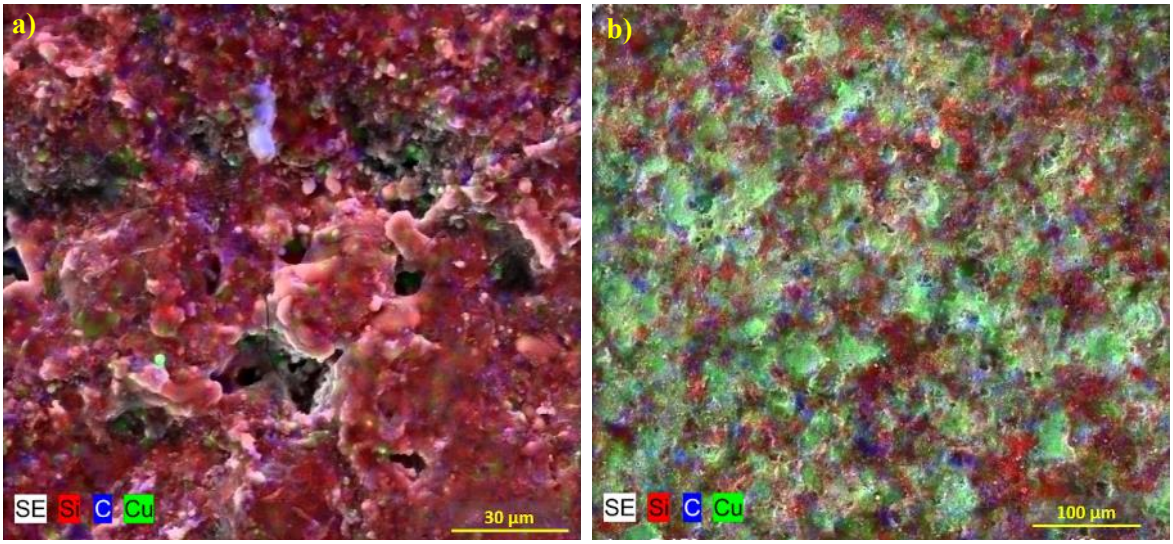
Prvek	hm. %
C	40,2
O	2,6
Si	57,2

Obr. 4.7 Chemické složení povrchu hloubeného vzorku 10 získané EDX analýzou.



Prvek	hm. %
C	29,7
O	1,4
Si	29,7
Cu	39,2

Obr. 4.8 Chemické složení elektrody použité pro hloubenení vzorku 10 získané EDX analýzou.



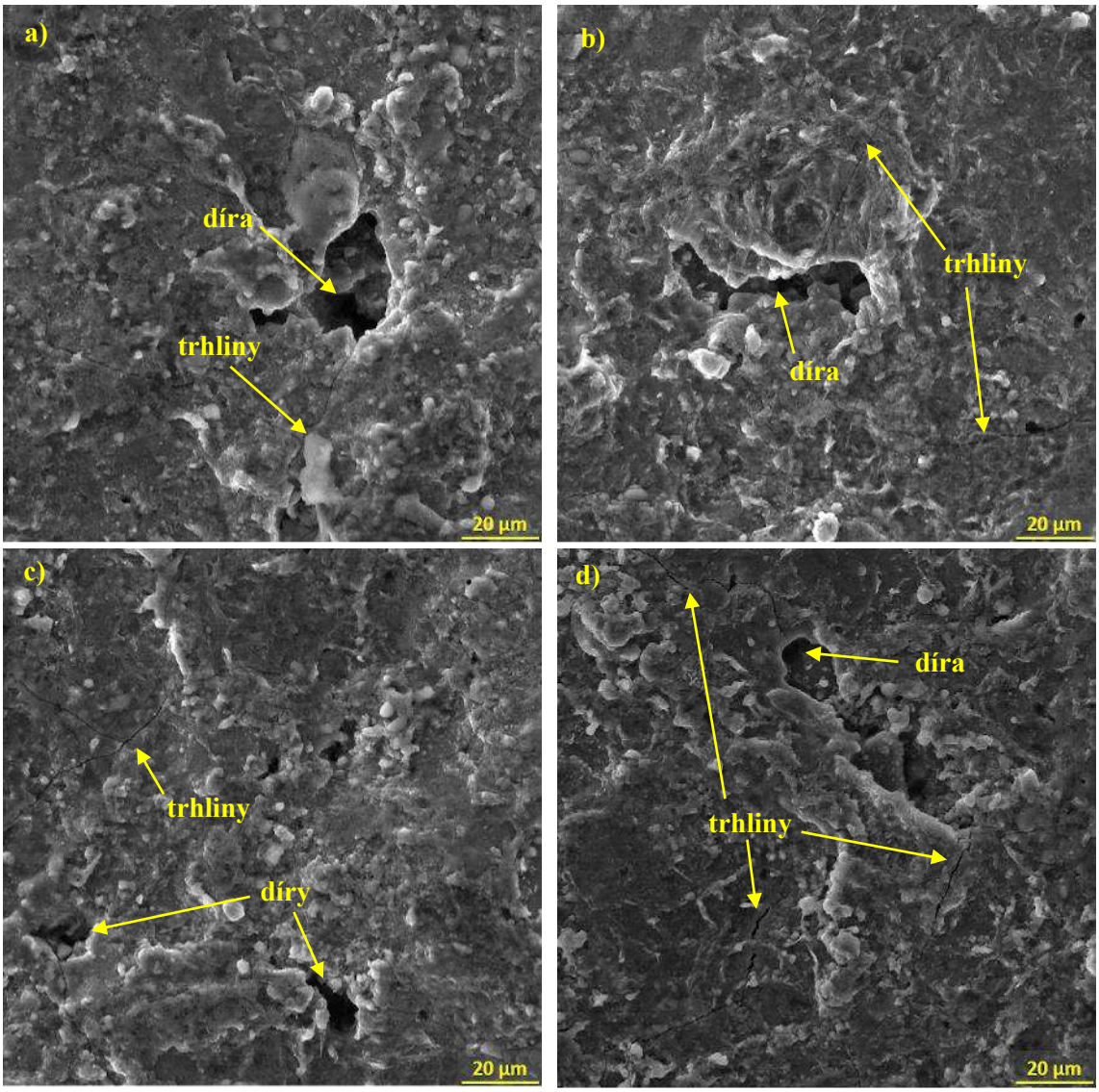
Obr. 4.9 Mapa rozložení chemických prvků.
a) povrch hloubeného vzorku 10,
b) povrch elektrody použité pro hloubení vzorku 10.

4.3.2 Morfologie povrchu hloubených vzorků

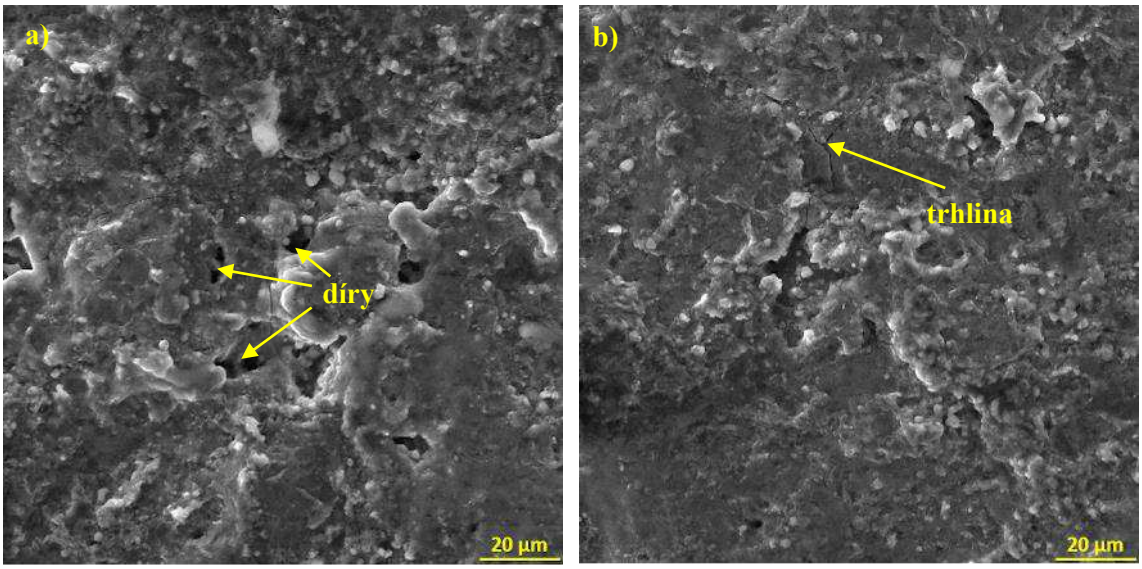
Povrch hloubených vzorků byl analyzován pomocí elektronového mikroskopu LYRA3, pro zobrazení byl využit detektor sekundárních elektronů. Všechny vzorky byly studovány při zvětšení 1 000×, následně při zvětšení 1 500×. Povrch vzorků obrobených elektroerozivním hloubením je tvořen velkým množstvím kráterů, které vznikají vlivem účinku jednotlivých elektrických výbojů. Materiál na povrchu vzorku je tvořen ztuhlou taveninou, která byla roztavena během působení elektrických výbojů za vysokých teplot a následně rychle ochlazena.

Na povrchu většiny experimentálně hloubených vzorků se nachází hluboké díry, kde zcela chybí materiál. Nejrozměrnější díra na povrchu se dá pozorovat na vzorku 6, který byl hlouben s nastavením parametrů stroje I = 25 A, U_z = 220 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs, povrch vzorku se zvětšením 1 500× je zobrazen na obr. 4.10a. Tento jev je velmi výrazný i u vzorku 5 (I = 25 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 11 µs) a 4 (I = 220 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs), viz obr. 4.10b a obr. 4.10c. Výraznější díry v povrchu se objevují u vzorků s menším U_z. Povrchem s hlubokými dírami se vyznačují také vzorky hloubené s nejvyšším pracovním proudem, tedy vzorky 1 (viz obr. 4.10d) a vzorku 2. Díry je možno pozorovat i u vzorku 10,

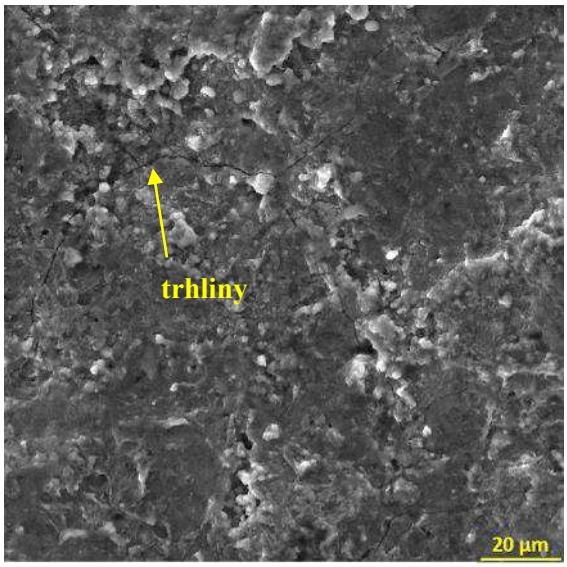
který se vyznačuje nejmenšími hodnotami topografických parametrů, povrch tohoto vzorku se nachází na obr. 4.11a. Povrchem bez výrazných děr se vyznačuje vzorek 9 (viz obr. 4.11b), dále vzorek 7 (viz obr. 4.12). Dalším defektem pozorovaným na povrchu vzorků jsou trhliny. Trhliny na povrchu vznikly u všech vzorků, liší se však velikostí a rozsahem. V porovnání s ostatními vzorky vznikly pouze velmi malé trhliny na povrchu vzorku 10. Relativně málo trhlin se objevilo na vzorku 9. Nejvíce jsou trhliny patrné na vzorcích, které byly hloubeny za největšího pracovního proudu, tedy vzorek 1 a 2. Poměrně výrazné trhliny se objevily také na vzorku 4.



Obr. 4.10 Povrch experimentálně hloubených vzorků.
a) vzorek 6 ($I = 25$ A, $U_z = 220$ V, $T_{on} = 40$ µs, $T_{off} = 22$ µs),
b) vzorek 5 ($I = 25$ A, $U_z = 280$ V, $T_{on} = 90$ µs, $T_{off} = 11$ µs),
c) vzorek 4 ($I = 25$ A, $U_z = 220$ V, $T_{on} = 90$ µs, $T_{off} = 22$ µs),
d) vzorek 1 ($I = 30$ A, $U_z = 280$ V, $T_{on} = 90$ µs, $T_{off} = 22$ µs).



Obr. 4.11 Povrch experimentálně hloubených vzorků.
a) vzorek 10 (I = 6 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs),
b) vzorek 9 (I = 10 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs).



Obr. 4.12 Povrch vzorku 7, hloubeného dle nastavení stroje.
I = 20 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs.

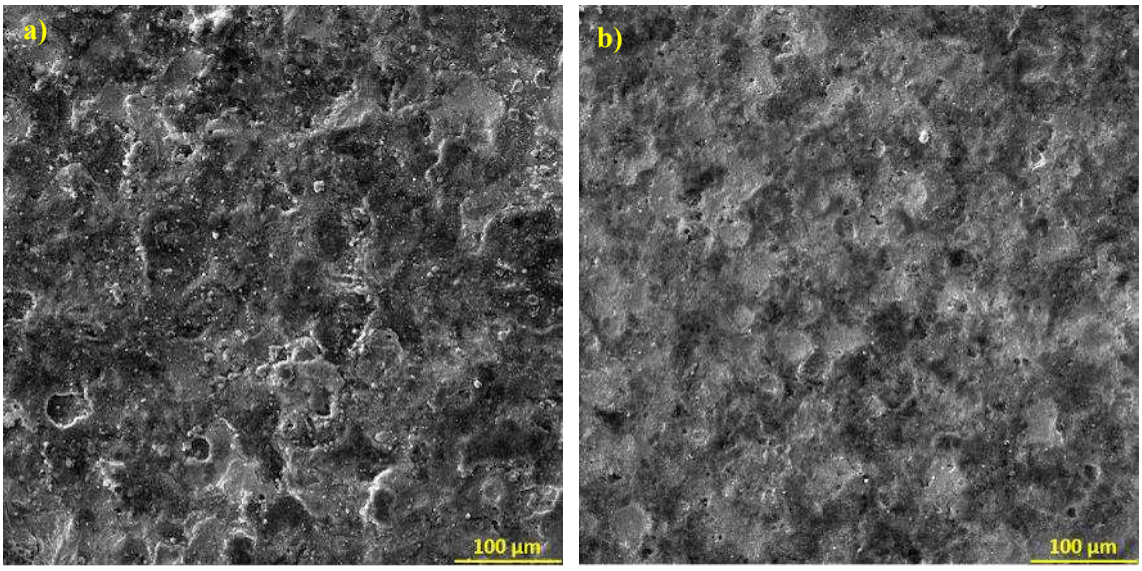
Pro porovnání povrchu všech experimentálně hloubených vzorků při zvětšení 1 000× jsou snímky z elektronového mikroskopu uvedeny v přílohách 1, 2 a 3.

4.3.3 Morfologie povrchu nástrojových elektrod

Povrch pracovní části nástrojových elektrod byl zkoumán elektronovým mikroskopem při zvětšení 400×. Krátery na povrchu nástrojových elektrod jsou mělčí a méně výrazné v porovnáním s povrchem obrobku. Jak již bylo zmíněno, na povrchu nástrojových elektrod ulpívá značné množství materiálu odebraného z obrobku. Tavený materiál obrobku o vysoké teplotě je v prostřednictvím dielektrické kapaliny odebírán z jiskrového prostoru, rychle chladne a jeho část kontaminuje nástrojovou elektrodu. Na všech elektrodách je možné pozorovat části, kde ulpívají nečistoty a materiál obrobku. Povrch použitých nástrojových elektrod se však liší, některé použité elektrody byly obráběním více poškozeny, bylo na nich

možno pozorovat větší prohlubně a více opálených míst. Rozdílná je také velikost částic ulpělého materiálu obrobku.

Na obr. 4.13a se nachází snímek z elektronového mikroskopu povrchu nástrojové elektrody, použité pro hloubení vzorku 2, který se vyznačoval největšími topografickými parametry. Na obr. 4.13b se nachází elektroda, kterou byl hlouben vzorek 10 s naopak nejmenšími topografickými parametry. Při porovnání těchto dvou povrchů je patrné, že elektroda, s kterou byl hlouben vzorek 10, je výrazně hladší, její povrch je méně různorodý, velikost kráterů je menší, na povrchu nejsou tak výrazné prohlubně jako na nástrojové elektrodě použité při elektroerozivním hloubení vzorku 2.



Obr. 4.13 Povrch pracovní části nástrojových elektrod.
a) elektroda použitá při hloubení vzorku 2 (I = 30 A, U_z = 220 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs),
b) elektroda použitá při hloubení vzorku 10 (I = 6 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs).

Snímky pracovní části povrchu všech elektrod, použitých pro elektroerozivní hloubení jednotlivých vzorků, jsou uvedeny v přílohách 4, 5 a 6.

4.4 Analýza opotřebení nástrojových elektrod

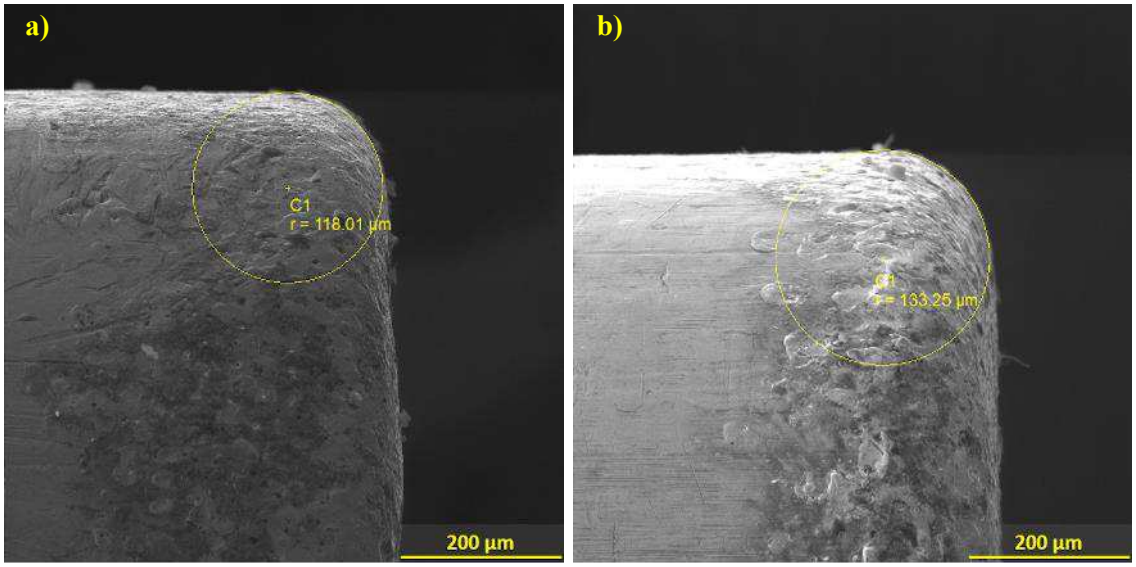
Předmětem analýzy opotřebení nástrojových elektrod je vyhodnocení opotřebení v rozích a na hranách pomocí elektronové mikroskopie. Jedná se o nejvíce opotřebovávané části nástrojové elektrody, které způsobují degradaci jejích tvarů, které jsou přenášeny na obrobek. Opotřebení použitých nástrojových elektrod bylo zkoumáno elektronovým mikroskopem z pohledu z boku a ze shora.

4.4.1 Opotřebení nástrojových elektrod z boku

Nástrojové elektrody byly zkoumány prostřednictvím detektoru sekundárních elektronů, pomocí kterého byly vytvořeny vždy dva snímky sousedních rohů jednotlivých elektrod v pohledu z boku. Snímkem rohu nástrojové elektrody byla následně vedena aproximační kružnice, jejíž poloměr slouží jako měřítko opotřebení jednotlivých elektrod použitých při výrobě vzorků. Všechny zkoumané elektrody se nacházely ve stejné vzdálenosti od objektivu, všechny snímky byly provedeny při zvětšení 200×.

Na obr. 4.14 je znázorněno určení poloměru aproximačních kružnic, na tomto obrázku se konkrétně nachází elektrody s nejmenším opotřebením z pohledu z boku. Jedná se o elektrody použité při hloubení vzorku 10 a vzorku 9. Ze snímků z mikroskopu je patrné, že obráběním

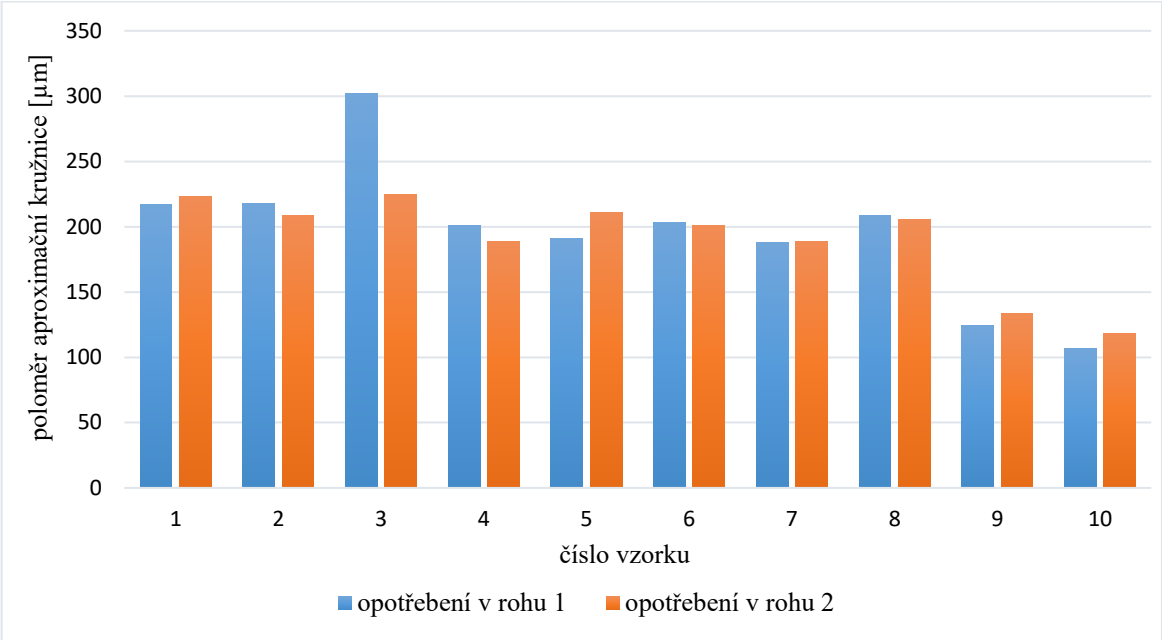
nedocházelo pouze k úbytku materiálu elektrody, ale i k nárůstu a deformaci v rohu a na hraně elektrody. Tyto anomálie tvaru elektrod jsou způsobeny zvýšeným ulpíváním materiálu oderodovaného z obrobku. Naměřené hodnoty poloměrů aproximačních kružnic pro jednotlivé elektrody jsou zobrazeny v tab. 4.3, grafické porovnání těchto hodnot se nachází na obr. 4.15.



Obr. 4.14 Opotřebení nástrojových elektrod v rozích v pohledu z boku.
a) elektroda použitá při hloubení vzorku 10 (I = 6 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs),
b) elektroda použitá při hloubení vzorku 9 (I = 10 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs).

Tab. 4.3 Opotřebení nástrojových elektrod v rozích z pohledu z boku.

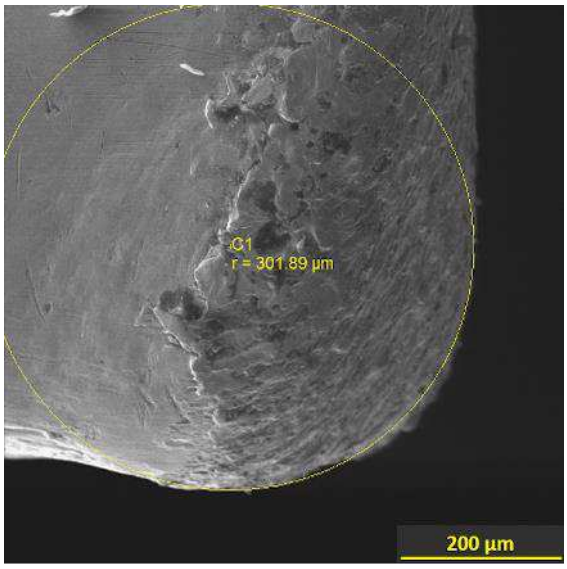
Číslo vzorku	I [A]	U_z [V]	T_{on} [µs]	T_{off} [µs]	poloměr aproximační kružnice v rohu 1 [µm]	poloměr aproximační kružnice v rohu 2 [µm]
1	30	280	90	22	217,27	223,48
2	30	220	90	22	217,55	208,87
3	25	280	90	22	301,89	224,36
4	25	220	90	22	200,84	189,03
5	25	280	90	11	190,69	210,65
6	25	220	40	22	203,1	200,69
7	20	280	90	22	188,17	188,56
8	20	280	40	22	208,89	205,58
9	10	280	40	22	124,16	133,25
10	6	280	40	22	106,63	118,01



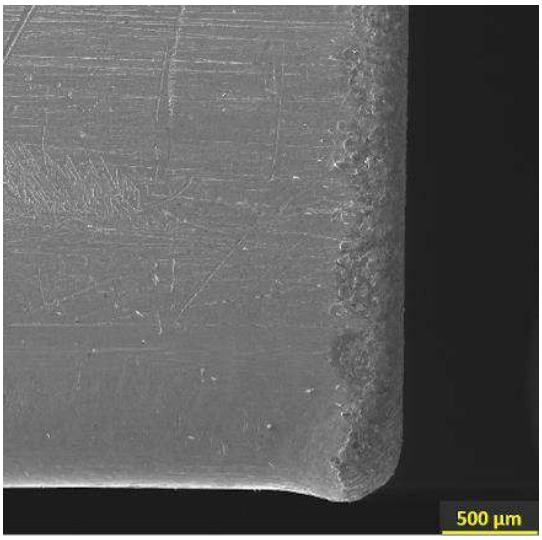
Obr. 4.15 Grafické porovnání opotřebení v rozích elektrod z pohledu z boku.

Z porovnání opotřebení nástrojových elektrod v rozích z pohledu z boku je patrné, že elektrody použité pro výrobu vzorků 10 a 9 se vyznačují výrazně menším opotřebením v porovnání s ostatními vzorky. Jedná se o elektroerozivně hloubené vzorky s nastavením nízké hodnoty pracovního proudu. Opotřebení v rozích z pohledu z boku ostatních elektrod se od sebe příliš neliší, opotřebení se pohybuje okolo 200 µm.

Opotřebení jednotlivých rohů daných nástrojových elektrod se výrazně neodlišuje, hodnoty rohů se neodchylují o více než 20 µm, výjimkou je elektroda použitá pro hloubení vzorku 3. Odlišnost rohů této elektrody je způsobena deformací, která vznikla zvýšeným ulpíváním materiálu z obrobku. Určení aproximační kružnice na deformovaném rohu nástrojové elektrody použité pro hloubení vzorku 3 ($I = 25$ A, $U_z = 280$ V, $T_{on} = 90$ µs, $T_{off} = 22$ µs) je zobrazeno na obr. 4.16. Obrázek 4.17 zachycuje deformaci této elektrody při zvětšení 50×.



Obr. 4.16 Aproximační kružnice určující opotřebení elektrody použité pro hloubení vzorku 3.

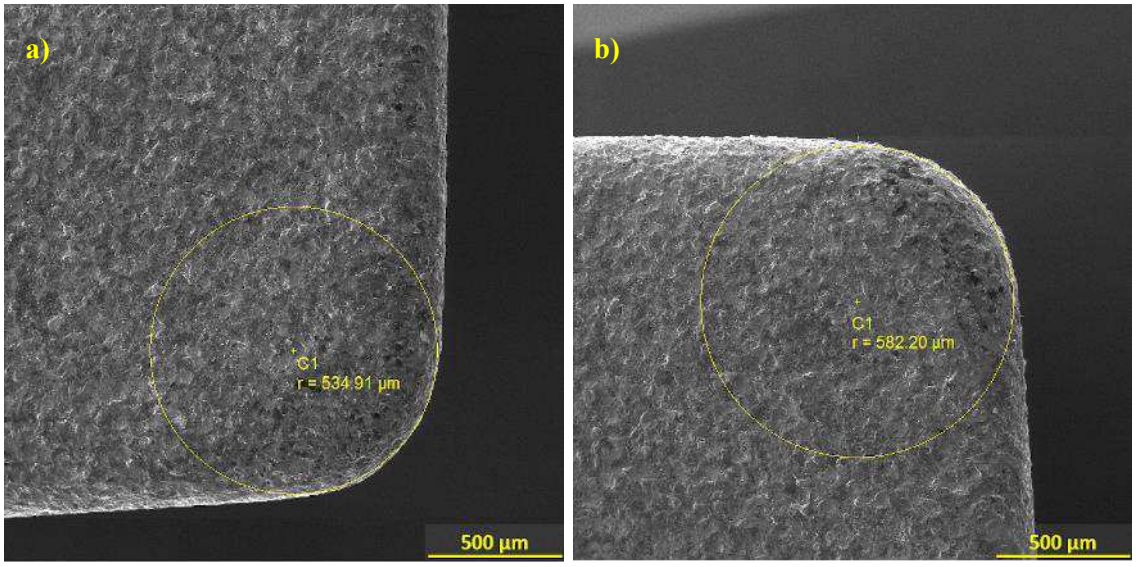


Obr. 4.17 Deformace nástrojové elektrody použité pro hloubení vzorku 3.

Snímky z elektronového mikroskopu s aproximačními kružnicemi, které určují opotřebení nástrojových elektrod použitých pro elektroerozivní hloubení všech jednotlivých vzorků, se nachází v přílohách 7, 8 a 9.

4.4.2 Opotřebení nástrojových elektrod v rozích z pohledu shora

Opotřebení nástrojových elektrod v rozích z pohledu shora bylo určeno pomocí snímků z elektronového mikroskopu, měřítkem opotřebení byl poloměr vytvořených aproximačních kružnic. Všechny zkoumané elektrody se nacházely ve stejné vzdálenosti od objektivu, všechny snímky byly provedeny při zvětšení 100×. Zkoumány byly vždy dva sousední rohy jednotlivých nástrojových elektrod. Způsob určení opotřebení nástrojových elektrod v rozích z pohledu shora je zobrazen na obr. 4.18, kde se nachází rohy nástrojových elektrod použitých pro hloubení vzorku 4 a vzorku 6. Na rohu elektrody, kterou byl hlouben vzorek 4 ($I = 25$ A, $U_z = 220$ V, $T_{on} = 90$ µs, $T_{off} = 22$ µs), byl naměřen nejmenší poloměr aproximační kružnice. Na rohu nástrojové elektrody použité k hloubení vzorku 6 ($I = 25$ A, $U_z = 220$ V, $T_{on} = 40$ µs, $T_{off} = 22$ µs) byl naměřen naopak největší poloměr aproximační kružnice určující opotřebení elektrody v rohu z pohledu shora.



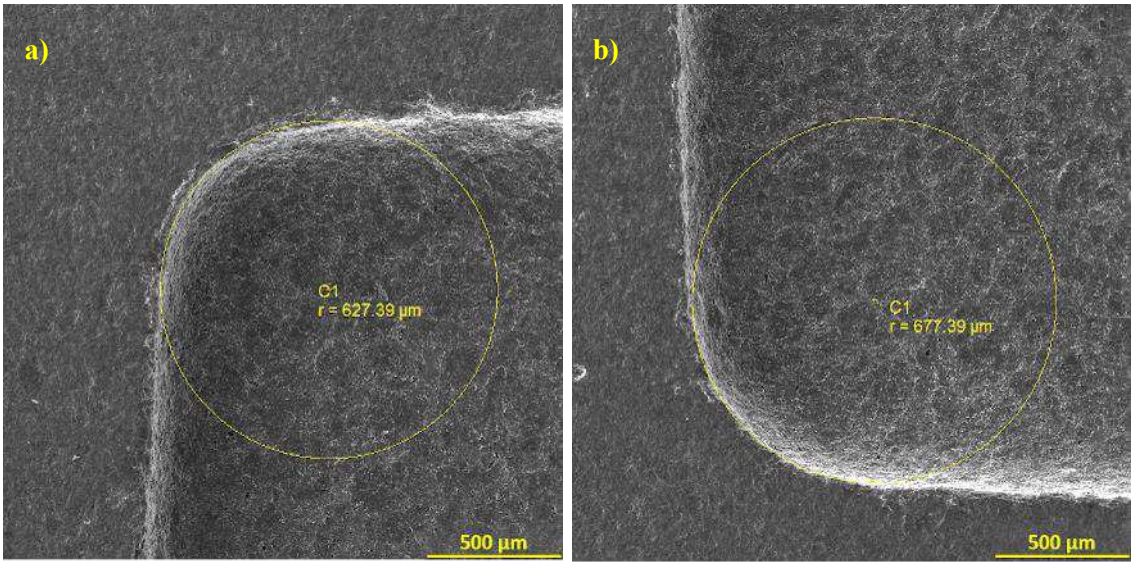
Obr. 4.18 Určení aproximačních kružnic rohů nástrojových elektrod z pohledu shora.
a) elektroda použitá pro hloubení vzorku 4 ($I = 25$ A, $U_z = 220$ V, $T_{on} = 90$ µs, $T_{off} = 22$ µs),
b) elektroda použitá pro hloubení vzorku 6 ($I = 25$ A, $U_z = 220$ V, $T_{on} = 40$ µs, $T_{off} = 22$ µs).

Rohy nástrojových elektrod neměly před experimentálním elektroerozivním hloubením ostré hrany, byly již vyrobeny s rádiusem. Účelem analýzy opotřebení elektrod v rozích z pohledu shora je srovnání rádiusu na elektrodě, určeného aproximační kružnicí, a výsledného rohu na obrobku. Rohy nástrojových elektrod jsou nejvíce opotřebovávaným místem na elektrodě. Toto opotřebení se přenáší na přesnost obrobených tvarů. Jak již bylo zmíněno, obráběním nedochází pouze k úbytku materiálu nástrojové elektrody, ale i k deformaci rohů a ulpívání materiálu obrobku. Přesnost erodovaných rohů na obrobku je rozebráno v následující kapitole, kde se nachází i výsledky naměřených opotřebení jednotlivých nástrojových elektrod v rozích z pohledu shora pro účely porovnání.

4.4.3 Přesnost erodovaných rohů na obrobku

Analýza přesnosti erodovaných rohů na všech vyrobených vzorcích byla vyhodnocována pomocí aproximačních kružnic, určených ze snímků z detektoru sekundárních elektronů. Poloměry aproximačních kružnic představují rádiusy na vyrobených vzorcích. Všechny vzorky byly studovány při zvětšení 100×, zkoumány byly vždy dva sousední rohy jednotlivých elektroerozivně hloubených vzorků.

Poloměry aproximačních kružnic rohů vyrobených vzorků byly odměřeny dle obr. 4.19, kde se nachází rohy vzorku 2 a vzorku 6. Rádius na rohu vzorku 2 dosáhl nejmenší hodnoty, rádius na rohu vzorku 6 naopak nejvyšší.

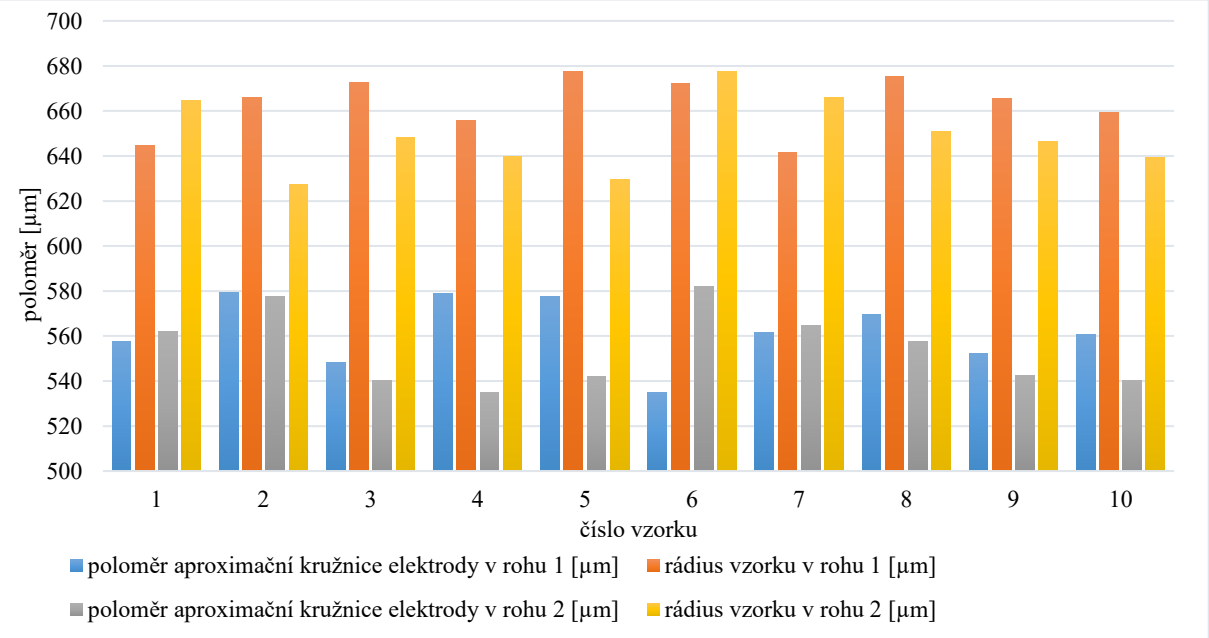


Obr. 4.19 Rádiusy rohů elektroerozivně hloubených vzorků.
a) vzorek 2 ($I = 30$ A, $U_z = 220$ V, $T_{on} = 90$ µs, $T_{off} = 22$ µs),
b) vzorek 6 ($I = 25$ A, $U_z = 220$ V, $T_{on} = 40$ µs, $T_{off} = 22$ µs).

Výsledné hodnoty rádiusů rohů na jednotlivých elektroerozivně hloubených vzorcích se nachází v tab. 4.4. kde jsou pro porovnání i hodnoty aproximačních kružnic, určujících opotřebení daných nástrojových elektrod v rozích z pohledu shora. Tyto hodnoty jsou sestavené do grafu na obr. 4.20.

Tab 4.4 Porovnání rádiusů rohů na vzorcích s opotřebením elektrod v rozích z pohledu shora

Číslo vzorku	I [A]	U_z [V]	T_{on} [µs]	T_{off} [µs]	poloměr aproximační kružnice elektrody v rohu 1 [µm]	poloměr aproximační kružnice elektrody v rohu 2 [µm]	rádius vzorku v rohu 1 [µm]	rádius vzorku v rohu 2 [µm]
1	30	280	90	22	557,42	561,89	644,85	664,79
2	30	220	90	22	579,52	577,53	665,77	627,39
3	25	280	90	22	548,34	540,17	672,63	648,06
4	25	220	90	22	578,95	534,98	655,89	639,73
5	25	280	90	11	577,72	542,11	677,31	629,58
6	25	220	40	22	534,91	582,20	672,09	677,39
7	20	280	90	22	561,78	546,60	666,05	641,47
8	20	280	40	22	569,56	557,65	675,41	650,87
9	10	280	40	22	552,16	542,34	665,35	646,25
10	6	280	40	22	560,83	540,38	659,11	639,36



Obr. 4.20 Grafické porovnání poloměru aproximační kružnice v rohu jednotlivých elektrod z pohledu shora a rádiusu vyrobených vzorků.

Z porovnání poloměrů aproximačních kružnic v daném rohu elektrod z pohledu shora a rádiusů na elektroerozivně obrobených vzorcích je zřejmé, že rádiusy na vyrobených vzorcích jsou větší o přibližně 100 µm než poloměry na příslušných nástrojových elektrodách. Rozdíl těchto hodnot se pohybuje pro všechny vzorky okolo 100 µm, výjimkou je roh 2 vzorku 2 (I = 30 A, U_z = 220 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs), kde je rozdíl mezi poloměrem aproximační kružnice v rohu elektrody a rádiusem na vyrobeném vzorku pouze 50 µm, a roh 1 vzorku 6 (I = 25 A, U_z = 220 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs), kde tento rozdíl činí 137 µm. Oba tyto vzorky byly hloubeny s nastavením parametru U_z = 220 V.

Přesnost obrobených tvarů se mezi jednotlivými vzorky výrazně neliší, naměřené hodnoty rádiusů v rozích obrobených vzorků se pohybuje v rozmezí od 630 do 677 µm. Naměřené hodnoty rádiusu v jednotlivých rozích daného vzorku se u některých vzorků liší v porovnání s ostatními vzorky poměrně výrazněji. Nejvíce se od sebe odlišují rohy vzorku 5 (I = 25 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 11 µs), jedná se o vzorek hloubený s nastavením nejnižší hodnoty T_{off}. Rohy tohoto vzorku se od sebe liší o 48 µm. Další vzorek, kde byl výraznější rozdíl mezi obrobenými rohy, byl vzorek 2, tedy vzorek hloubený s nejvyšší hodnotou pracovního proudu a nižším napětím. Rádiusy v jednotlivých rozích tohoto vzorku se liší o 39 µm. Rádiusy jednotlivých rohů ostatních vzorků se liší nanejvýš o 25 µm.

Z porovnání opotřebení nástrojových elektrod v rozích z pohledu shora je patrné, že k největšímu opotřebení došlo na elektrodě, kterou byl hlouben vzorek 2. Vyšší hodnoty opotřebení je možno sledovat i u ostatních elektrod, kterými byly hloubeny vzorky s nastavením nižšího napětí, tedy U_z = 220 V. Jedná se o vzorek 4 a vzorek 6. U nástrojových elektrod, které byly použity pro elektroerozivní hloubení těchto vzorků, je možno pozorovat výraznější nerovnoměrnosti opotřebení. To platí i pro elektrodu použitou pro hloubení vzorku 5, který byl hlouben s nastavením nejnižšího parametru T_{off}.

5 DISKUZE

5.1 Výběr optimálních variant nastavení parametrů EDM hloubení

Nejmenších hodnot parametrů topografie povrchu bylo dosaženo při hloubení vzorku 10 (I = 6 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs), hodnota Ra tohoto vzorku je 2,48 µm. V porovnání s ostatními vzorky se nízkými hodnotami parametrů topografie povrchu vyznačuje i vzorek 9 (I = 10 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs), hodnota Ra tohoto vzorku dosahuje hodnoty 2,66 µm. Použité nastavení parametrů EDM hloubení pro vzorky 10 a 9 je vhodné pro dokončovací operace, výsledný povrch těchto vzorků je kvalitnější než u ostatních vzorků. Co se týče morfologie povrchu obrobených vzorků 9 a 10, krátery na povrchu jsou mělčí v porovnání s ostatními vzorky, na povrchu se neobjevují příliš výrazné díry ani trhliny. Při použití nastavení těchto parametrů EDM hloubení docházelo k výrazně menšímu opotřebení v rozích nástrojové elektrody z pohledu z boku v porovnání s ostatními vzorky. Výrazný rozdíl mezi těmito vzorky je v hodnotě objemového úběru materiálu při elektroerozivním hloubení těchto vzorků. Při hloubení vzorku 10 bylo dosaženo jednoznačně nejmenší hodnoty MRR, konkrétně 0,44 $mm^3 \cdot min^{-1}$, elektroerozivní hloubení při nastavení parametrů EDM hloubení vzorku 10 je tedy velmi časově náročné. Při hloubení vzorku 9 bylo dosaženo hodnoty MRR = 0,60 $mm^3 \cdot min^{-1}$. Hloubení technické keramiky na bázi reakčně slinutého karbidu křemíku s nastavením parametrů použitých pro hloubení vzorku 9 je o přibližně 31 % rychlejší než s nastavením EDM parametrů použitých pro hloubení vzorku 10. Tento rozdíl může hrát při obrábění většího množství materiálu zásadní roli.

Pro hrubovací operace je požadováno dosažení vysokého objemového úběru materiálu obrobku. Největší hodnoty objemového úběru bylo dosaženo při hloubení vzorku 6 (I = 25 A, U_z = 220 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs), dosaženo byla hodnota MRR = 1,25 $mm^3 \cdot min^{-1}$. Druhá nejvyšší hodnota MRR byla získána při hloubení vzorku 8 (I = 20 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs), hodnota MRR byla v tomto případě 1,05 $mm^3 \cdot min^{-1}$. Povrch vzorku 6 má navíc menší hodnotu Ra, konkrétně Ra = 3,35 µm, zatímco na povrchu vzorku 8 bylo naměřeno Ra = 3,51 µm. Na povrchu vzorku 6 se však vyskytují hluboké díry, na tomto vzorku byla objevena díra největších rozměrů ze všech zkoumaných vzorků. Na elektrodě použité pro hloubení vzorku 6 docházelo k větší degradaci tvaru. Při hloubení vzorku 6 docházelo k výraznějšímu opotřebení nástrojové elektrody, největší poloměr aproximační kružnice určující opotřebení elektrody v rohu z pohledu shora byl naměřen právě na této elektrodě. Z těchto důvodů je vhodnější použití nastavení parametrů EDM hloubení použitých pro hloubení vzorku 8.

5.2 Ekonomické vyhodnocení

5.2.1 Náklady na provoz stroje za hodinu

Náklady na provoz stroje za hodinu jsou tvořeny:

- náklady za elektrickou energii,
- náklady za spotřební materiál,
- přímými mzdami,
- náklady za údržbu.

Náklady za elektrickou energii se vypočítají dle vztahu 5.1:

$$N_e = P \cdot S_{kWh}\ [K\check{c} \cdot \mathrm{h}^{-1}] \tag{5.1}$$

$$N_e = 2{,}5 \cdot 4{,}76 = 11{,}9\ K\check{c} \cdot \mathrm{h}^{-1}$$

kde: N_e [min] - náklady za elektrickou energii,

P [kW] - průměrný příkon stroje,

S_{kWh} [Kč/kWh] - sazba za kWh.

Hodnota příkonu stroje záleží na druhu práce, hrubovací operace se vyznačují větším příkonem než dokončovací operace. Velikost příkonu nejvíce ovlivňuje hodnota pracovního proudu. Velikost sazby za kWh je průměrná cena elektřiny v České republice k 9. 3. 2020 [78].

Vztah 5.2 určuje výpočet ročního efektivního časového fondu stroje.

$$E_f = S_m \cdot T_{Sm} \cdot N_{pd}\ [h] \tag{5.2}$$

$$E_f = 1 \cdot 8 \cdot 251 = 2\,008\ h$$

kde: E_f [h] - roční efektivní časový fond stroje,

S_m [-] - směnnost,

T_{Sm} [h] - pracovní čas jedné směny,

N_{pd} [-] - počet pracovních dní v roce 2020.

Pro stroj použitý pro experimentální část této diplomové práce počítá společnost PENTA TRADING s využitím pouze 60 % ročního efektivního časového fondu stroje. Skutečný roční efektivní časový fond stroje E_{fskut} je tedy přibližně 1 200 h.

Náklady spotřební materiál jsou tvořeny:

- náklady za dielektrickou kapalinu,
- náklady za filtry.

Množství vypařeného dielektrika za rok činí přibližně 10 litrů, vyjádření ve finanční podobě představuje 670 Kč. Náklady na dielektrickou kapalinu za hodinu provozu jsou vypočteny dle vztahu 5.3.

$$N_{dk} = \frac{S_{dk}}{E_{fskut}}\ [K\check{c} \cdot \mathrm{h}^{-1}] \tag{5.3}$$

$$N_{dk} = \frac{670}{1200} = 0{,}56\ K\check{c} \cdot \mathrm{h}^{-1}$$

kde: N_{dk} [Kč·h^{-1}] - náklady na dielektrickou kapalinu na hodinu,

S_{dk} [Kč] - roční spotřeba dielektrické kapaliny,

E_{fskut} [h] - skutečný roční efektivní časový fond stroje.

Náklady za filtry dielektrika jsou určeny dle vztahu 5.4.

$$N_{fd} = \frac{2 \cdot c_{filtr}}{ž} \; [Kč \cdot h^{-1}] \tag{5.4}$$

$$N_{fd} = \frac{2 \cdot 750}{300} = 5 \; Kč \cdot h^{-1}$$

kde: N_{fd} [Kč·h^{-1}] - náklady na filtry dielektrika,

c_{filtr} [Kč] - cena za 1 filtr,

ž [h] - životnost filtru.

Náklady na údržbu a servis činí asi 2000 Kč za rok. Náklady na údržbu a servis za hodinu jsou určeny dle vztahu 5.5.

$$N_u = \frac{N_{ur}}{E_{fskut}} \; [Kč \cdot h^{-1}]$$

$$N_u = \frac{2000}{1200} = 1{,}67 \; Kč \cdot h^{-1} \tag{5.5}$$

kde: N_u [Kč·h^{-1}] - náklady na údržbu a servis na hodinu,

N_{ur} [Kč] - roční náklady na údržbu a servis,

E_{fskut} [h] - skutečný roční efektivní časový fond stroje.

Náklady za mzdu pracovníka N_m (včetně podílu zaměstnavatele na sociálním a zdravotním pojištění) činí 275 Kč/h.

Náklady na provoz stroje za hodinu jsou vypočteny dle vztahu 5.6.

$$N_C = N_e + N_{dk} + N_{fd} + N_u + N_m \; [Kč \cdot h^{-1}]$$

$$N_C = 11{,}9 + 0{,}56 + 5 + 1{,}67 + 275 \; = 294{,}13 \; Kč \cdot h^{-1} \tag{5.6}$$

kde: N_C [Kč·h^{-1}] - celkové náklady na hodinu provozu stroje,

N_e [Kč·h^{-1}] - náklady na elektrickou energii,

N_{dk} [Kč·h^{-1}] - náklady za dielektrickou kapalinu,

N_{fd} [Kč·h^{-1}] - náklady za filtry dielektrika,

N_u [Kč·h^{-1}] - náklady za údržbu a servis,

N_m [Kč·h^{-1}] - náklady za přímé mzdy pracovníka.

K celkovým nákladům za provoz stroje je třeba připočítat náklady za nástrojové elektrody a náklady na jejich zpracování a případné obnovení tvaru elektrod.

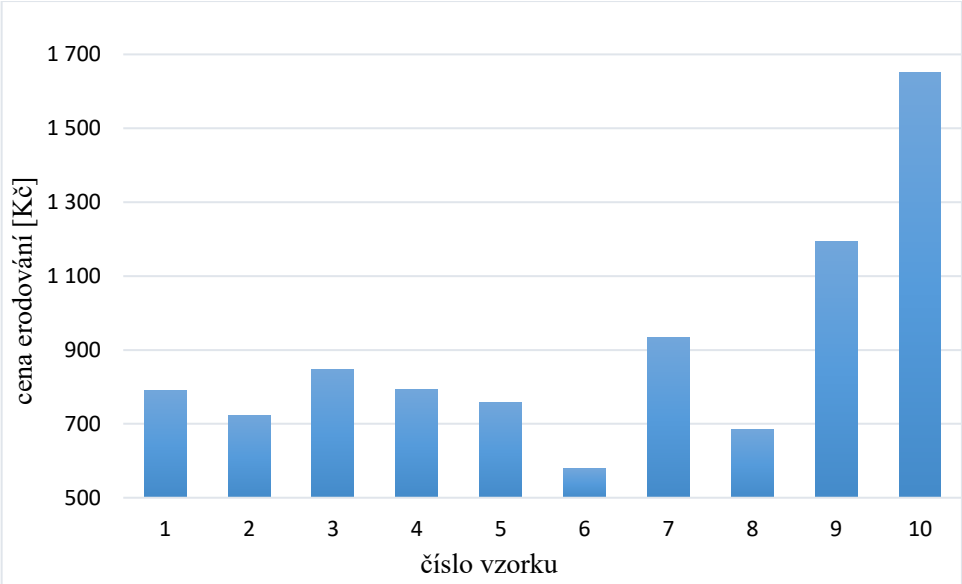
Za experimentální hloubení technické keramiky na bázi karbidu křemíku provedené v této diplomové práci by byla zákazníkovi od společnosti PENTA TRADING, spol. s r.o. účtována cena 800 Kč/h.

5.2.2 Porovnání nákladů variant nastavení parametrů EDM hloubení

Náklady jednotlivých variant nastavení parametrů EDM hloubení byly určeny pomocí vynásobení ceny, která by byla účtovaná zákazníkovi, a času erodování jednotlivých variant. Porovnání nákladů jednotlivých variant nastavení parametrů experimentálního EDM hloubení je uvedeno v tab. 5.1. Grafické zobrazení tohoto porovnání se nachází na obr. 5.1. Nejvyšší náklady byly dosaženy při hloubení vzorku 10, náklady činí 1 650 Kč. Naopak nejlevnější varianta, která byla dosažena při hloubení vzorku 6, má náklady pouze 579 Kč.

Tab. 5.1 Porovnání nákladů jednotlivých variant EDM hloubení.

Číslo vzorku	I [A]	U_z [V]	T_{on} [µs]	T_{off} [µs]	$t_{erodování}$ [h]	cena [Kč]
1	30	280	90	22	0,99	789
2	30	220	90	22	0,90	724
3	25	280	90	22	1,06	848
4	25	220	90	22	0,99	792
5	25	280	90	11	0,95	758
6	25	220	40	22	0,72	579
7	20	280	90	22	1,17	935
8	20	280	40	22	0,86	684
9	10	280	40	22	1,49	1 192
10	6	280	40	22	2,06	1 650



Obr. 5.1 Grafické porovnání nákladů jednotlivých variant EDM hloubení.

ZÁVĚR

V diplomové práci je zkoumáno elektroerozivní hloubení technické keramiky na bázi reakčně slinutého karbidu křemíku. V experimentální části diplomové práce byla provedena výroba deseti vzorků pomocí elektroerozivního hloubení měděnou nástrojovou elektrodou. Jednotlivé vzorky byly hloubeny s rozdílným nastavením čtyř parametrů stroje, konkrétně se jednalo o pracovní proud, zapalovací napětí, čas trvání jednoho výboje a čas doby prodlevy mezi jednotlivými pulzy. Na obrobeném povrchu vzorků byla provedena analýza topografie povrhu, dále byla zkoumána morfologie povrchu pomocí elektronové mikroskopie. Na použitých nástrojových elektrodách byla provedena analýza opotřebení.

Na základě vyhodnocení analýz bylo dosaženo následujících závěrů:

- největší objemový úběr materiálu obrobku MRR byl dosažen při nastavení parametrů stroje použitém při hloubení vzorku 6 ($I = 25$ A, $U_z = 220$ V, $T_{on} = 40$ µs, $T_{off} = 22$ µs), hodnota MRR při hloubení tohoto vzorku byla 1,25 $mm^3 \cdot min^{-1}$,
- nejnižšími hodnotami parametrů topografie obrobeného povrchu se vyznačuje vzorek 10 ($I = 6$ A, $U_z = 280$ V, $T_{on} = 40$ µs, $T_{off} = 22$ µs), Ra tohoto vzorku je pouze 2,48 µm,
- na povrchu nástrojové elektrody ulpívá množství materiálu odebraného z obrobku, dle EDX analýzy je na povrchu použité elektrody vyrobené z mědi zastoupení mědi pouze 39,2 hm. %,
- na povrchu hloubených vzorků nebyla detekována výrazná kontaminace mědi z nástrojové elektrody,
- na povrchu většiny hloubených vzorků se nachází hluboké díry bez materiálu, povrch všech obrobených vzorků se vyznačuje vznikem trhlin,
- degradace tvarů se u použitých nástrojových elektrod lišila, na vzorku 9 ($I = 10$ A, $U_z = 280$ V, $T_{on} = 40$ µs, $T_{off} = 22$ µs) a vzorku 10 ($I = 6$ A, $U_z = 280$ V, $T_{on} = 40$ µs, $T_{off} = 22$ µs) byly naměřeny v porovnání s ostatními vzorky výrazně menší aproximační kružnice určující opotřebení nástrojových elektrod v rozích z pohledu z boku,
- obráběním nedocházelo pouze k úbytku materiálu elektrody, ale také k jejímu nárůstu a deformaci v rohu a na hraně elektrody, na elektrodě použité pro hloubení vzorku 3 ($I = 25$ A, $U_z = 280$ V, $T_{on} = 90$ µs, $T_{off} = 22$ µs) vznikla výrazná deformace v rohu,
- rádiusy rohů obrobených vzorků se pohybují v rozmezí 627–677 µm, poloměry rohů příslušných nástrojových elektrod jsou přibližně o 100 µm menší.

Z provedeného experimentálního elektroerozivního hloubení lze usoudit, že materiál na bázi reakčně slinutého karbidu křemíku lze obrábět pomocí technologie elektroerozivního obrábění. Jako vhodné se jeví použití nástrojové elektrody z mědi.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] KUMAR SAXENA, Krishna, Anand SUMAN SRIVASTAVA a Sanjay AGARWAL. Experimental investigation into the micro-EDM characteristics of conductive SiC. *Ceramics International*. 2016, 42(1), 1597-1610. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.09.111. ISSN 02728842.

[2] SÁNCHEZ, J. A., I. CABANES, L. N. LÓPEZ DE LACALLE a A. LAMIKIZ. Development of Optimum Electrodischarge Machining Technology for Advanced Ceramics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2001, 18(12), 897-905. DOI: 10.1007/PL00003958. ISSN 0268-3768.

[3] BILAL, Azat, Muhammad JAHAN, Didier TALAMONA a Asma PERVEEN. Electro-Discharge Machining of Ceramics: A Review. *Micromachines*. 2019, 10(1). DOI: 10.3390/mi10010010. ISSN 2072-666X.

[4] PAWAR, Pravin, Raj BALLAV a Amaresh KUMAR. Machining processes of silicon carbide: A review. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2017, 51(1), 62-76.

[5] BASHA, S.M., M.M. BASHA, G.V.P. RAJ, N. VENKAIAH a M.R. SANKAR. Past and current trends in electric discharge based machining of Silicon Carbide. *Materials Today: Proceedings*. 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.135. ISSN 22147853.

[6] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-709-9430-4.

[7] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989.

[8] BHATTACHARYYA, Bijoy a Doloi BISWANATH. *Modern Machining Technology: Advanced, Hybrid, Micro Machining and Super Finishing Technology*. Elsevier Science Publishing, 2019. ISBN 978-0-12-812894-7.

[9] SCHUMACHER, B.M., R. KRAMPITZ a J.-P. KRUTH. Historical Phases of EDM Development Driven by the Dual Influence of "Market Pull" and "Science Push". *Procedia CIRP*. 2013, 6, 5-12. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.001. ISSN 22128271.

[10] HUMÁR, Antonín. *Technologie obrábění – 3. část: Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program* [online]. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2005 [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf

[11] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-718-3336-3.

[12] KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.

[13] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I: elektroerozivní, elektrochemické a chemické obrábění*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3943-1.

[14] MIČIETOVÁ, Anna. *Nekonvenčné metódy obrábania*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-853-2.

[15] Technology of spark erosion and Dielectrics. *Novick EDM Machines for Europe* [online]. 2019 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: http://blog.novickedm.com/technology-spark-erosion-dielectrics/

[16] KOHOUT, Jaroslav. *Elektroerozivní CNC hloubicí stroje: Pokyny pro obsluhu a údržbu*. PENTA TRADING, spol. s r.o., 2017.

[17] SUNDARESAN, Ramabalan a J. JEEVAMALAR. Die sinking EDM Process parametres review. In: *International journal of mechanical engineering and robotics research*. 2015, s. 315-326. ISSN 2278-0149.

[18] MCGEOUGH, Joseph Anthony. *Advanced methods of machining*. New York: Chapman and Hall, 1988. ISBN 9780412319709.

[19] EDM Technical Manual. *Poco Graphite, Inc.* [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: http://www.edmtechman.com/about.cfm?pg=2&chap=2

[20] VDI3400 Surface Finish Comparison List. *Up Mold Tooling & Molding Solutions* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: https://upmold.com/vdi3400-surface-finish-comparison-list/

[21] GUPTA, K. a N.K. JAIN. Manufacturing of High Quality Miniature Gears by Wire Electric Discharge Machining. *DAAAM International Scientific Book 2013*. DAAAM International Vienna, 2013, 679-696. DAAAM International Scientific Book. DOI: 10.2507/daaam.scibook.2013.40. ISBN 9783901509940.

[22] MOHAMMEDAZHARUDEEN, J. a R. SIVASUBRAMANIAN. An Experimental Study on Tool Materials For Wire Eletric Discharge Machine. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2014, 3(3). ISSN 2278-0181.

[23] Application of wire cut EDM machining. *Kingred Electrical And Mechanical Technology Co., Ltd.* [online]. 2011 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: http://www.kingedms.com/blog/index.php/2011/11/application-of-wire-cut-edm-machining/

[24] KLIUEV, M., C. BAUMGART a K. WEGENER. Fluid Dynamics in Electrode Flushing Channel and Electrode-Workpiece Gap During EDM Drilling. *Procedia CIRP*. 2018, 68, 254-259. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.058. ISSN 22128271.

[25] BHOSLE, Raju B. a S.B. SHARMA. Multi-performance optimization of micro-EDM drilling process of Inconel 600 alloy. *Materials Today: Proceedings*. 2017, 4(2), 1988-1997. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.045. ISSN 22147853.

[26] Tips on how to select the EDM drilling system. *Novick EDM Machines for Europe* [online]. 2019 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: http://blog.novickedm.com/tips-select-edm-drilling-system/

[27] NAKAGAWA, Takayuki, Takashi YUZAWA, Mitsuji SAMPEI a Atsushi HIRATA. Improvement in machining speed with working gap control in EDM milling. *Precision Engineering*. 2017, 47, 303-310. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2016.09.004. ISSN 01416359.

[28] RICHARD, Jacques a Nicola GIANDOMENICO. Electrode Profile Prediction and Wear Compensation in EDM-milling and Micro-EDM-Milling. *Procedia CIRP*. 2018, 68, 819-824. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.162. ISSN 22128271.

[29] HAN, Fuzhu, Yongxain WANG a Ming ZHOU. High-speed EDM milling with moving electric arcs. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009, 49(1), 20-24. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.08.005. ISSN 08906955.

[30] JIA, Yunhai a Linxin ZHU. Research on Electrical Discharge Grinding Technics and Tool's Life of Polycrystalline Cubic Boron Nitride Cutting Tool. *Procedia CIRP*. 2018, 68, 637-642. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.146. ISSN 22128271.

[31] YADAVA, Vinoda a Ravrinda Nath YADAV. ELECTRICAL DISCHARGE GRINDING (EDG): A REVIEW. *Proceedings of the National Conference on Trends and Advances in Mechanical Engineering*. 2012, 590-597.

[32] SATYARTHI, M.K. a Pulak M. PANDEY. Modeling of material removal rate in electric discharge grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013, 74, 65-73. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.07.008. ISSN 08906955.

[33] EDM Applications. *Exeron GmbH* [online]. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: https://www.exeron.de/en/EDM-line-eroding-machines/EDM-applications

[34] MAHAJAN, Rahul, Hare KRISHNA, Ankit Kumar SINGH a Ranjan Kr GHADAI. A Review on Copper and its alloys used as electrode in EDM. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, 377. DOI: 10.1088/1757-899X/377/1/012183. ISSN 1757-8981.

[35] Poco Graphite, Inc. *Poco EDM Graphite Selection Guide* [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: http://www.edmtechman.com/library/EDM_Selection_Guide-Czech.pdf

[36] Electrode manufacturing for electrical discharge machining (EDM). *Boryszew Formenbau Deutschland GmbH* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: http://www.wedo-mouldmaker.com/manufacturing-electrodes.php

[37] Graphite or Copper. *MoldMaking Technology* [online]. 2014 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: https://www.moldmakingtechnology.com/articles/graphite-or-copper-part-1

[38] Grafit. *PENTA TRADING, spol. s r.o.* [online]. [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: https://www.penta-edm.cz/text-grafit/

[39] Efektivní hloubení a výroba elektrod. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/efektivni-hloubeni-a-vyroba-elektrod.html

[40] Konstrukce a výroba elektrod. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/konstrukce-a-vyroba-elektrod.html

[41] Výroba elektrod – snadno a rychle. *WestCAM* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: https://www.westcam.cz/novinky/vyroba-elektrod-snadno-a-rychle/

[42] Important facts about spark erosion. *Oelheld GmbH* [online]. [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: https://www.oelheld.com/fileadmin/content/Broschueren/EN/Important_facts_about_spark_erosion_-BR-__EN__01.pdf

[43] EDM Fluid. *Canadian Metalworking* [online]. 2013 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: https://www.canadianmetalworking.com/canadianindustrialmachinery/article/metalworking/familiar-with-your-edm-fluidr

[44] Erodiermaschinen. *Exeron GmbH* [online]. [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: https://www.exeron.de/de/EDM-Erodiermaschinen/EDM-Erodiertechnik/EDM-312

[45] PENTA CNC katalog. *PENTA TRADING, spol. s r.o.* [online]. 2018 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: https://www.penta-edm.cz/dokumenty/produkty/penta_cnc_katalog_cj_2018.pdf

[46] Nové generátory v EDM hloubičkách. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009 [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/nove-generatory-v-edm-hloubickach.html

[47] Přichází pátá generace lineární EDM technologie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/prichazi-pata-generace-linearni-edm-technologie.html

[48] ERAWAN, Minhat Ade, Azli YAHYA, Khamis NOR HISHAM, Samion SYAHRULLAIL, Abu Bakar ZURKARMAWAN a Andromeda TRIAS. Power Generator of Electrical Discharge Machining (EDM) System. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, 554, 638-642. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.554.638. ISSN 1662-7482.

[49] GIANDOMENICO, Nicola, Jacques RICHARD, Florian-Henri GORGERAT a Arnaud ROBERT. Smart Generator for Micro-EDM-Milling. *Procedia CIRP*. 2018, 68, 813-818. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.161. ISSN 22128271.

[50] Upínací systémy. *PENTA TRADING, spol. s r.o.* [online]. 2012 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://www.penta-edm.cz/text-upinaci-systemy/

[51] Clamping System 5000 for sinking EDM. *Carl Hirschmann GmbH* [online]. [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: https://www.carlhirschmann.de/en/Clamping-Systems/Products/Clamping-System-5000

[52] EROWA General Catalog. *EROWA LTD* [online]. 2016 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: https://issuu.com/erowa/docs/erowa_general_catalog_2012_e?e=1382557/2681140

[53] Upínací systém 5000 pro elektroerozivní hloubičky a obráběcí katalog. *PENTA TRADING, spol. s r.o.* [online]. 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://www.penta-edm.cz/dokumenty/upinani/penta_hirschmann_5000_2014.pdf

[54] Electrode holders EDM Accessories. *Meusburger Georg GmbH & Co KG* [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: https://www.meusburger.com/EN/US/workshop-equipment/edm-accessories/electrode-holders#!/filter

[55] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.

[56] JONŠTA, Zdeněk. *Technické materiály II*. 2012. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2574-8.

[57] OVČAČÍKOVÁ, Hana a Josef VLČEK. *Speciální keramické materiály*. Ostrava: VŠB –Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3365-1.

[58] Neoxidová keramika. *Ústav skla a keramiky VŠCHT Praha* [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic_Technology/SM-Lect-9-C.pdf

[59] JANOVEC, Jiří, CEJP, Jiří a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.

[60] ROCAR Karbid křemíku. *CeramTec Czech Republic, s.r.o* [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: https://www.ceramtec.com/files/cz_rocar_cz.pdf

[61] HANYKÝŘ, Vladimír a Jaroslav KUTZENDÖRFER. *Technologie keramiky*. Praha: Silikátový svaz, 2008. ISBN 978-80-86821-48-1

[62] KLIUEV, M., U. MARADIA, M. BOCCADORO, R. PEREZ, J. STIRNIMANN a K. WEGENER. Experimental Study of EDM-Drilling and Shaping of SiSiC and SiC. *Procedia CIRP*. 2016, 42, 191-196. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.269. ISSN 22128271.

[63] ZHAO, Yonghua, Masanori KUNIEDA a Kohzoh ABE. Challenge to EDM Slicing of Single Crystal SiC with Blade Electrode Utilizing a Reciprocating Worktable. *Procedia CIRP*. 2016, 42, 185-190. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.268. ISSN 22128271.

[64] Silicon Carbide SIC Ceramic Heat Exchanger Tubes. *Silicon Carbide pipes, beam, nozzle, cyclone* [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: https://qdsic.com/product-item/ceramic-heat-exchanger-tubes/

[65] SRINIVASU, D.S., D.A. AXINTE, P.H. SHIPWAY a J. FOLKES. Influence of kinematic operating parameters on kerf geometry in abrasive waterjet machining of silicon carbide ceramics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009, 49(14), 1077-1088. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.07.007. ISSN 08906955.

[66] CHURI, Nikhi J., Z.J. PEI, Dustin C. SHORTER a Clyde TREADWELL. Rotary ultrasonic machining of silicon carbide: designed experiments. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*. 2007, 12(1/2/3).

[67] THOE, T.B., D.K. ASPINWALL a M.L.H. WISE. Review on ultrasonic machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1998, 38(4), 239-255. DOI: 10.1016/S0890-6955(97)00036-9. ISSN 08906955.

[68] BANIK, S.R., N. KALITA, K.K. GAJRANI, R. KUMAR a M.R. SANKAR. Recent trends in laser assisted machining of ceramic materials. *Materials Today: Proceedings*. 2018, 5(9), 18459-18467. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.187. ISSN 22147853.

[69] ZHAO, Yonghua, Masanori KUNIEDA a Kohzoh ABE. A novel technique for slicing SiC ingots by EDM utilizing a running ultra-thin foil tool electrode. *Precision Engineering*. 2018, 52, 84-93. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.11.012. ISSN 01416359.

[70] ZHAO, Yonghua, Masanori KUNIEDA a Kohzoh ABE. Study of EDM cutting of single crystal silicon carbide. *Precision Engineering*. 2014, 38(1), 92-99. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2013.07.008. ISSN 01416359.

[71] JI, Renjie, Yonghong LIU, Yanzhen ZHANG a Fei WANG. Machining performance of silicon carbide ceramic in end electric discharge milling. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2011, 29(1), 117-122. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2010.09.001. ISSN 02634368.

[72] LIEW, Pay Jun, Jiwang YAN a Tsunemoto KURIYAGAWA. Carbon nanofiber assisted micro electro discharge machining of reaction-bonded silicon carbide. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013, 213(7), 1076-1087. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.02.004. ISSN 09240136.

[73] HASHMI, Saleem. *Comprehensive Materials Finishing*. Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-803249-7.

[74] O firmě PENTA TRADING. *PENTA TRADING, spol. s r.o.* [online]. 2017 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: https://www.penta-edm.cz/o-nas/

[75] FANUC ROBOCUT řady α-CiB. *PENTA TRADING, spol. s r.o.* [online]. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: https://www.penta-edm.cz/dokumenty/produkty/fanuc-cib-penta-cj.pdf

[76] Copper, Cu. *MatWeb: Material Property Data* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=1980eb23287a4408adc404dd39293942

[77] Mechanical profilometer Bruker Dektak XT. CEITEC - Central European Institute of Technology [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: http://nano.ceitec.cz/mechanical-profilometer-bruker-dektak-xt-dektak/

[78] Průměrná cena elektřiny za kWh v roce 2020. *Elektřina.cz* [online]. 9. 3. 2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.elektrina.cz/cena-elektriny-za-kwh-2020-cez-eon-pre-bohemia-centropol-a-dalsi

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
D	[mm]	Průměr dutiny
E_f	[h]	Roční efektivní časový fond stroje
GAP	[mm]	Vzdálenost mezi elektrodami
I	[A]	Pracovní proud
I_e	[A]	Střední proud
M	[mm]	Minimální vůle
MRR	[$mm^3 \cdot min^{-1}$]	Objemový úběr materiálu
N_C	[$Kč \cdot h^{-1}$]	Celkové náklady za hodinu provozu stroje
N_{dk}	[$Kč \cdot h^{-1}$]	Náklady na dielektrickou kapalinu za hodinu
N_e	[$Kč \cdot h^{-1}$]	Náklady na elektrickou energii stroje za hodinu
N_{fd}	[$Kč \cdot h^{-1}$]	Náklady na filtry dielektrika za hodinu provozu stroje
N_m	[$Kč \cdot h^{-1}$]	Náklady na přímé mzdy pracovníka za hodinu
N_u	[$Kč \cdot h^{-1}$]	Náklady na údržbu a servis stroje za hodinu
P	[kW]	Příkon hloubicího stroje
Q_V	[mm^3]	Celkové množství odebraného materiálu na obou elektrodách
S_a	[µm]	Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu
S_m	[-]	Směnnost
S_q	[µm]	Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu
S_z	[µm]	Maximální výška omezené stupnice povrchu
R_a	[µm]	Průměrná aritmetická úchylka povrchu
R_q	[µm]	Průměrná kvadratická úchylka povrchu
R_z	[µm]	Výška největší profilu obrobeného povrchu

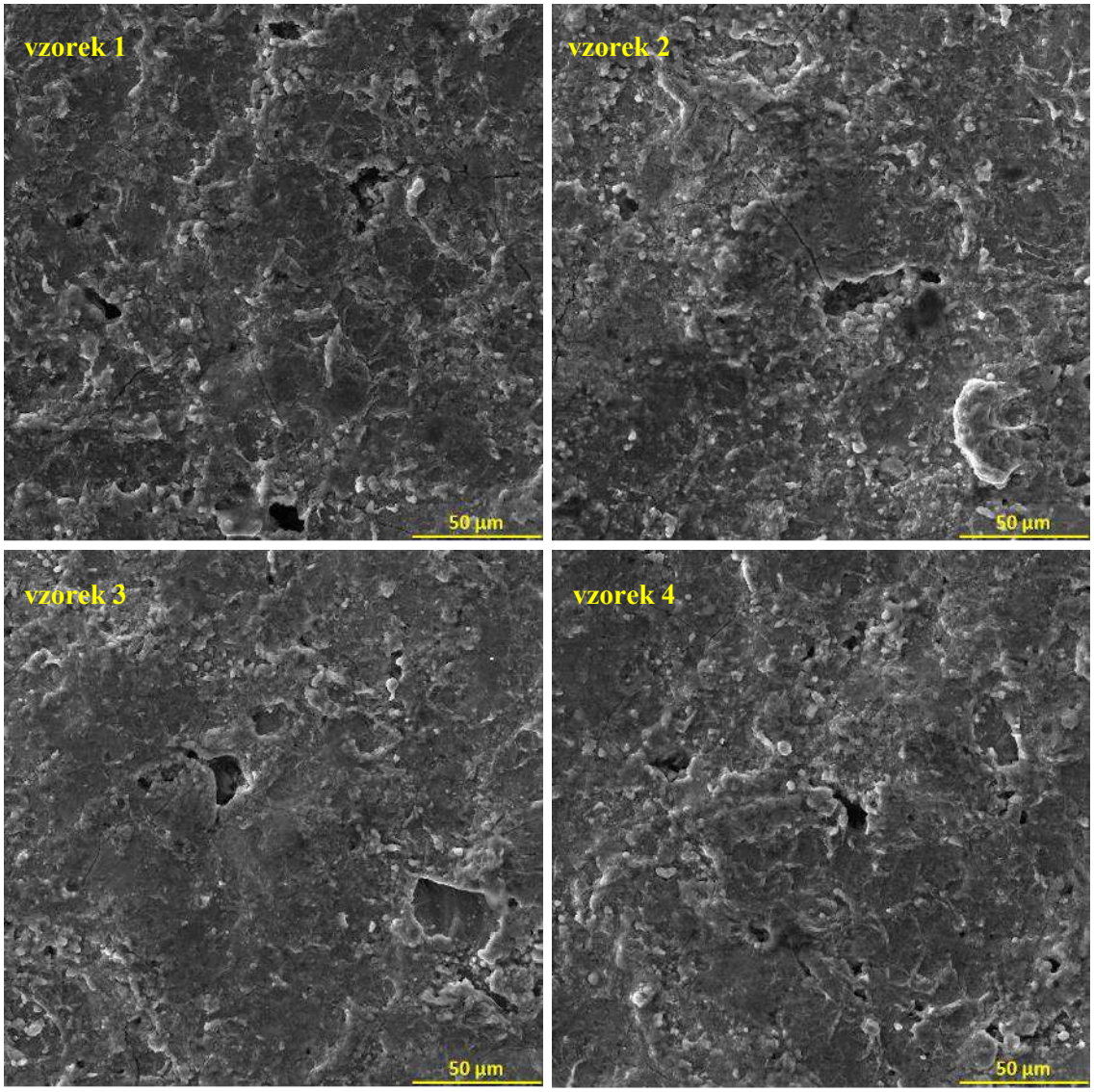
Symbol	Jednotka	Popis
T	[µs]	Perioda cyklu výboje
T_{off}	[µs]	Čas prodlevy mezi jednotlivými cykly
T_{on}	[µs]	Čas jednoho výboje
U_e	[V]	Střední napětí
U_k	[V]	Napětí při vyhasnutí výboje
U_Z	[V]	Zapalovací napětí
W_i	[J]	Energie jednoho výboje
c_{filtr}	[Kč]	Cena za jeden filtr dielektrika
d_{dok}	[mm]	Průměr hrubovací nástrojové elektrody
d_{hrub}	[mm]	Průměr hrubovací nástrojové elektrody
f	[Hz]	Frekvence výbojů
i	[A]	Okamžitá hodnota proudu
k	[-]	Součinitel úměrnosti pro katodu a anodu
r	[-]	Účinnost elektrického výboje
t_d	[µs]	Doba zpoždění výboje
t_e	[µs]	Čas působení výboje od průrazu dielektrika do odpojení generátoru
u	[V]	Okamžitá hodnota napětí
z	[mm]	Přídavek na základě tloušťky narušeného povrchu
ž	[h]	Životnost filtru dielektrika
δ	[mm]	Odchylka při elektroerozivním obrábění
δ_{ER}	[mm]	Chyba daná podstatou elektroerozivního obrábění
$\delta_{NÁST}$	[mm]	Výrobní nepřesnost nástrojové elektrody
δ_{ST}	[mm]	Odchylka způsobená obráběcím strojem
δ_T	[mm]	Chyba vzniklá ohřevem elektrod
η	[-]	Účinnost generátoru

Zkratka	Význam
3D	Trojrozměrný prostor
BN	Nitrid boritý
CAD	Computer Aided Design (počítačem podporované konstruování)
CAM	Computer Aided Manufacturing (počítačem podporovaná výroba)
CNC	Computer Numerical Control (stroj s počítačovým číslicovým řízením)
EDM	Electrical Discharge Machining (elektroerozivní obrábění)
EDX	Energiově-disperzní detektor rentgenového záření
HSC	High Speed Cutting (vysokorychlostní obrábění)
NC	Numerical Control (číslicové řízení)
RBSiC	Reakčně slinutá keramika na bázi karbidu křemíku
RC	Elektrický obvod tvořený rezistorem a kondenzátorem
RLC	Elektrický obvod tvořený rezistorem, cívkou a kondenzátorem
SE	Sekundární elektrony
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop
SiC	Karbid křemíku
SiSiC	Křemíkem infiltrovaná keramika na bázi karbidu křemíku
SSiC	Slinutá keramika na bázi karbidu křemíku
TaC	Karbid tantalu
TiC	Karbid titanu
TiN	Nitrid titanu
VDI	Verein Deutscher Ingenieure (Asociace německých inženýrů)
WEDM	Wire Electrical Discharge Machining (elektroerozivní drátové řezání)
WC	Karbid wolframu

SEZNAM PŘÍLOH

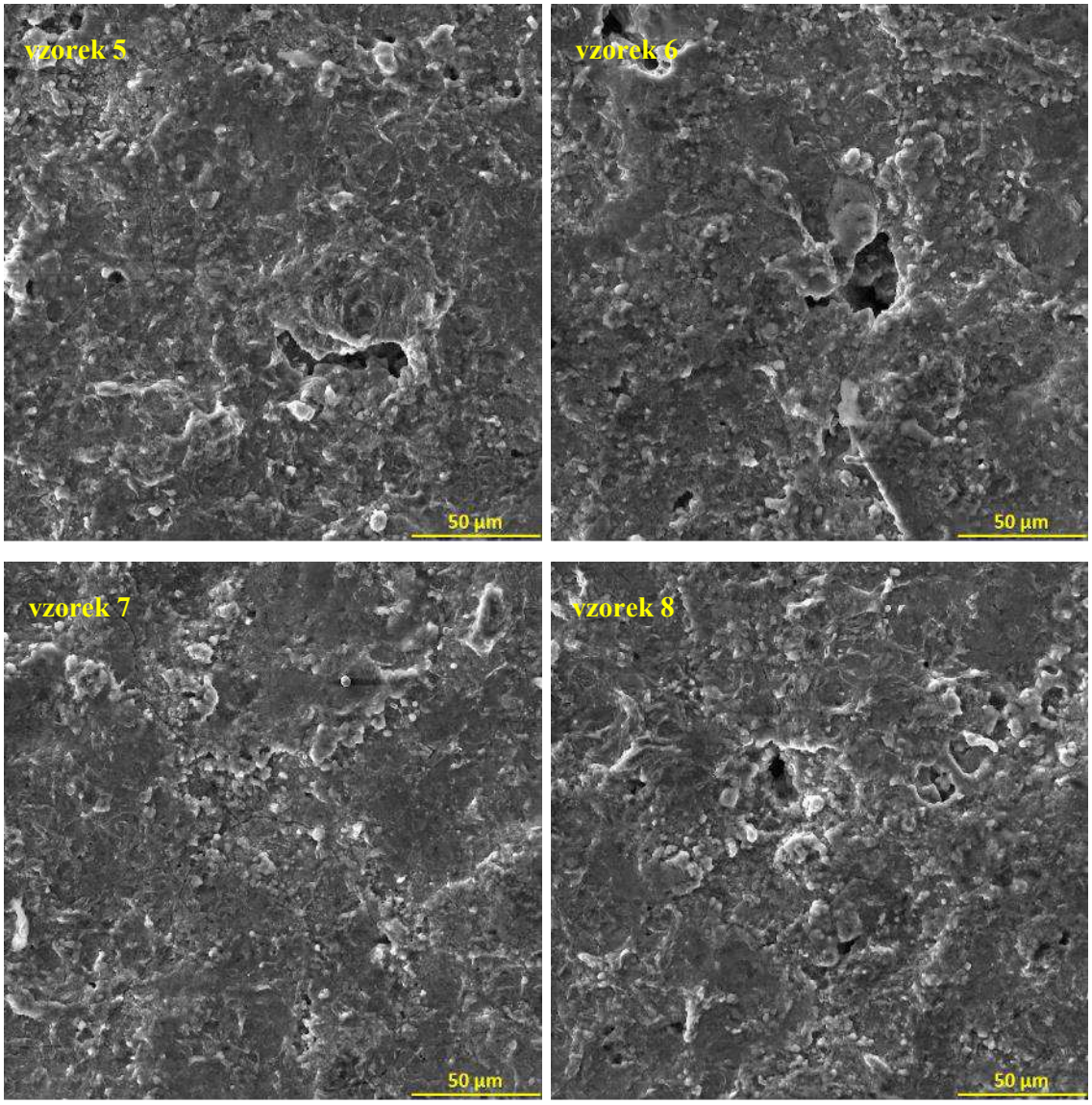
Příloha 1	Povrch experimentálně hloubených vzorků 1–4
Příloha 2	Povrch experimentálně hloubených vzorků 5–8
Příloha 3	Povrch experimentálně hloubených vzorků 9 a 10
Příloha 4	Povrch elektrod použitých pro hloubení vzorků 1–4
Příloha 5	Povrch elektrod použitých pro hloubení vzorků 5–8
Příloha 6	Povrch elektrod použitých pro hloubení vzorků 9 a 10
Příloha 7	Opotřebení rohů elektrod použitých pro hloubení vzorků 1–4 z pohledu z boku
Příloha 8	Opotřebení rohů elektrod použitých pro hloubení vzorků 5–8 z pohledu z boku
Příloha 9	Opotřebení rohů elektrod použitých pro hloubení vzorků 9–10 z pohledu z boku

Příloha 1

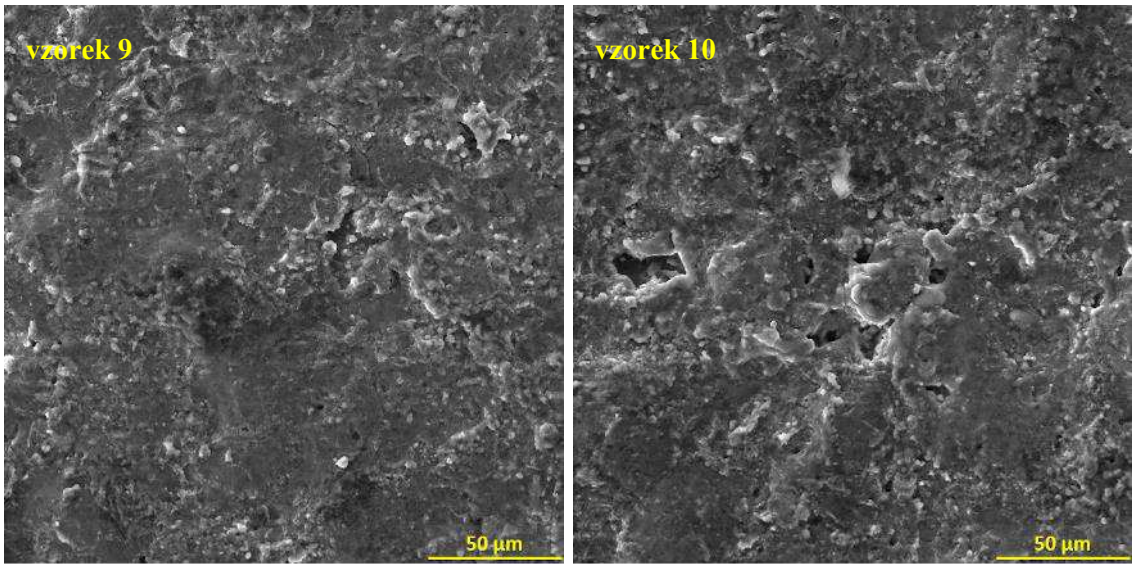


1000× zvětšený povrch experimentálně hloubených vzorků.
vzorek 1: I = 30 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs
vzorek 2: I = 30 A, U_z = 220 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs
vzorek 3: I = 25 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs
vzorek 4: I = 25 A, U_z = 220 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs

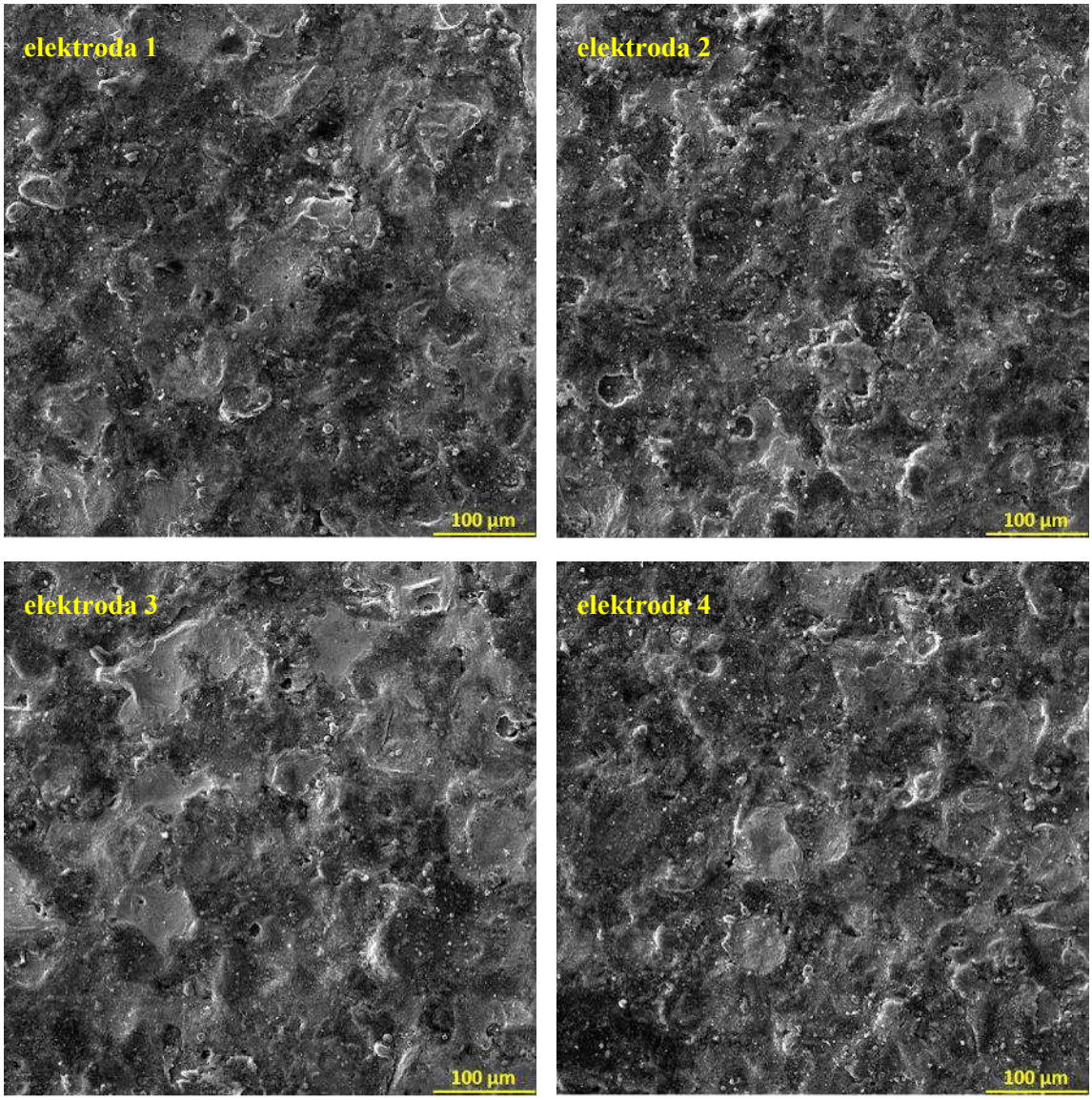
Příloha 2



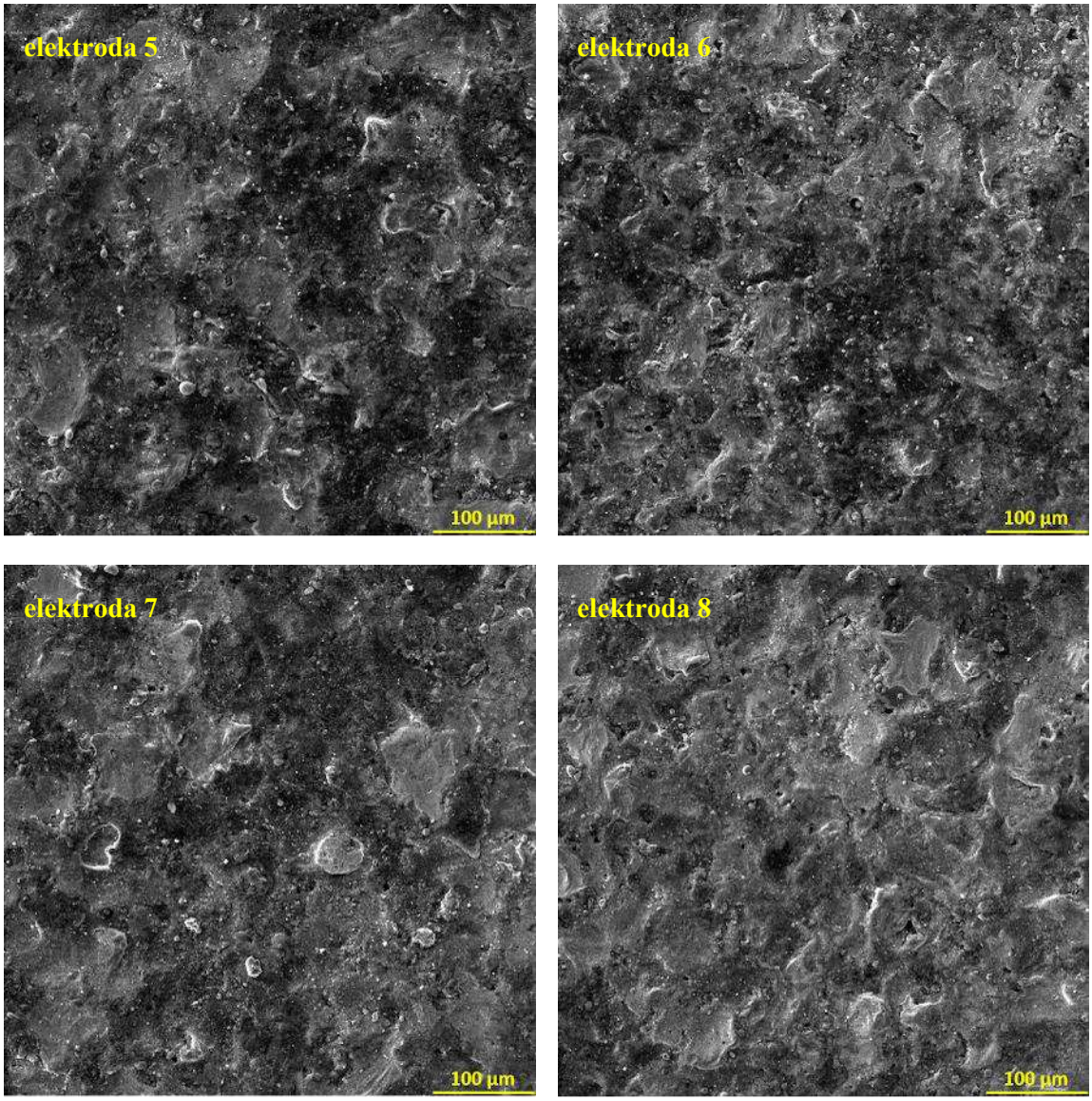
1000× zvětšený povrch experimentálně hloubených vzorků.
vzorek 5: I = 25 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 11 µs
vzorek 6: I = 25 A, U_z = 220 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs
vzorek 7: I = 20 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs
vzorek 8: I = 20 A, U_z = 220 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs



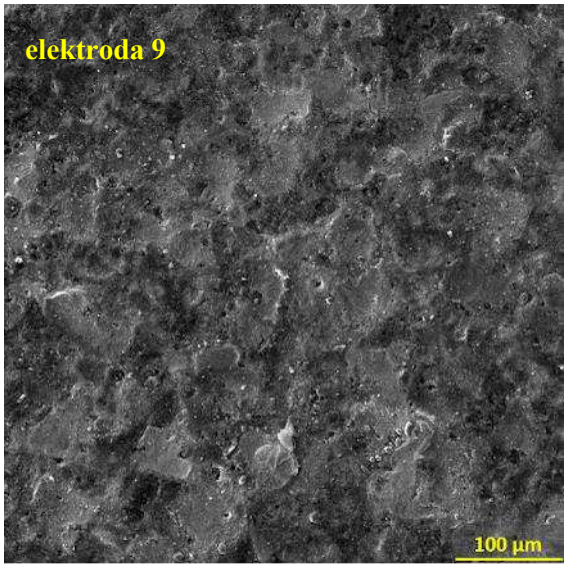
1000× zvětšený povrch experimentálně hloubených vzorků.
vzorek 9: I = 10 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs
vzorek 10: I = 6 A, U_z = 280 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs

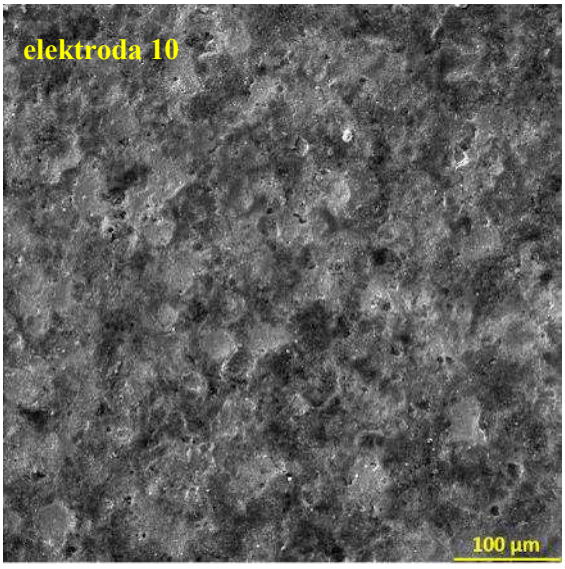


400× zvětšený povrch elektrod použitých pro hloubení:
vzorku 1: I = 30 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs
vzorku 2: I = 30 A, U_z = 220 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs
vzorku 3: I = 25 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs
vzorku 4: I = 25 A, U_z = 220 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs

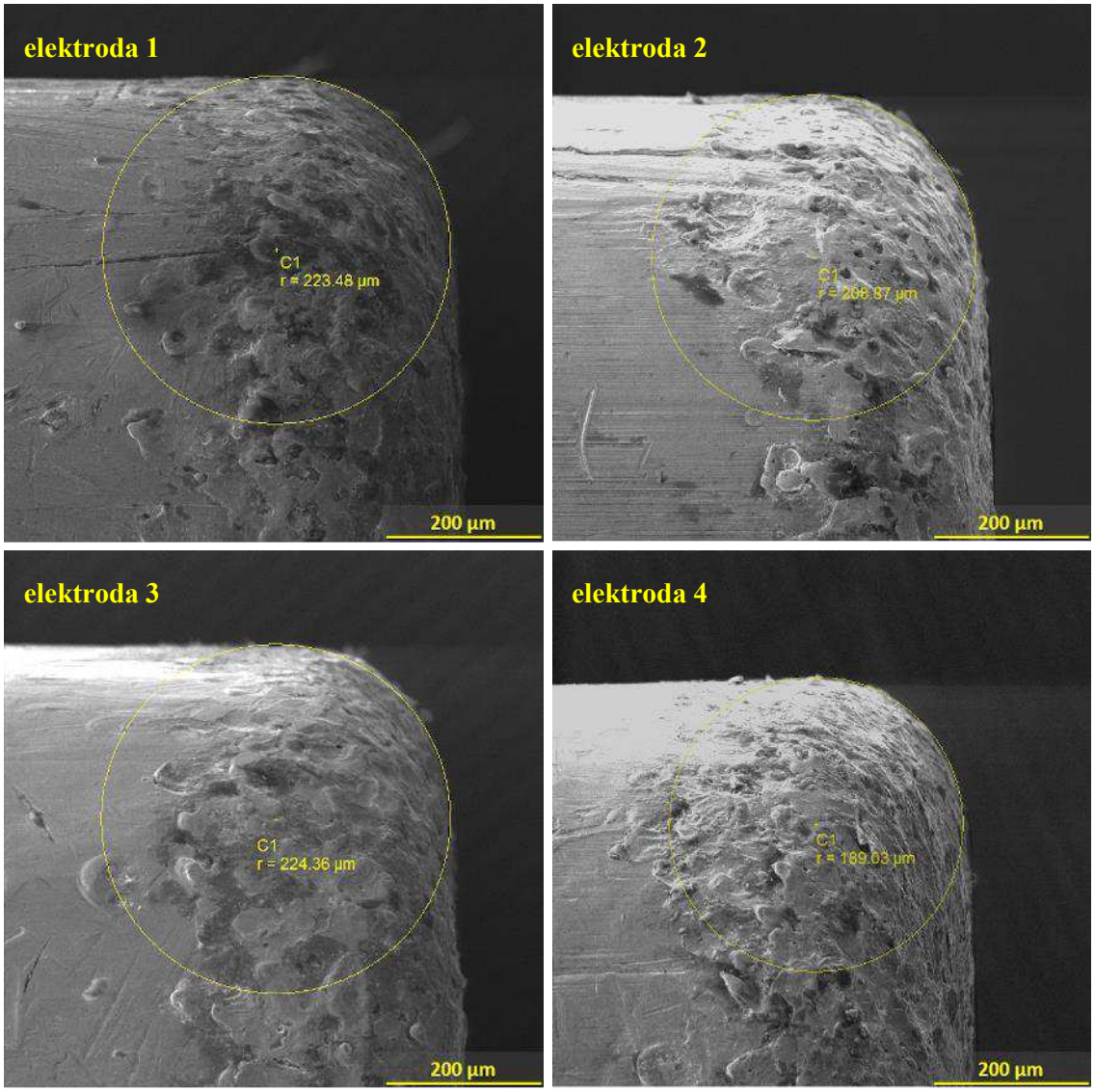


400× zvětšený povrch elektrod použitých pro hloubení:
vzorku 5: I = 25 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 11 µs
vzorku 6: I = 25 A, U_z = 220 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs
vzorku 7: I = 20 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs
vzorku 8: I = 20 A, U_z = 220 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs



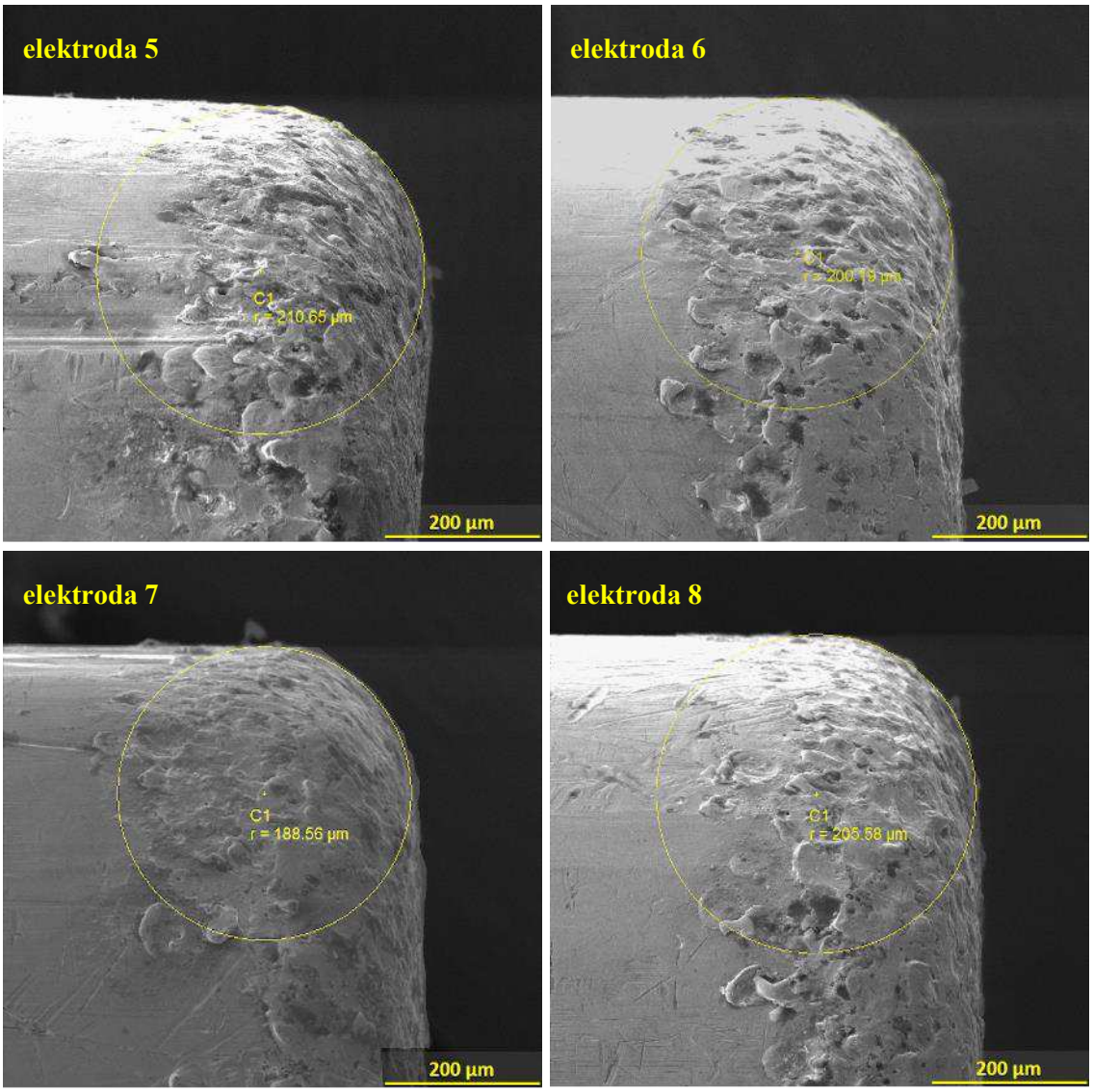


400× zvětšený povrch elektrod použitých pro hloubení:
vzorku 9: $I = 10$ A, $U_z = 280$ V, $T_{on} = 40$ µs, $T_{off} = 22$ µs
vzorku 10: $I = 6$ A, $U_z = 280$ V, $T_{on} = 40$ µs, $T_{off} = 22$ µs



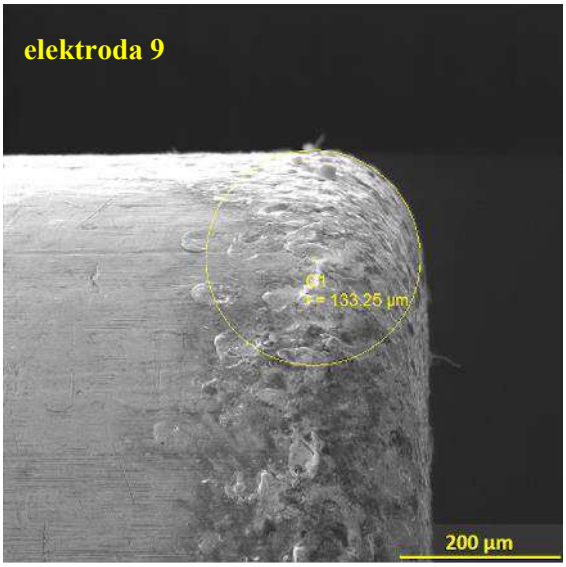
200× zvětšené rohy nástrojových elektrod z pohledu z boku s aproximačními kružnicemi, jejichž poloměr slouží jako měřítko opotřebení jednotlivých elektrod použitých při výrobě:

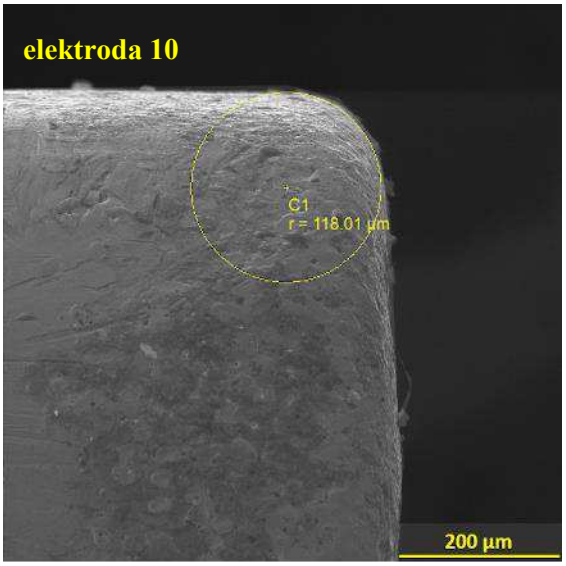
vzorku 1: I = 30 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs
vzorku 2: I = 30 A, U_z = 220 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs
vzorku 3: I = 25 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs
vzorku 4: I = 25 A, U_z = 220 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs



200× zvětšené rohy nástrojových elektrod z pohledu z boku s aproximačními kružnicemi, jejichž poloměr slouží jako měřítko opotřebení jednotlivých elektrod použitých při výrobě:

vzorku 5: I = 25 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 11 µs
vzorku 6: I = 25 A, U_z = 220 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs
vzorku 7: I = 20 A, U_z = 280 V, T_{on} = 90 µs, T_{off} = 22 µs
vzorku 8: I = 20 A, U_z = 220 V, T_{on} = 40 µs, T_{off} = 22 µs





200× zvětšené rohy nástrojových elektrod z pohledu z boku s aproximačními kružnicemi, jejichž poloměr slouží jako měřítko opotřebení jednotlivých elektrod použitých při výrobě:

vzorku 9: $I = 10$ A, $U_z = 280$ V, $T_{on} = 40$ µs, $T_{off} = 22$ µs
vzorku 10: $I = 6$ A, $U_z = 280$ V, $T_{on} = 40$ µs, $T_{off} = 22$ µs