



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

EXPERIMENTÁLNÍ ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ SPECIÁLNÍCH MATERIÁLŮ PRO LETECKÝ PRŮMYSL

EXPERIMENTAL ELECTROEROSION MACHINING OF SPECIAL MATERIALS FOR AEROSPACE INDUSTRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Líkař

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Martin Líkař
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Milan Kalivoda
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:

Experimentální elektroerozivní obrábění speciálních materiálů pro letecký průmysl

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na firemním stroji se provedly obráběcí experimenty. Výsledky experimentů jsou k dispozici případným zákazníkům.

Cíle diplomové práce:

- Rozbor speciálních materiálů pro letectví
- Vlastnosti elektroerozivních procesů
- Příprava stroje a vzorků materiálů pro experimenty
- Měření dat v experimentech
- Vyhodnocení získaných dat s cílem výběru výhodné varianty

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

KARPÍŠEK, Zdeněk. Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost. 3. vyd. Olomučany: CERM, s. r. o., 2007. 170 s. ISBN 978-80-241-3380-9.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie (Advanced methods of material removal). 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 276 s. ISBN 80-7099-430-4.

MÁDL, Jan et al. Jakost obráběných povrchů. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 180 s. ISBN 80-7044-639-4.

PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojírenská metrologie II. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-72-4283-1.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-72-4283-1.

SHAW, Milton Clayton. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. p. 651. ISBN 0-19-514206-3.

SUCHY, Ivana. Handbook of die design. 2nd edition. New York: McGRAW-HILL, 2006. p. 730. ISBN 0-07-146271-6.

ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.

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

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou elektroerozivního obrábění materiálu využívaného v leteckém průmyslu. Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je rozebrána problematika elektroerozivního obrábění se zaměřením na elektroerozivní hloubení. Součástí teoretické části je i rozbor materiálů využívaných v leteckém průmyslu. Praktická část diplomové práce je zaměřena na elektroerozivní hloubení leteckého materiálu INCO 713LC, při kterém je zkoumán vliv obráběcích parametrů na povrch obrobku a nástroje.

Klíčová slova

elektroerozivní obrábění, elektroerozivní hloubení, letecký materiál, INCO 713LC, niklová superslitina

ABSTRACT

This master's thesis deals with the issues of electroerosive machining material used in aerospace industry. The master's thesis is divided into the theoretical and practical part. In the theoretical part is described electroerosive machining with a focus on electrical discharge sinking. One section of the theoretical part is an analysis of materials used in the aerospace industry. The practical part of the master's thesis is focused on electrical discharge sinking of aerospace material INCO 713LC, here is investigated the influence of machining parameters on the surface of the workpiece and tool.

Key words

electroerosive machining, electrical discharge sinking, aerospace material, INCO 713LC, nickel superalloy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LÍKAŘ, Martin. *Experimentální elektroerozivní obrábění speciálních materiálů pro letecký průmysl* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124562>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 65 s. 2 přílohy. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Experimentální elektroerozivní obrábění speciálních materiálů pro letecký průmysl** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Bc. Martin Líkař

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu Ing. Milanu Kalivodovi a paní Ing. Kateřině Mouralové, PhD. za věnovaný čas, cenné připomínky a rady, týkající se zpracování diplomové práce.

Dále děkuji zaměstnancům firmy PENTA Trading, spol. s.r.o. za pomoc, poskytnuté materiály, rady a čas věnovaný realizaci experimentů.

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

V neposlední řadě děkuji rodině za podporu během celé doby mého studia.

OBSAH

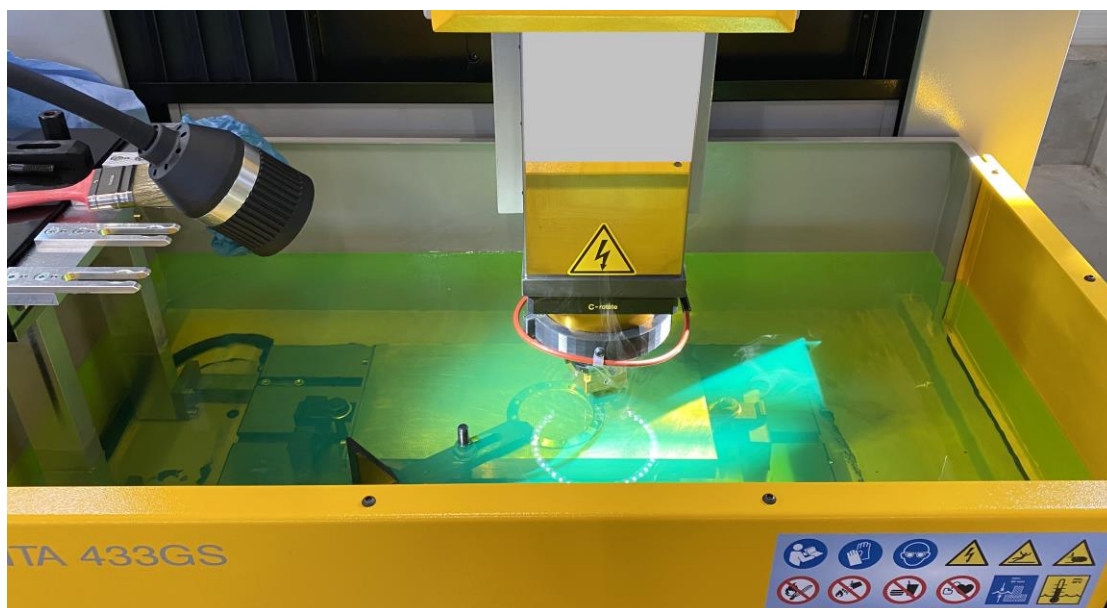
ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	8
1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE A ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ	9
1.1 Technologické využití elektroeroze	10
1.2 Princip elektroerozivního obrábění.....	13
1.2.1 Princip elektroerozivního hloubení	14
1.3 Charakteristika a fáze výbojů	15
1.4 Zdroje elektrické energie	20
1.5 Dielektrikum.....	22
1.6 Nástrojové elektrody.....	24
1.6.1 Opotřebení a materiály nástrojových elektrod.....	25
1.6.2 Stanovení rozměrů hrubovací a dokončovací elektrody.....	26
1.7 Kvalita povrchu po elektroerozivním obrábění	26
2 LETECKÉ MATERIÁLY	29
2.1 Používané materiály v leteckém průmyslu	29
3 EXPERIMENTÁLNÍ ELEKTROEROZIVNÍ HLOUBENÍ LETECKÉ SLITINY	
INCO 713LC	35
3.1 Představení společnosti PENTA Trading, spol. s.r.o.	35
3.2 Návrh experimentální práce.....	35
3.2.1 Základní materiál Inco 713LC.....	36
3.2.2 Elektroerozivní hloubicí stroj, výběr elektrod a dielektrikum.....	37
3.2.3 Výběr hloubicích parametrů	39
3.3 Realizace experimentální práce	40
3.4 Výsledky experimentální práce	42
3.4.1 Topografie povrchu vzorků	43
3.4.2 Morfologie povrchu vzorků.....	44
3.4.3 Morfologie povrchu elektrod.....	48
3.4.4 Opotřebení rohů elektrod.....	51
4 DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	58
ZÁVĚR.....	59
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	60
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	63
SEZNAM PŘÍLOH	65

ÚVOD

Elektroerozivní hloubení, jako jedna z aplikací elektroerozivního obrábění, patří mezi nekonvenční metody obrábění, které dále zahrnují například obrábění vodním paprskem, elektroerozivní drátové řezání, obrábění plasmovým, laserovým, elektronovým paprskem, atd. U těchto metod nedochází ke tvorbě třísky, jako u konvenčních metod obrábění. Technologii elektroerozivního hloubení lze s výhodou využít tam, kde je potřeba dosáhnout různě tvarovaných dutin, které jsou běžnými způsoby obrábění prakticky nerealizovatelné.

Jako materiál obrobku pro experimenty je použita niklová superslitina INCO 713LC. Proces elektroerozivního hloubení této superslitiny je znázorněn na obr. 1. Tyto slitiny mají velmi dobrou žáruvzdornost a žárupevnost, což znamená, že si dokážou udržet své mechanické, fyzikální i chemické vlastnosti při vysokých teplotách, proto se tyto materiály mohou nacházet v leteckém průmyslu, například jako součásti turbín leteckého motoru. Mezi další významné vlastnosti těchto materiálů patří velmi dobrá korozivzdornost a dobré únavové vlastnosti.

Jako materiál elektrod pro experimenty je zvolen grafit. Podnětem pro volbu tématu byla zejména atraktivita letectví a materiálů využívaných pro letecký průmysl, ve spojení s elektroerozivním hloubením, kdy k úběru materiálu dochází bez mechanického působení nástroje na obrobek. Hlavním cílem této diplomové práce je zkoumání vlivu obráběcích parametrů na výsledný povrch obrobku i nástroje, s ohledem na časovou náročnost jednotlivých experimentů a opotřebení nástroje.



Obr. 1 Technologie elektroerozivního hloubení aplikovaná na slitině INCO 713LC.

1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE A ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

Nekonvenční metody obrábění využívají k oddělování materiálu tepelné, elektrické, chemické a abrazivní fyzikální jevy nebo jejich kombinace a to bez následné tvorby třísky. Rychlost a výkonnost u nekonvenčních metod obrábění nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu. Materiál nástroje nemusí být tvrdší než obráběný materiál. Tyto metody umožňují provádět složité technologické operace, jako například obrábění děr složitých tvarů nebo výrobu děr se zakřivenou osou. Rozdělení nekonvenčních metod obrábění je znázorněno v tab. 1.1, ve které chybí anodomechanické obrábění. Anodomechanické obrábění je z hlediska odebrání materiálu na rozhraní elektroerozivního a elektrochemického obrábění a je podrobněji rozebráno v kapitole 1.1, která se zabývá technologickým využitím elektroeroze. [1] [2]

Tab. 1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění dle fyzikálního principu [1].

Rozdělení nekonvenčních metod obrábění dle fyzikálního principu				
Elektro-tepelné principy		Elektro-chemické principy	Chemické principy	Mechanické (abrazivní) principy
Elektroerozivní obrábění	Obrábění paprsky koncentrované energie	Elektrochemické obrábění	Termické odstraňování ořepů	Ultrazvukové obrábění
Elektroerozivní hloubení	Obrábění plasmovým paprskem	Elektrochemické broušení	Chemické obrábění	Obrábění vodním paprskem
Elektrojiskrové drátové řezání	Obrábění laserovým paprskem		Fotochemické obrábění	
Elektrokontaktní obrábění	Obrábění elektronovým paprskem			
Elektroerozivní mikroděrování				

Tab. 1.2 zobrazuje technologické parametry vybraných nekonvenčních metod obrábění, z této tabulky plynou některé jejich výhody a nevýhody. Mezi významné parametry, kterých by mělo být dosaženo nekonvenčními metodami obrábění, patří zejména dobrá kvalita povrchu a z hlediska časové náročnosti také optimální úběr materiálu. Na vlastnosti obrobku má také významný vliv hloubka ovlivněné vrstvy, tato vrstva obvykle dosahuje jiných fyzikálních i mechanických vlastností.

Tab. 1.2 Technologické parametry některých nekonvenčních metod obrábění [2].

Metoda	Kvalita povrchu Ra [μm]	Stupeň přesnosti IT	Hloubka ovlivněné vrstvy [μm]	Úběr [$\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]	Měrná spotřeba energie [$\text{kWh} \cdot \text{cm}^{-3}$]
Elektrojiskrové obrábění	50 až 0,2	6 až 12	10 až 300	10^{-4} až 0,6	0,1 až 1
Obrábění paprskem laseru	50 až 6,3		100	10^{-4}	8 až 13
Obrábění paprskem elektronů	50 až 6,3		beze změn	10^{-2} až 0,4	
Obrábění paprskem plasmu			500 až 800	100	
Elektrochemické obrábění	2,5 až 1,6	9 až 12	beze změn	0,05 až 0,5	0,1 až 0,3
Elektrochemické broušení	0,8 až 0,2	6 až 9	beze změn	10^{-2}	0,04 až 0,08
Ultrazvukové obrábění	6,3 až 0,4	7 až 9	beze změn	10^{-2} až 10	0,07 až 0,8

1.1 Technologické využití elektroeroze

Z tab. 1.1 (v kapitole 1) vyplývá, že mezi technologie, které spočívají na principu elektroeroze, patří:

- elektroerozivní hloubení,
- elektroerozivní drátové řezání,
- elektrokontaktní obrábění,
- elektroerozivní mikroděrování,
- anodomechanické obrábění.

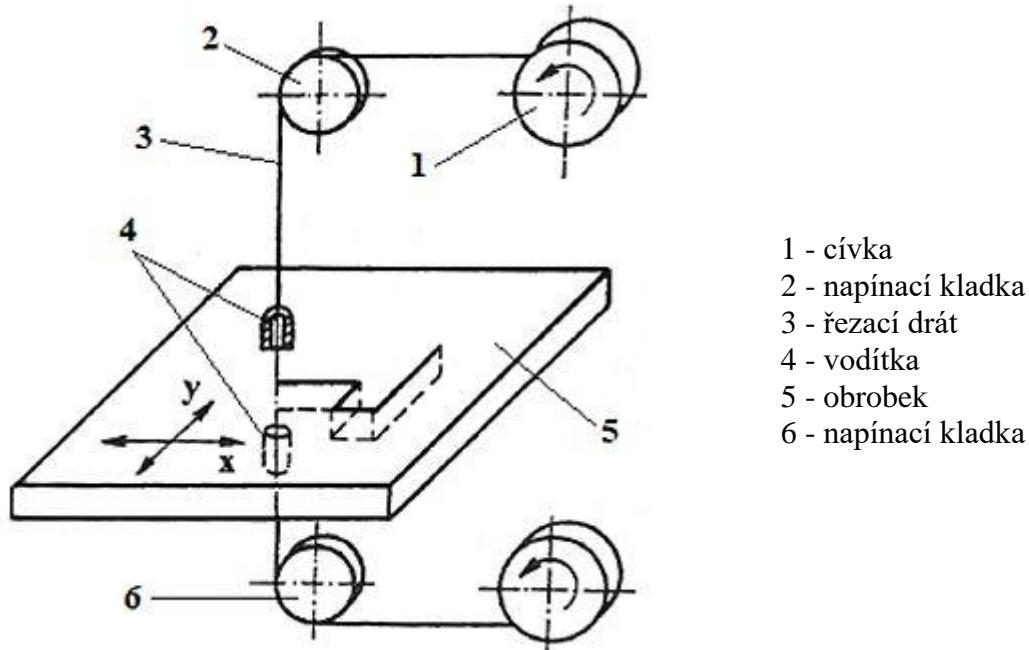
U všech těchto technologií nedochází ke vzniku klasické třísky, jakou lze vidět při konvenčních metodách obrábění. Elektroerozivní hloubení bude detailněji rozebráno v kapitolách 1.2.1, 1.3, 1.4, 1.5 a 1.6.

Elektroerozivní drátové řezání

Tato technologie je výhodná všude, kde je potřeba zhotovit různě tvarované díly, které by při klasických způsobech výroby vyžadovaly odlišnou technologičnost konstrukce. Nachází uplatnění při dělení velmi tvrdých materiálů s minimální šířkou řezu. Velmi často se využívá pro řezání přesných lisovacích nástrojů, pro výrobu tvarových výlisků apod. Elektroerozivní drátové řezání je zobrazeno na obr. 1.1. [2] [3]

Elektroerozivní řezačky pracují s přesností až 0,003 mm a průměrná aritmetická úchylka profilu obrobku dosahuje $R_a = 0,2 \mu\text{m}$, což ovšem bývá na úkor produktivity řezání. Nástrojovou elektrodou je u této metody řezací drát, dráty pro elektroerozi se používají povlakované a nepovlakované v průměrech 0,03 až 0,33 mm nejčastěji však 0,2 nebo 0,25 mm. V současnosti převládá použití povlakovaných drátů, a to nejčastěji s více povlaky na bázi mědi a stříbra s ocelovým jádrem. Pro přesné řezání je nutné udržovat drát napnutý,

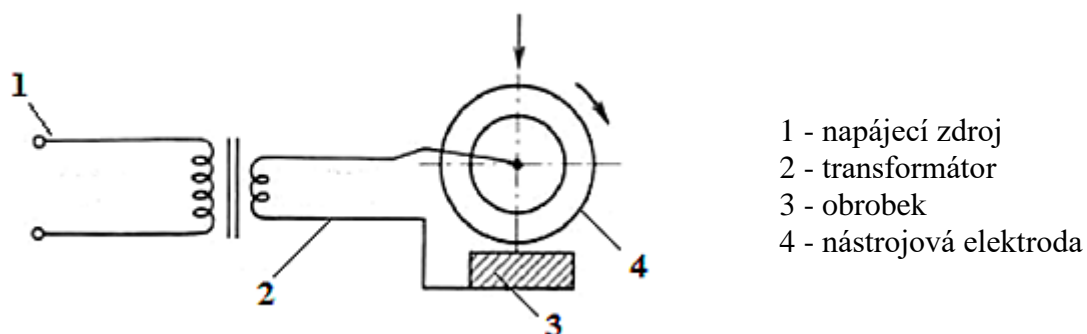
k čemuž slouží napínací kladky. Použité dráty bývají dále recyklovány. Mezi nejdůležitější konstrukční prvky drátové řezačky patří systém vedení drátu, který musí umožňovat řezání pod úhlem. [2] [3]



Obr. 1.1 Princip elektroerozivního drátového řezání [3].

Elektrokontaktní obrábění

U této technologie dochází k úběru materiálu pomocí energií nestacionárních kontaktních elektrických obloukových výbojů a dále pomocí tepla v důsledku průchodu elektrického náboje v době kontaktu elektrod. Doba trvání výboje je až 0,01 s se střídavým a asymetrickým průběhem. Nástrojová elektroda se pohybuje, aby nedocházelo k přivaření elektrod v době kontaktu, a zároveň je přitlačována k obráběnému povrchu. Elektrody jsou zapojeny do obvodu se zdrojem střídavého napětí, což je transformátor, který generuje napětí v rozmezí 10 – 30 V a výkon v rozmezí 10 – 250 kW při frekvenci 50 – 500 Hz. Ve výbojovém kanále převažuje iontová vodivost. Princip elektrokontaktního obrábění i s popiskem jednotlivých částí je zobrazen na obr. 1.2. [4]



Obr. 1.2 Princip elektrokontaktního obrábění [4].

Elektrokontaktní obrábění je vhodné například pro řezání nálitků, opracování svarů apod. Je charakterizováno zejména [5]:

- tepelným ovlivněním obrobku do hloubky až 5 mm,
- poměrně vysokou energetickou náročností (řádově $\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$),
- vznikem ultrafialového záření,
- nízkou kvalitou obrobeného povrchu.

Elektroerozivní mikroděrování

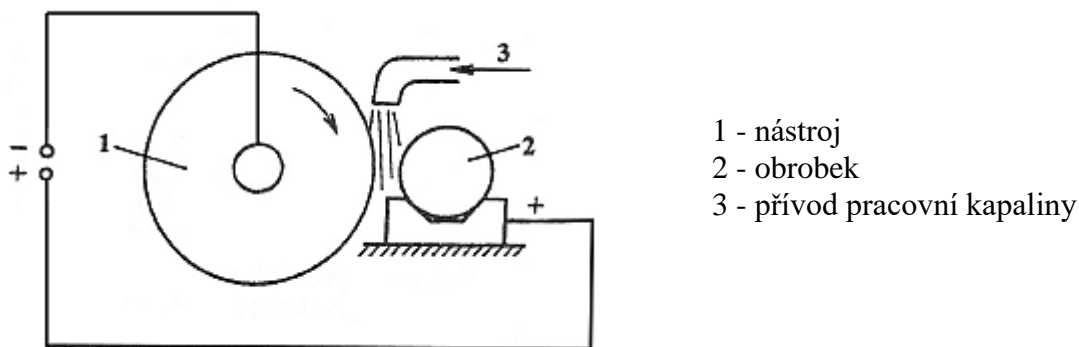
Tato technologie nachází využití zejména v oblasti jemné mechaniky a při výrobě miniaturních součástí umožňuje hloubení i nekruhových děr v rozsahu 0,02 až 5 mm do hloubky až 100 mm. [4]

Stroje jsou vybaveny speciálními přípravky pro vedení elektrod, nástrojové elektrody bývají většinou wolframové drátky. Takových děr se dosahuje pomocí nízkých energií a krátkých impulzů. [4]

Anodomechanické obrábění

Způsob odebrání materiálu je u této technologie na rozhraní elektroerozivního a elektrochemického obrábění. Zda se jedná o obrábění elektroerozivní či elektrochemické, závisí zejména na energetických parametrech. V případě vyššího napětí a proudu dochází k úběru materiálu elektroerozivně, naopak při použití nižších hodnot dochází k úběru elektrochemicky. Proces doprovázejí vysoké teploty a roztavený kov je z místa obrábění odstraňován otáčejícím se nástrojem. Nástroj je ocelový kotouč, pás nebo drát, který tvoří katodu a součást anodu. Pracovní prostor je zaplaven kapalinou, která působí jako izolátor s chladicím účinkem. K výboji dochází v okamžiku, kdy nástroj svým otáčivým pohybem naruší izolační vrstvu. Další část úběru tvoří elektrochemické rozpouštění, protože jsou vytvořeny podmínky elektrolýzy. Zdrojem energie je usměrňovač střídavého proudu. [2]

Anodomechanické obrábění, jehož princip je znázorněn na obr. 1.3, se používá nejčastěji pro řezání tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů, pro vyřezávání profilů, tvarové broušení nástrojů apod. Nejpoužívanějším pracovním médiem je vodní sklo o hustotě $1,27$ až $1,32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, lze také pro tuto technologii využít 1 až 1,5% vodní roztok tetraboritanu sodného (borax).



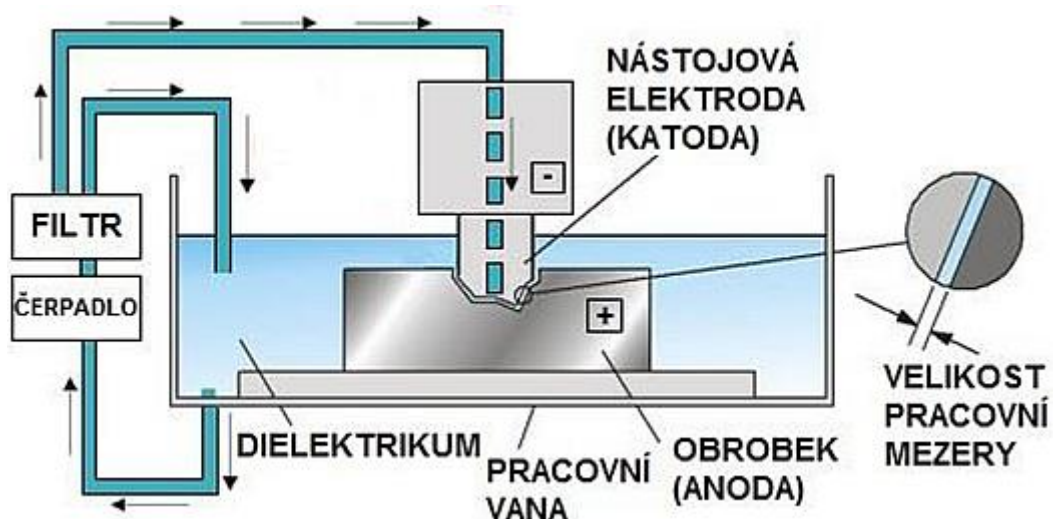
Obr. 1.3 Princip anodomechanického obrábění [2].

1.2 Princip elektroerozivního obrábění

U elektroerozivního obrábění, označovaného EDM (Electro Discharge Machining), dochází k úběru materiálu pomocí periodicky se opakujících elektrických, nebo obloukových výbojů. Při elektroerozi se využívá především elektrické energie, která se pomocí elektrických výbojů přeměňuje v tepelnou. Dvě elektrody jsou připojeny ke zdroji elektrického napětí a jejich vzdálenost je 0,01 až 0,5 mm. Jsou ponořeny v dielektrické kapalině (izolant schopný polarizace). Mezi elektrodami dochází k průrazu dielektrika a následně k elektrickému výboji. Vlastní výboj je charakterizován výbojovým kanálem, který umožňuje přechod jiskry mezi nástrojem a obrobkem. Tento kanál je tvořen plazmou, což je hmota složená ze směsi elektricky nabitých a neutrálních částic, která vznikne odtržením elektronů z elektronového obalu, či roztržením molekul (ionizací). Částice ve výbojovém kanálu konají tepelně neuspořádaný pohyb, který se vyznačuje vysokými teplotami (8 000 až 12 000 °C). Z toho vyplývá, že výbojový kanál je nehomogenní a dobře vodivý, což umožňuje protékání velkého elektrického proudu. Povrch elektrod je narušován a uvolněná energie z výbojového kanálu se na ně přenáší následujícími způsoby [2] [3] [6]:

- bombardováním nabitými částicemi, elektrony na anodu a ionty na katodu,
- termickým bombardováním částicemi tvořícími kanál,
- přenosem energie z horkých par a plynů vytékajících z elektrod,
- tepelným zářením.

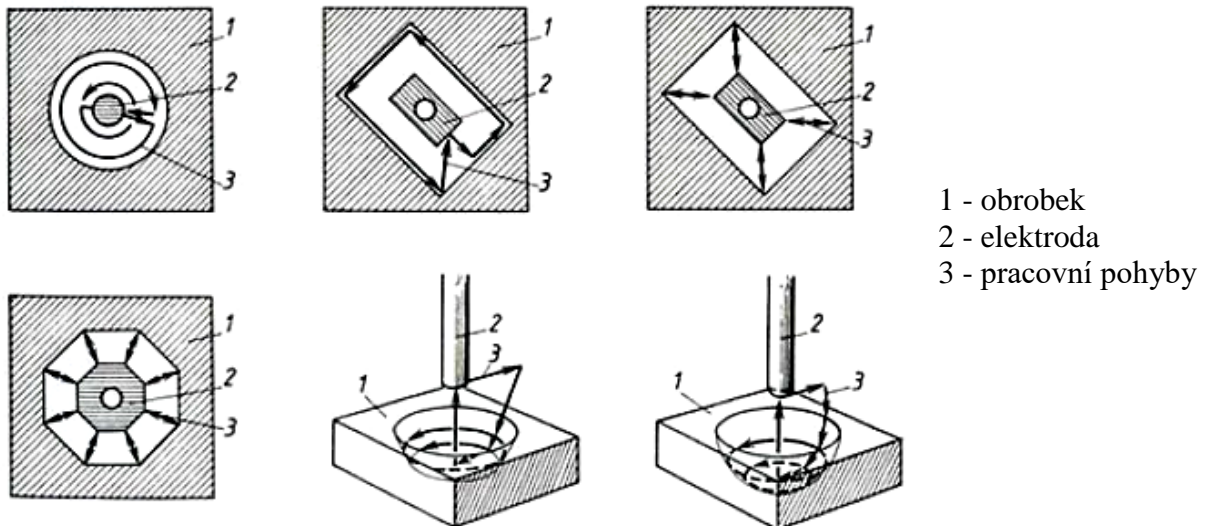
Jestliže dojde k přerušení toku elektrického proudu tekoucího výbojovým kanálem, tak tento kanál zanikne. Pro vznik dalšího výboje jsou podmínky velmi podobné (nikoliv však shodné) jako před prvním výbojem. Při postupném zvyšování napětí teče mezi elektrodami nepatrný proud, který je přibližně úměrný napětí. Při určité hodnotě napětí dojde k průrazu a k prudkému nárůstu proudu, jehož hodnota je omezena vnitřním odporem zdroje elektrického napětí. Hodnota napětí, při které došlo k průrazu, se nazývá průrazné napětí. Dielektrické kapaliny bývají nejčastěji cyklické uhlovodíky (petrolej, transformátorový olej apod.). Obr. 1.4 znázorňuje princip elektroerozivního obrábění, nástrojová elektroda kmitá a velikost pracovní mezery není konstantní. [2] [3]



Obr. 1.4 Základní princip elektroerozivního obrábění [7].

1.2.1 Princip elektroerozivního hloubení

Tato technologie patří do skupiny elektroerozivního obrábění, nástrojová elektroda se postupně posouvá, proniká do materiálu (obrobku) a postupně hloubí požadovaný tvar (obr. 1.5). Elektroerozivním hloubením lze obrábět i tvary, které jsou konvenčními metodami obrábění nerealizovatelné. Největší uplatnění nachází tato metoda při hloubení složitých tvarů. Průřazové napětí závisí na vzdálenosti elektrod, tato vzdálenost musí být optimální během celého procesu elektroeroze. Kombinací posuvových a stranových pohybů lze pomocí relativně jednoduchých elektrod vyrobit i tvarově složitější tvary dutin, které jsou znázorněny na obr. 1.5. [3] [7] [8]



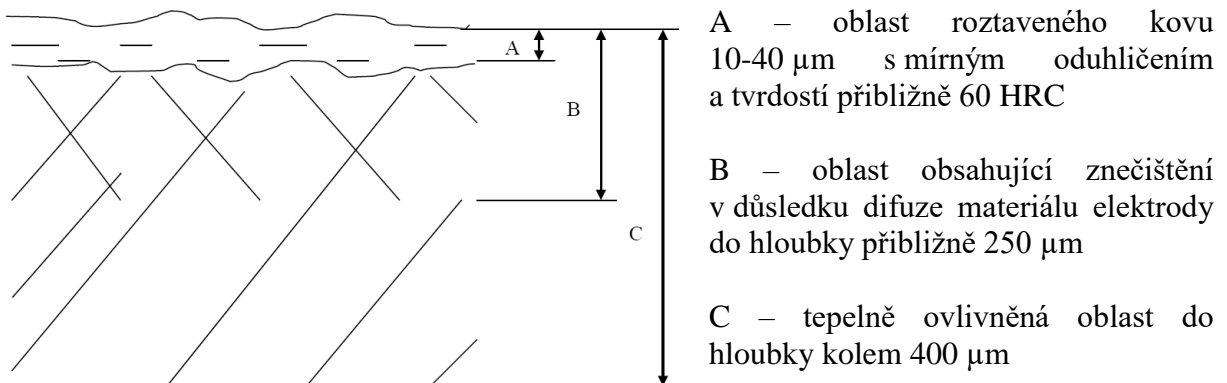
1 - obrobek
2 - elektroda
3 - pracovní pohyby

Obr. 1.5 Možné pohyby elektrody a tvary dutin [9].

Kvalita povrchu daná střední aritmetickou úchytkou R_a se při elektroerozivním hloubení posuzuje pomocí stupnice VDI, která je zobrazena v tab. 1.3, ovlivněná oblast po elektroerozivním hloubení je znázorněna na obr. 1.6. [3]

Tab. 1.3 Převod hodnot VDI na R_a [3].

VDI	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45
R_a [μm]	0,4	0,6	0,8	1,1	1,6	2,3	3,1	4,5	6,3	9,0	12,5	18,0



Obr. 1.6 Charakter povrchu po elektroerozivním hloubení [3].

Mezi výhody elektroerozivního hloubení patří:

- lze obrábět vodivé materiály bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, houževnatost,...),
- možnost dosažení různých jakostí povrchů v důsledku velkého rozsahu pracovních parametrů,
- možnost zhotovení složitých dutin a provádění operací, které jinými metodami obrábění nelze uskutečnit (například díry se zakřivenou osou),
- žádné mechanické zatížení obrobku,
- menší odpad než při konvenčních metodách obrábění,
- relativně jednoduchá výroba nástrojových elektrod,
- na hranách obrobku nezůstávají otřepy,
- snadná automatizace výrobního procesu.

Mezi nevýhody elektroerozivního hloubení patří:

- nepřímá úměra mezi produktivitou obrábění a jakostí povrchu obrobku,
- obrobek musí být v průběhu obrábění ponořen do kapaliny (dielektrika),
- jakost obráběného povrchu závisí na mnoha faktorech, které předem nelze spolehlivě určit,
- při obrábění měkkých materiálů vykazuje tato metoda poměrně nízkou produktivitu.

Kapitoly 1.3, 1.4, 1.5 a 1.6 jsou zaměřeny na rozbor elektroerozivního hloubení zahrnující popis výbojů při elektroerozi, typy zdrojů elektrické energie, vlastnosti využívaných dielektrik a elektrod. Všechny tyto aspekty souvisí s elektroerozivním hloubením a samotný proces by bez nich vůbec nemohl probíhat.

1.3 Charakteristika a fáze výbojů

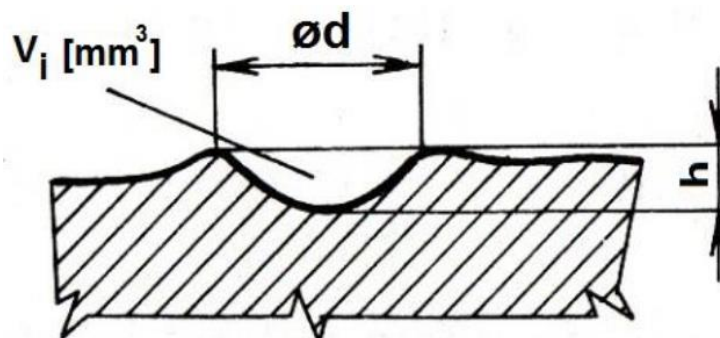
Ke vzniku výboje dochází v místě nejsilnějšího elektrického napěťového pole. Tento výboj vytváří kráter, jehož velikost a tvar závisí na velikosti vybíjecí energie. Profil vzniklého kráteru je zobrazen na obr. 1.7. Množství odebraného materiálu lze spočítat pomocí rovnice (1.1) [10]:

$$V_i = K \cdot W_i \quad [\text{mm}^3] \quad (1.1)$$

kde:

W_i [J] - energie výboje,

K - součinitel, který má různé hodnoty pro katodu a anodu.



Obr. 1.7 Charakter povrchu po elektroerozivním hloubení [10].

Časový průběh jednotlivých fází výboje (celkem 9 fází) lze charakterizovat [10]:

Fáze 1: Elektrické pole se začne tvořit v okamžiku přiložení napětí na obě elektrody. V důsledku nerovnosti elektrod se v oblasti minimální vzdálenosti vytváří místo maximálního gradientu a do tohoto místa jsou vtahovány elektricky vodivé částice.

Fáze 2: Napětí dosahuje maximální hodnoty. Elektricky vodivé částice vytváří můstky, jako základ potřebný k zapálení výboje.

Fáze 3: Působením elektrického pole se ze záporně nabitě elektrody uvolňují částice - elektrony. Elektrony se v prostoru s neutrálními částicemi sráží a následně tříští.

Fáze 4: Ionty obalují střed budoucího výbojového kanálu, ve výbojovém kanálu klesá odpor, mezielektrodovým prostorem začíná protékat proud, roste proudová hustota a vytváří se vodivý kanál z plazmy. Roste proud a teplota na povrchu elektrod, klesá napětí na elektrodách.

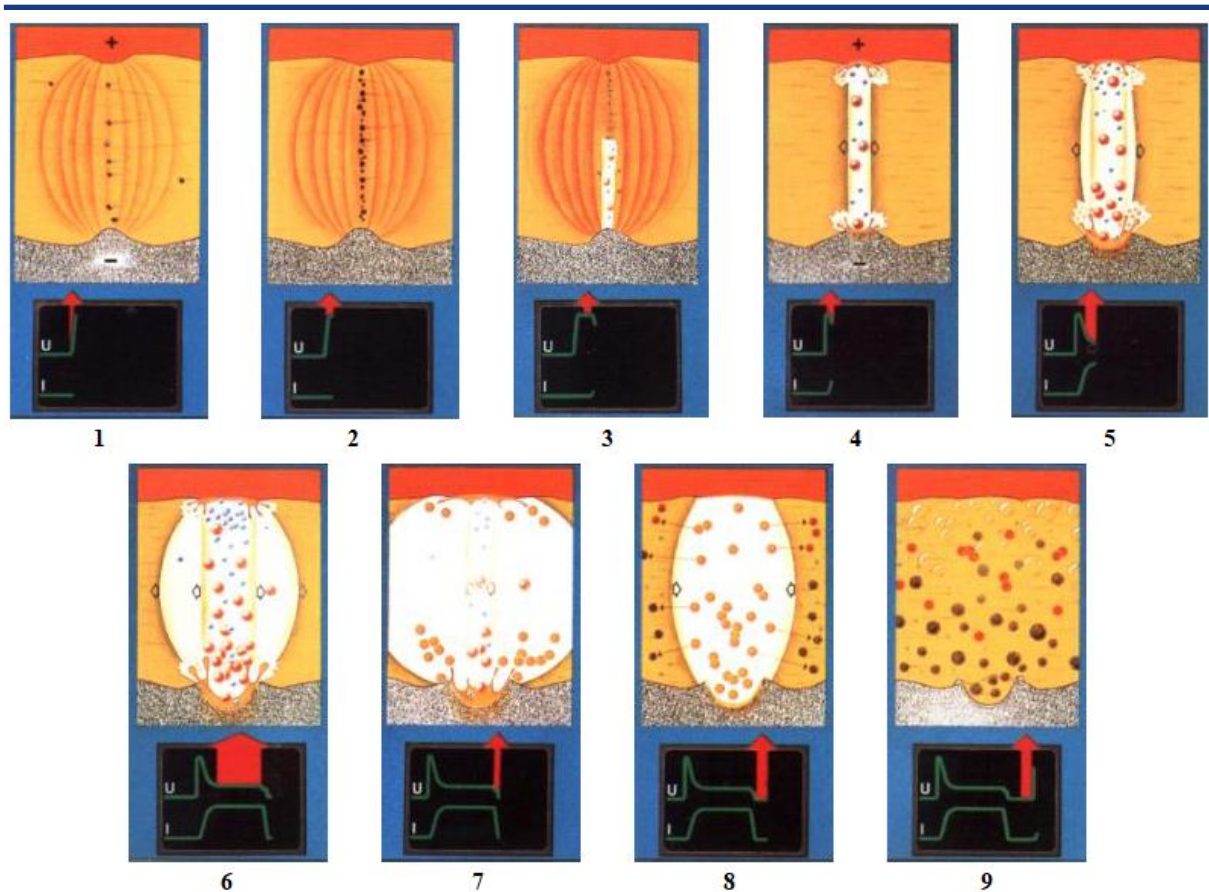
Fáze 5: Dielektrikum se začíná odpařovat a vzniká plynová bublina. V důsledku nárazů částic dochází k uvolňování vysokého množství tepelné energie. Nárazy elektronů na anodu a iontů na katodu způsobují ohřev elektrod, jejich tavení a odpařování. Dochází k dosažení maximální hodnoty protékajícího proudu a ustálení hodnoty napětí na takzvané zápalné hodnotě výboje.

Fáze 6: Nastává intenzivní expanze bubliny a intenzivní tavení a vypařování materiálu.

Fáze 7: Dochází k přerušení přiváděné energie a poklesu proudu v mezielektrodové mezeře, což způsobí snížení dodávky tepla. Snížení teploty je příčinou začátku imploze plynové bubliny. Pokles tlaku plynů (kavitace) a síly elektrického pole, způsobují vznik kráteru (rozrušení materiálu vytrháváním taveniny do prostoru).

Fáze 8: Proud a napětí klesá v mezielektrodové mezeře na nulovou hodnotu, dochází k zániku bubliny a výboje. Do vzniklého kráteru proniká dielektrikum, které ochlazuje taveninu a zabraňuje průniku tepla hlouběji do kovu. Odebraný materiál zůstává v dielektriku ve formě spalin a mikročástic, které vznikly z taveniny kovu. Vytvořený kráter dosahuje hodnoty řádově 10^{-3} až 10^{-5} mm³.

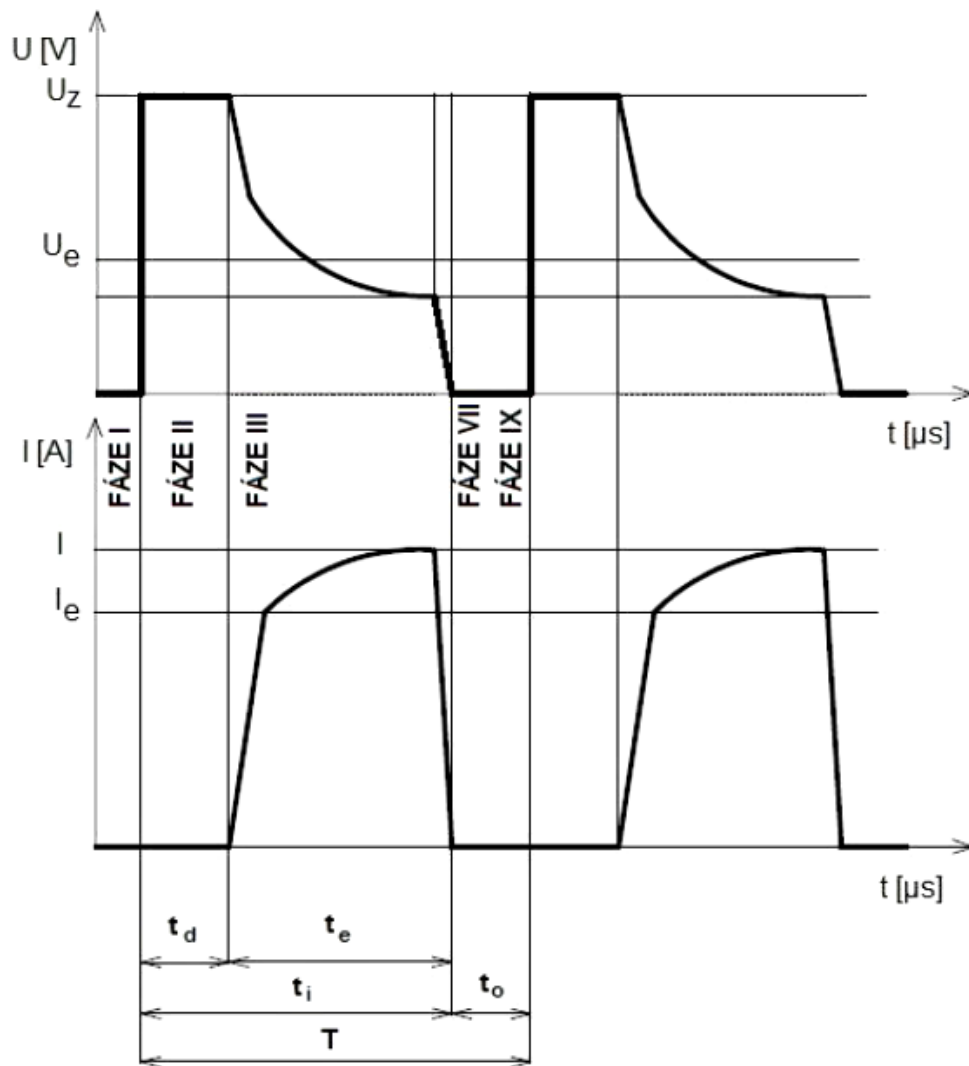
Fáze 9: Stav před začátkem nového výboje, kdy je dielektrikum znečištěno produkty eroze a obsahuje zbývající volné ionty, ty vytvářejí základ tvorby nového výbojového kanálu.



- 1 - Vznik elektrického pole mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem.
- 2 - Vytvoření vodivého můstku.
- 3 - Vzniklým můstkem dochází k emisi záporných iontů, což je počátek erodování.
- 4 - Proud unáší záporně a kladně nabité ionty.
- 5 - Vznik vodivého kanálu za zvyšující se teploty a tlaku.
- 6 - Počátek odpařování částec materiálu.
- 7 - Snížení tepelného výkonu, přerušeni el. proudu a odstranění části roztaveného materiálu.
- 8 - Zhroucení vzniklých bublin.
- 9 - V dielektriku zůstává odpad, který se musí vypláchnout. K tomu slouží doba prodlevy, kdy nedochází k výboji, ale dochází k vyplavení nečistot. V případě, že by byla doba prodlevy příliš krátká, dojde během dalšího náběhu napětí ihned k toku proudu (bod č. 5) a toto opakované zapálení oblouku v jednom bodě příliš ohřeje materiál a nástrojovou elektrodu natolik, že může dojít k lokálnímu porušení povrchů.

Obr. 1.8 Popis výboje [11].

Obr. 1.8 znázorňuje jednotlivé fáze výboje, díky kterému je dosaženo úběru materiálu, včetně průběhu proudu a napětí. Účelem elektroerozivního obrábění je dosažení maximálního úběru na jedné elektrodě (obrobku) a minimálního opotřebení na druhé elektrodě (nástroji) pomocí opakovaných výbojů. Každý impuls je charakterizován průběhem napětí a proudu v závislosti na čase. K výboji mezi elektrodami dochází řádově v desítkách až stovkách tisíc výbojů za sekundu. Časový průběh výboje, který byl získán pomocí polovodičového generátoru, je na obr. 1.10. [10] [12]



Obr. 1.9 Časový průběh výboje [10].

Základními fyzikálními údaji umožňujícími popis výboje z obr. 1.9 jsou zejména [10]:

- doba impulsu t_i : Časový úsek mezi zapojením a vypnutím generátoru, kde platí $t_i = t_d + t_e$.
- doba pauzy t_o : Časový úsek mezi vypnutím a dalším zapojením generátoru.
- doba zpoždění výboje t_d : Časový úsek mezi okamžikem zapojení generátoru a průrazem dielektrika.
- doba výboje t_e : Čas mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru.
- doba periody T : Časový úsek určující frekvenci výbojů, pro který platí $T = t_i + t_o$.
- napětí na prázdno U_z : Napětí při zapnutí generátoru.
- pracovní proud výboje I : Maximální vybíjecí proud protékající mezi elektrodami v okamžiku výboje.
- střední vybíjecí proud I_e : Střední hodnota proudu mezi okamžikem zapálení výboje a vypnutím generátoru.
- střední vybíjecí napětí U_e : Střední hodnota napětí mezi okamžikem zapálení výboje a vypnutím generátoru.

Z uvedených veličin lze určit celkové množství odebraného materiálu a časové využití periody výboje dle následujících vztahů [10]:

- Energie jednoho výboje W_i :

$$W_i = \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (1.2)$$

kde:

W_i [J] – energie jednoho výboje,
 T [μs] – doba periody,
 U [V] – napětí,
 I [A] – proud.

- Celkové množství odebraného materiálu za jednotku času Q_v :

$$Q_v = K \cdot f \cdot r \cdot \eta \cdot W_i = K \cdot f \cdot r \cdot \eta \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (1.3)$$

kde:

Q_v [$mm^3 \cdot s^{-1}$] – celkové množství odebraného materiálu,
 K [-] – součinitel úměrnosti pro katodu a anodu,
 f [s^{-1}] – frekvence výbojů,
 r [-] – účinnost elektrického výboje,
 η [-] – účinnost generátoru.

- Časové využití periody výboje q :

$$q = \frac{t_i}{T} = \frac{t_i}{t_i + t_0} \quad (1.4)$$

kde:

q [-] – časové využití periody stroje,
 t_i [μs] – doba impulsu,
 T [μs] – doba periody,
 t_0 [μs] – doba pauzy.

Elektrické výboje lze z hlediska dodávané energie do místa výboje rozdělit na [10]:

- » výboje elektrickou jiskrou,
- » výboje nestacionárním krátkodobým elektrickým obloukem.

Výboje elektrickou jiskrou

Tento typ výbojů má malé hodnoty časového využití periody výboje, krátkou dobu impulsu a vysoké frekvence. Ve výbojovém kanále převládá elektronová vodivost, která vyvolává vyšší úbytek anody oproti katodě, která uvolňuje elektrony. Hustota proudu dosahuje v místě výboje vysokých hodnot, čemuž odpovídá vysoká koncentrace energie a nárůst teploty. [10]

Výboje nestacionárním krátkodobým elektrickým obloukem

Tento typ výbojů je charakterizován delší dobou výbojů než výboje vyvolané elektrickou jiskrou a zároveň vyššími hodnotami časového využití periody výboje. Výboje mají nižší frekvence a ve výbojovém kanálu převládá iontová vodivost. Uvolňuje se větší počet kladných částic, které vyvolávají svými dopady na katodu tepelný účinek a tím i větší opotřebení této elektrody. Tento typ výboje je vhodný pro hrubovací obrábění, protože jednotlivé výboje dosahují vyšších hodnot energie. Srovnání obou druhů elektrických výbojů a jejich vybrané parametry zobrazuje tab. 1.4. [10]

Tab. 1.4 Srovnání druhů elektrických výbojů [10].

Druh výboje	Elektrická jiskra	Elektrický oblouk
Doba impulsu [s]	$t_i = 10^{-4}$ až 10^{-6}	$t_i > 10^{-4}$
Časové využití periody výboje	$q = 0,03$ až $0,2$	$q = 0,2$ až 1
Frekvence výbojů	vysoká	nízká
Hustota proudu v místě výboje [$A \cdot mm^{-2}$]	$\sim 10^{-6}$	10^2 až 10^3
Energie výboje [J]	$W_i = 10^{-5}$ až 10^{-1}	$W_i = 10^2$
Teplota ve výbojovém kanále [$^{\circ}C$]	$10\,000$ až $20\,000$ $^{\circ}C$	$3\,300$ až $3\,600$ $^{\circ}C$
Použití	převážně pro dokončovací operace	převážně pro hrubovací operace

Minimálního opotřebení elektrody, požadované produktivity, tvarové přesnosti a jakosti opracované plochy lze docílit [13]:

- vhodným zapojením napájecího obvodu – polaritou,
- vhodnými elektrickými parametry,
- četností výbojů,
- správnou volbou materiálu elektrody – nástroje,
- správnou volbou dielektrika.

1.4 Zdroje elektrické energie

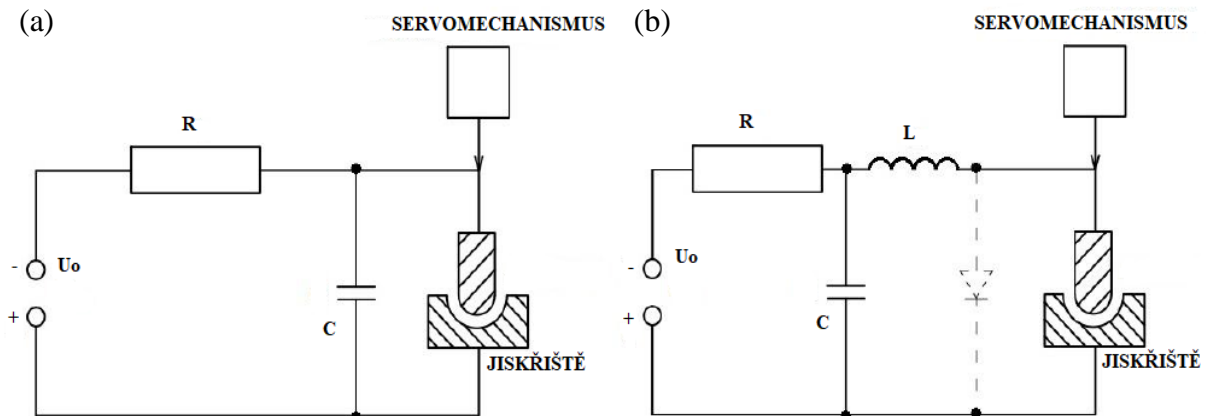
Jednou z nejdůležitějších částí stroje je generátor elektrické energie, který produkuje jednotlivé výboje, díky kterým dochází k vlastnímu procesu elektroerozivního obrábění. Parametry výbojů patří k velmi důležitým charakteristikám procesu. Každý výboj je charakterizován napětím, proudem a svým tvarem. U jednotlivých technologických aplikací, jako například hrubování a obrábění načisto, se využívají různé formy elektrických výbojů. [10]

Základní dělení generátorů [10]:

- elektrojiskrové generátory závislé (RC a RLC),
- nezávislé zdroje výbojů.

Elektrojiskrové generátory závislé (RC a RLC)

Patří k nejstarším generátorům. Tento generátor spočívá v opakovaném nabíjení a vybíjení kondenzátoru ze zdroje stejnosměrného napětí. RC generátory jsou generátory s odporem a kapacitou, RLC generátory jsou generátory s odporem, indukčností a kapacitou. Kondenzátor je paralelně zapojený do obvodu a jeho vybití nastává tehdy, když velikost napětí dosáhne průrazné hodnoty. Průrazná hodnota napětí je závislá mimo jiné i na znečištění dielektrika a mezielektrodové vzdálenosti. Dojde-li ke změně poměrů v jiskřišti, mění se i frekvence a energie výbojů. Z důvodu této závislosti na poměrech v jiskřišti se tyto elektrojiskrové generátory nazývají závislé. Schéma zapojení RC a RLC obvodu je znázorněno na obr. 1.10. [10]



Obr. 1.10 Schéma (a) RC a (b) RLC generátorů [6].

Zdroje produkují velmi krátké výboje ($t_i = 10^{-4}$ až 10^{-7}). Velikost pracovní mezery řídí servomechanismus na základě vyhodnocování napěťových poměrů v jiskřišti. Mezi výhody těchto generátorů patří zejména spolehlivost a jednoduchost. Oproti tomu hlavními nevýhodami jsou nízká produktivita a omezená možnost regulace tvaru a frekvence výbojů. Z tohoto důvodu jsou tyto generátory vhodné zejména pro obrábění načisto. [1] [10]

Nezávislé generátory

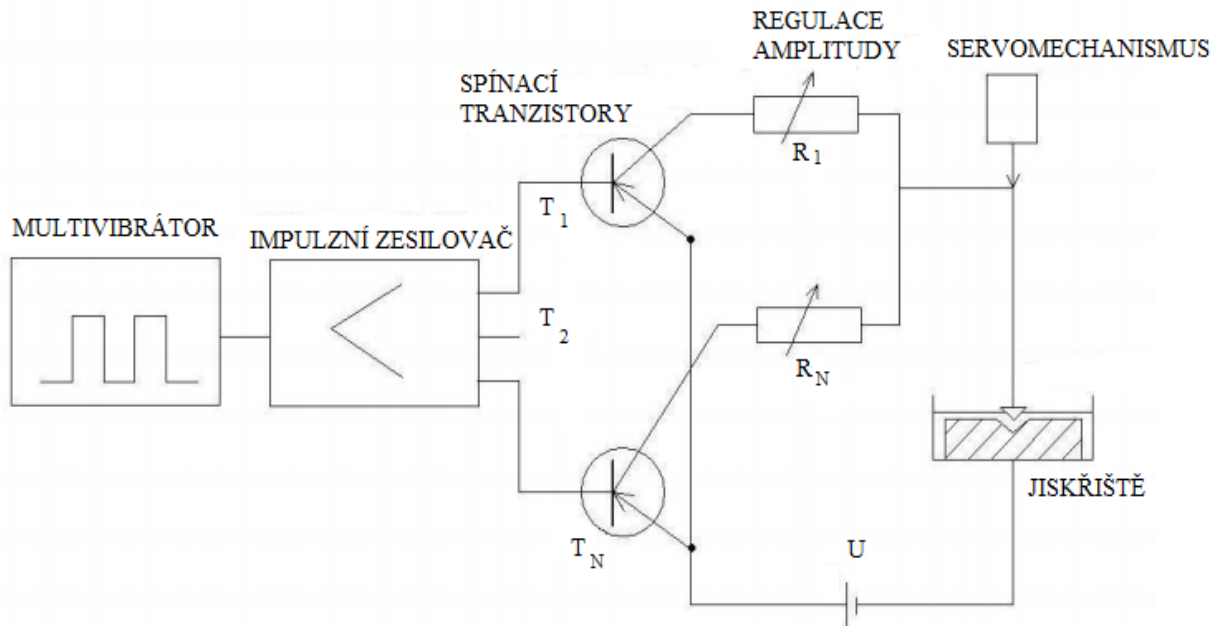
Tyto generátory umožňují rozmanitou volbu pracovních podmínek, bez ohledu na poměry v pracovní mezeře. Mezi charakteristické znaky těchto zdrojů patří delší doba trvání výbojů a nižší pracovní napětí. U těchto generátorů převládá v řadě případů opačná polarita výbojů - převaha iontové vodivosti, u které je obrobek zapojený jako katoda a nástroj jako anoda. Mezi nezávislé generátory patří [10]:

- mechanické generátory kolektorové a bezkolektorové,
- tranzistorové generátory.

Mechanické generátory kolektorové a bezkolektorové pracují na principu, že výboje vznikají roztáčením dynama pomocí asynchronního motoru. Tyto zdroje umožňují vysoké úběry. Mezi nevýhody patří hluchost a obtížná změna frekvence, která je dána otáčkami motoru. [10]

Tranzistorové generátory patří k nejčastěji používaným generátorům. Tyto generátory umožňují velký rozsah elektrických parametrů výbojů. Schéma tranzistorového generátoru je na obr. 1.11. Po sepnutí tranzistoru, zapojeného sériově s jiskřištěm, se na elektrodách objeví napětí a v případě, že je mezielektrodová vzdálenost příznivá pro průraz, tak po dobu sepnutí tranzistoru protéká obvodem pracovní proud. K přerušení výboje dojde uzavřením tranzistoru. Základem generátoru je multivibrátor, který vysílá impulzy. Tyto impulzy jsou dále

zesilované v impulzním zesilovači. Paralelně zapojené tranzistory určují pracovní proud. Tyto generátory umožňují nárůst produktivity a zároveň snížení úbytku nástrojové elektrody. [10]



Obr. 1.11 Schéma tranzistorového generátoru [10].

1.5 Dielektrikum

Dielektrikum je pracovní kapalně prostředí, které působí jako izolátor mezi elektrodami, odvádí teplo, ohraničuje výbojový kanál, umožňuje vyplavení odebraných částic z místa výboje, zabráňuje usazování uhlíku a mikročástic materiálu na povrchu nástrojové elektrody, kvůli kterému by mohlo docházet ke zkratům. Součástí elektroerozivního stroje je zásobník dielektrické kapaliny, čerpadlo, potrubí, filtrační zařízení a chladič zařízení. Je velmi důležité, aby dielektrikum při erozi nebylo příliš znečištěné. Pro filtraci se používají různá zařízení, jako například papírové filtry, usazovací filtry nebo odstředivá filtrační zařízení. [4] [10]

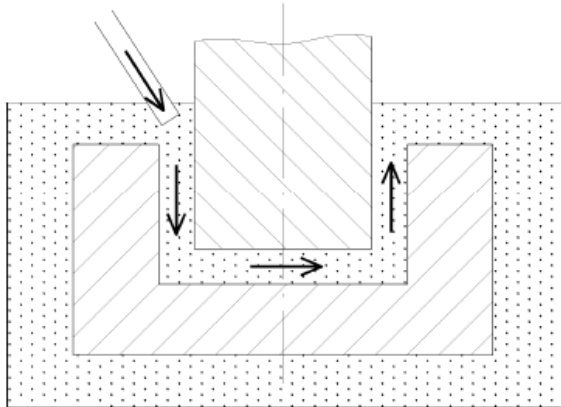
Dielektrikum musí vykazovat zejména následující vlastnosti [10]:

- dostatečný odpor, aby průrazem dielektrika vznikl výboj,
- správnou viskozitu a smáčivost, zaručující rychlé obnovení izolace v místě výboje,
- přijatelný bod vzplanutí. Při výboji vznikají vysoké teploty, které způsobují oteplení elektrod i dielektrika, bod vzplanutí by neměl být nižší než 60 °C,
- hygienickou a ekologickou nezávadnost. Během celého procesu obrábění nesmí docházet ke vzniku a rozkladu zdraví nebezpečných plynů, popřípadě je nutné zajistit odsávání těchto plynů.

Jako dielektrika bývají nejčastěji používány lehké strojní a transformátorové oleje, silikonové oleje a petrolej. Všechny tyto látky v dostatečné míře splňují uvedené požadavky a funkce. Nezbytnou součástí všech strojů je rovněž agregát pro přívod, chlazení a čištění dielektrika, který do pracovního prostoru přivádí dielektrikum v požadovaném množství, tlaku a čistotě. [10] Jednotlivé způsoby vyplachování a jejich princip je na obr. 1.12, 1.13, 1.14 a 1.15.

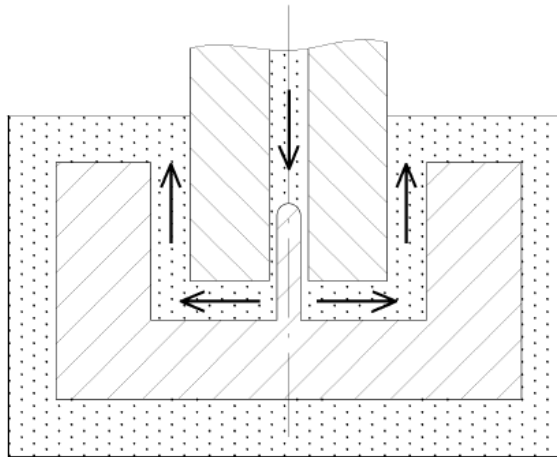
Existuje řada konstrukčních uspořádání pro realizaci vyplachování [14]:

Vnější vyplachování patří mezi nejobecnější způsoby přívodu dielektrika. Při obrábění hlubších dutin je vhodné jej kombinovat s pulzním vyplachováním. Princip vnějšího vyplachování je na obr. 1.12.



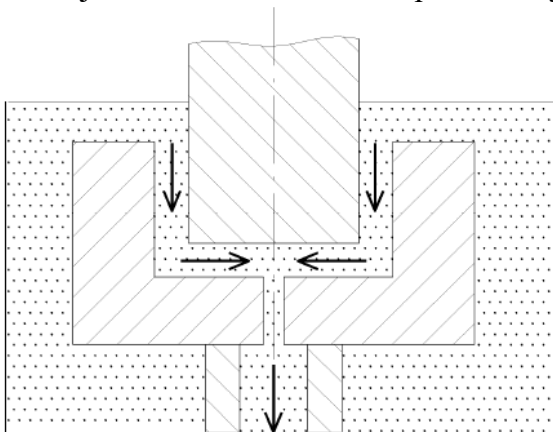
Obr. 1.12 Vnější vyplachování [10].

Tlakové vnitřní vyplachování (obr. 1.13) spočívá v přívodu dielektrika do pracovního prostoru přímo otvorem v nástroji. Odváděné částice jsou zdrojem bočních výbojů, což způsobuje zhoršení tvarové přesnosti bočních ploch.



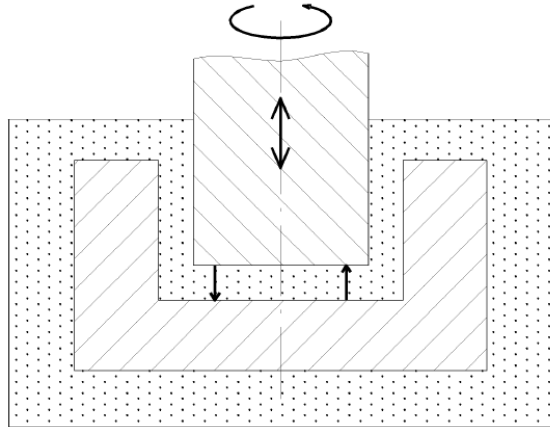
Obr. 1.13 Tlakové vnitřní vyplachování [10].

Vyplachování odsáváním spočívá v odsávání dutinou v obrobku, nebo dutinou v nástrojové elektrodě. Tento způsob zaručuje velmi dobrou tvarovou přesnost a je na obr. 1.14.



Obr. 1.14 Vyplachování odsáváním [10].

Pulzní vyplachování (obr. 1.15) spočívá v oddalování elektrody při současném přerušení elektroerozivního procesu, což způsobí zvětšení pracovní mezery a dosažení dokonalého výplachu. Proud je poté opět spuštěn až po nastavení elektrody do pracovní vzdálenosti. Pulzní vyplachování je výhodné při výrobě hlubokých dutin, při použití tenkých elektrod nebo při obrábění načisto.



Obr. 1.15 Pulzní vyplachování [10].

Kombinované vyplachování zahrnuje kombinaci vnitřního tlakového vyplachování a odsávání, což umožňuje dosažení přesných tvarů obráběných dutin. Tento způsob se využívá zejména při hloubení tvarově složitých dutin.

1.6 Nástrojové elektrody

Nástrojová elektroda se při elektroerozivním hloubení posouvá proti obrobku a současně při tom udržuje řídicí systém konstantní velikost jiskrové mezery. Hloubení na elektroerozivních hloubičkách probíhá tak, že elektroda má negativní tvar obrobené plochy a pomocí výbojů kopíruje tento tvar do materiálu obrobku. Z tohoto důvodu je patrné, že přesnost tvaru elektrody je důležitá i pro výslednou geometrickou přesnost dutiny. Složitější tvary lze na CNC strojích hloubit i tvarově jednoduchými elektrodami, jejichž pohyb je řízen po naprogramované dráze. [15]

Celkové množství odebraného materiálu se rozloží na úbytek anody a katody. Vlastní proces obrábění vyvolává opotřebení nástroje, změnu jeho rozměrů a tvaru. Obecně se za cíl považuje vhodná volba pracovních podmínek zajišťující minimální opotřebení nástroje při požadované produktivitě a kvalitě povrchu obrobené plochy. Úbytek elektrod je závislý především na elektrických parametrech výboje, polaritě zdroje a fyzikálních vlastnostech materiálu. Mechanické vlastnosti nemají významný vliv na odolnost proti elektrické erozi. Dalším faktorem je samozřejmě pořizovací cena. Pojem polarita elektrické eroze označuje převyšující erozi jedné elektrody nad druhou. Kladná polarita je označení pro takové zapojení, převládá-li úbytek na anodě. Naopak záporná polarita je označení pro zapojení, kdy převládá úbytek na záporné elektrodě - katodě. [10]

1.6.1 Opotřebení a materiály nástrojových elektrod

Při volbě nástrojové elektrody je třeba vzít v úvahu její opotřebení během daného procesu elektroerozivního obrábění. Materiál elektrody by měl mít zejména [15]:

- dostatečně vysokou elektrickou vodivost,
- dobrou obrobitelnost,
- vysoký bod tavení,
- dostatečnou pevnost, aby se při procesu elektroeroze nedeformoval,
- přijatelnou cenu, která může tvořit nezanedbatelnou část spojenou s náklady na konkrétní proces obrábění.

Používanými materiály pro výrobu nástrojových elektrod jsou grafit, měď, mosaz a wolfram, nicméně obecně lze říci, že mezi nejvyužívanější materiály v technické praxi patří grafit a měď. [15]

Grafit je nejčastěji využívaným materiálem. Má dobrou obrobitelnost a odolnost proti opotřebení. Dále disponuje relativně malou hmotností, která je výhodná zejména u objemnějších elektrod. Grafit má vysokou teplotu tavení a to přibližně 3 000 °C, je vhodný pro obrábění ocelí. Nevýhodou grafitu je, že v důsledku jeho opotřebení dochází ke znečištění dielektrika. [17]

Měď se vykazuje dobrou elektrickou vodivostí a nízkým opotřebením. Dosahovaná kvalita povrchu obrobené plochy je i nižší než $R_a = 0,5 \mu\text{m}$, nicméně měděné elektrody nepracují tak dobře jako elektrody z grafitu či mosazi. Je vhodná pro obrábění karbidů a to zejména karbidu wolframu. [16]

Porovnání a výhody použití grafitu a mědi lze shrnout několika vlastnostmi. Grafit se snáze a rychleji opracovává, má nižší hmotnost a je levnější než měď. Grafitovými elektrodami lze odebrat větší množství z opracovávaného materiálu, což může urychlovat výrobu. Vlastnosti grafitu jsou v čase neměnné, což přináší výhody ve skladování, protože může být skladován v podstatě neomezenou dobu. Nicméně v případě, že grafitová elektroda zůstane déle v zápalu, začne se odpařovat. [17]

Mosaz vykazuje ve srovnání s grafitem a mědí poměrně vysoké hodnoty opotřebení, ovšem je relativně levná a snadno obrobitelná. [16]

Nástrojové elektrody vyrobené z kombinace **mědi a wolframu** nebo **stříbra a wolframu** se využívají zejména při obrábění hlubokých drážek a pro jemné práce. Jde o drahé materiály. Podíl wolframu se pohybuje v rozmezí 50 až 80 %. [16]

Wolfram se používá pro výrobu malých děr o průměru menším než 0,2 mm. [16]

Na opotřebení elektrody má největší vliv teplota tavení daného materiálu. Je nezbytné sledovat zejména opotřebení na klíčových místech tvarových elektrod, a to zejména boků, rohů a konce elektrody, které mají největší dopad na přesnost výsledného tvaru součásti. K nárůstu opotřebení dochází také v důsledku strukturních vad a pórovitosti dané elektrody. Nástrojové elektrody se vyrábí obráběním, lisováním, práškovou metalurgií, stříkáním a galvanoplastikou. [15] Vztah (1.5) popisuje relativní objemové opotřebení v závislosti na odebraném objemu materiálu obrobku. [10]

$$v = \frac{V_N}{V_0} \cdot 100 \quad (1.5)$$

kde:

v [%] – relativní objemové opotřebení,
 V_N [$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$] – objemové opotřebení nástroje,
 V_0 [$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$] – odebraný objem materiálu obrobku.

Hodnoty relativního objemového opotřebení jsou určeny zejména [10]:

- kombinací materiálu nástroje a obrobku,
- polaritou,
- proudem,
- dobou trvání impulsu.

Rozsah opotřebení je velmi široký, řádově od desetin procenta až po desítky procent. Například v případě hrubování oceli měděnou elektrodou je opotřebení 0,5 až 3 %, zatímco při obrábění načisto je relativní objemové opotřebení od 2 do 10 %.

1.6.2 Stanovení rozměrů hrubovací a dokončovací elektrody

Pro výpočet rozměru hrubovací elektrody platí vztah (1.6) [10]:

$$d = D - 2(a + R_{max} + z) = d - 2M \quad (1.6)$$

kde:

D [mm] – požadovaný průměr dutiny,
 a [mm] – velikost pracovní mezery,
 R_{max} – kvalita obrobenej plochy,
 z [mm] – tloušťka narušeného povrchu,
 M [mm] – minimální hodnota, o kterou musí být nástroj menší pro dosažení požadovaného průměru

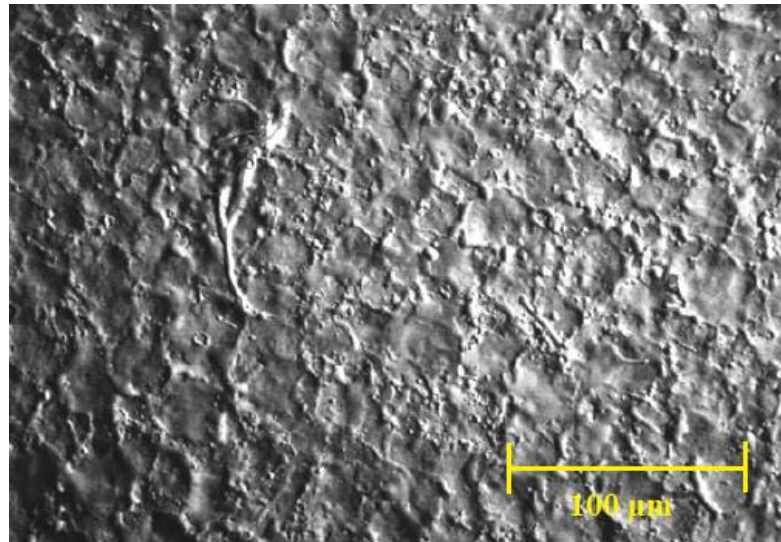
Pro výpočet rozměru dokončovací elektrody platí vztah (1.7) [10]:

$$d = D - 2 \cdot a \quad (1.7)$$

Rozměr dokončovací elektrody je obvykle dán pouze velikostí pracovní mezery, protože se pro oblast dokončování volí výboje s nižší energií jednotlivých výbojů, tudíž vzniklá hodnota R_{max} bude oproti hodnotě velikosti pracovní mezery zanedbatelná. [10]

1.7 Kvalita povrchu po elektroerozivním obrábění

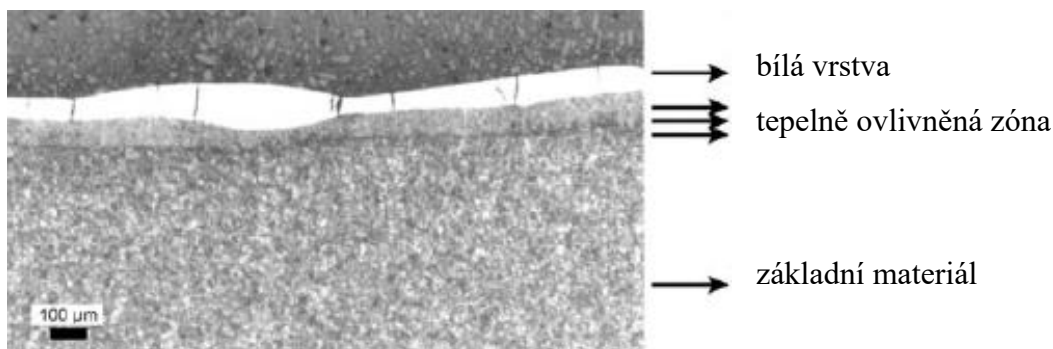
Povrch po elektroerozivním obrábění je tvořený charakteristickými krátery, které jsou způsobeny elektrickými výboji. Kvalita povrchu souvisí s energií jednotlivých výbojů, která má dopad na rozměry vytvořeného kráteru. Z tohoto vyplývá, že čím menší krátery jsou na povrchu obrobenej součásti vytvořené elektroerozí, tím lepší kvalita povrchu. Na obr. 1.16 je znázorněn profil povrchu oceli po elektroerozivním hloubení. [18]



Obr. 1.16 Povrch oceli po elektroerozivním hloubení [18].

Při elektroerozivním obrábění je v místě výboje vysoká teplota, která má významný vliv na povrchovou vrstvu obráběného materiálu. Tepelně ovlivněná zóna, která se vyskytuje v povrchové vrstvě obráběného materiálu, se skládá z několika vrstev. Tyto vrstvy závisí na podmínkách procesu obrábění a na vlastnostech obrobku, jako je chemické složení a tepelná vodivost. [18]

Krajní vrstva v bezprostřední blízkosti dielektrika, kde se nachází roztavený materiál obrobku, se nazývá bílá vrstva. V bílé vrstvě se často nachází mikrotrhliny v důsledku rychlého ztuhnutí a smrštění materiálu. Tyto trhliny jsou většinou kolmé k povrchu a prochází přes celou hloubku bílé vrstvy, jen zřídka pronikají k dalším vrstvám. Na povrchu obrobku může dojít k zakalení jednak účinkem dielektrické kapaliny, zejména však prostupem tepla do jádra obrobku, což má za následek zvýšení jeho tvrdosti a křehkosti. Pod bílou vrstvou se nachází tepelně ovlivněná zóna. Tato oblast zahrnuje materiál obrobku, který je tepelně ovlivněn, ale nikoliv roztaven. Tepelně ovlivněná zóna se obvykle skládá z několika vrstev, které ovšem nemusí být vždy rozeznatelné. Obr. 1.17 znázorňuje řez ocelí W.Nr. 1.2738 po elektroerozivním hloubení, tato nástrojová ocel legovaná chromem, manganem, niklem a molybdenem se používá zejména na výrobu forem. Při elektroerozivním hloubení může být materiál elektrody transportován do materiálu obrobku, což může mít vliv na výsledné vlastnosti a strukturu obrobené plochy. Bylo dokázáno, že při použití měděné elektrody během elektroerozivního hloubení se obvykle našlo v bílé vrstvě obrobku pouze méně než 1 % mědi. [18] [19]



Obr. 1.17 Povrch po elektroerozivním hloubení [18].

Tab. 1.5 znázorňuje vliv legujících prvků na výslednou kvalitu povrchu po elektroerozivním hloubení.

Tab. 1.5 Kvalita povrchu v závislosti na složení různých ocelí [18].

Složení [%]							Kvalita povrchu Ra [μm]
C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	
2,3	0,4	0,4	12,5	1,1	4,0		0,26
0,35	0,4	0,3	13,0	0,35			0,23
1,1	0,9	0,4	8,3	2,1	0,5		0,20
1,9	0,7	0,3	20,0	1,0	4,0	0,6	0,20
2,38	1,1	0,4	5,0	1,3	0,4		0,18
0,39	1,1	0,4	5,2	1,4	0,95		0,09

Úchylka tvaru obrobku od žádaného δ se v případě elektroerozivního obrábění určí podle vztahu (1.8) [10]:

$$\delta = \delta_{ST} + \delta_T + \delta_{NÁST} + \delta_{ER} \quad (1.8)$$

kde:

δ_{ST} = chyba obráběcího stroje způsobená nepřesnostmi pohybových mechanismů a polohovacího mechanismu nástrojových elektrod, tato hodnota nebývá vyšší než 0,003 mm, protože stroje pro elektroerozivní obrábění mají vysokou tuhost a jedná se o bezsilové obrábění,

δ_T = chyba vzniklá nárůstem teploty během obrábění (ohřevem dielektrika a nástrojových elektrod),

$\delta_{NÁST}$ = výrobní nepřesnost nástrojové elektrody, tato hodnota se pohybuje v tisícinách až setinách milimetru v závislosti na způsobu výroby nástrojové elektrody,

δ_{ER} = chyba daná podstatou elektroerozivního obrábění, lze ji kompenzovat tvarem nástroje, volbou vhodného způsobu obrábění, atd., tato chyba řádově nepřesahuje hodnoty μm .

2 LETECKÉ MATERIÁLY

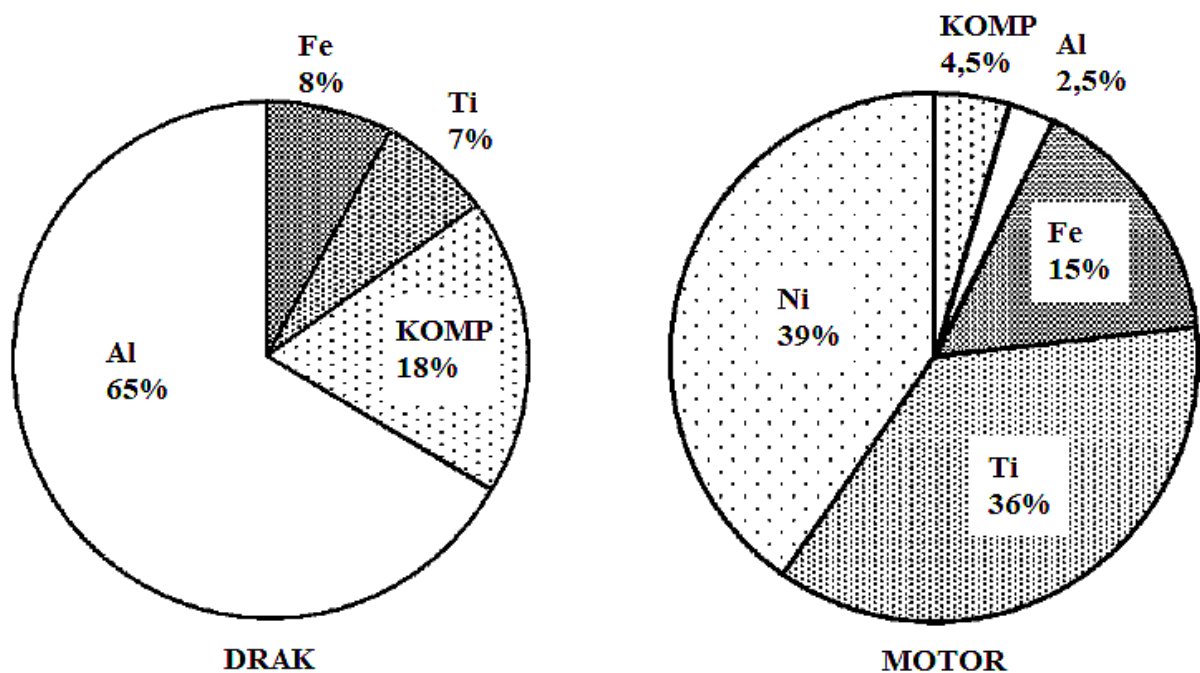
2.1 Používané materiály v leteckém průmyslu

Na materiály používané v leteckém průmyslu je kladeno velké množství požadavků. Tyto materiály musí mít dobré pevnostní charakteristiky při zachování nízké měrné hmotnosti, dále také odolnost proti korozi. Jako součásti do leteckých motorů se používají materiály, které jsou schopné odolat vysokým teplotám. Funkce dané součásti, zatížení, kterému bude vystavena a prostředí, ve kterém se bude nacházet, jsou rozhodující při výběru materiálu pro jednotlivé součásti. Mezi materiály, které tyto vlastnosti splňují, a které se využívají v leteckém průmyslu, patří zejména [20] [21]:

- hliníkové slitiny,
- titanové slitiny,
- slitiny niklu a kobaltu,
- žárupevné oceli,
- kompozitní materiály.

Z hlediska použitých materiálů, lze konstrukci letadla rozdělit na dvě základní části, a to na drak a pohonnou jednotku. [22]

Drak letadla je tvořen nepostradatelnými pevnými částmi konstrukce letadla, které jsou pro let nezbytné: trup, nosné plochy (křídla), ocasní plochy, podvozek a soustava řízení. Součásti draku letadla jsou komplexně namáhány (kombinace tah, tlak, ohyb a krut) a zároveň mohou být tyto složky s časem proměnné. Požadavkům na mechanické vlastnosti draku nejvíce vyhovují materiály na bázi hliníku, oceli, titanu a v posledních letech zejména kompozitní materiály, jak je vidět na obr. 2.1 (vlevo). [21] [22]



Obr. 2.1 Procentuální zastoupení materiálů na letadle [23].

Pohonná jednotka letadla je tvořena motorem a jeho agregáty, vrtulí, motorovým ložem, kryty, palivovou a olejovou instalací, nádržemi, chlazením a dalším příslušenstvím. Motor vyvíjí tah nezbytný pro let. Jednotlivé části pohonné jednotky jsou namáhány staticky i dynamicky především na tah, tlak, ohyb a krut vlivem odstředivé síly vyvolané vlastní hmotností, vibracemi, nerovnoměrností toku a proudění plynů v motoru apod. Povrch součástí je vystaven dalším degradačním procesům, mezi které patří například vysokoteplotní koroze, oxidace a eroze. Většina součástí leteckých motorů se vyrábí z niklových a titanových slitin, žárupevných ocelí, popřípadě kobaltových superslitin. Procentuální zastoupení materiálů na leteckém motoru je na obr. 2.1 (vpravo). Povrchy některých součástí bývají chráněny povrchovými ochrannými vrstvami, které zvyšují jejich životnost. [21] [22]

Hliník a jeho slitiny

Hliník je stříbrolesklý kov s kubickou plošně středěnou mřížkou (FCC). Jedná se o vysoce tvárný materiál za tepla i za studena a má nízkou hustotu. Je po kyslíku a křemíku nejrozšířenější prvek na zeměkouli, v přírodě se nachází v 250 různých minerálech. Další vlastnosti hliníku jsou popsány v tab. 2.1. [20] [24]

Tab. 2.1 Vybrané vlastnosti hliníku [25].

Hustota	2,6989 g·cm ⁻³
Relativní atomová hmotnost	26,9815
Teplota tavení	660,4 °C
Teplota varu	2467 °C

Hliník má zejména v atmosférických podmínkách velmi dobrou odolnost proti korozi. Největší odolnost proti korozi má čistý hliník, příměsi ostatních prvků jeho korozivzdornost snižují, zejména

přítomnost mědi, protože slitiny s mědí mají nízkou korozivzdornost. V leteckém průmyslu se používají výhradně tvářené vytvrditelné slitiny, mezi které patří [24] [26]:

- Slitiny na bázi Al-Cu-Mg, které patří k nejpoužívanějším slitinám. Mají velmi dobré mechanické vlastnosti, ovšem nižší korozivzdornost. Obsah mědi se obvykle pohybuje kolem 4 až 4,8 %. Hořčík způsobuje zlepšení možnosti precipitačního vytvrzení a rovněž působí pozitivně na navyšování pevnosti po vytvrzení. Obsah hořčíku bývá v těchto slitinách od 0,4 do 1,8 %. Z těchto slitin se nejčastěji vyrábí potahy trupů a křídel.
- Slitiny na bázi Al-Zn-Mg disponují vysokou odolností proti korozi a pevností, která dosahuje nejvyšších hodnot ze všech slitin hliníku. Zinek však má negativní vliv na plasticitu hliníku. Pro snížení sklonu ke vzniku trhlin při svařování se používají přísady, jako například titan. Tyto slitiny nachází využití v konstrukcích, kde je požadována vysoká pevnost, korozivzdornost a houževnatost. Vyrábí se z nich nosníky, žebra, potahy křídel, apod.
- Slitiny na bázi Al-Cu-Li mají velmi nízkou měrnou hmotnost a vysoký modul pružnosti v tahu. Tyto vlastnosti způsobuje lithium, které rovněž zvyšuje creepovou odolnost. Tyto slitiny dosahují optimálních vlastností vytvrzováním, jako přísada se používá zirkonium, které stabilizuje substrukturu a způsobuje obtížnější rekrystalizaci. V leteckém průmyslu se tyto slitiny uplatňují zejména tam, kde je požadována vysoká houževnatost.
- Slitiny na bázi Al-Mg-Si mají zejména dobrou tvárnost a korozivzdornost. U těchto slitin umožňuje vytvrzení přítomnost křemíku. Dále disponují dobrou pevností a odolností proti otěru, proto se používají například na spodní části trupu a v hydraulických systémech.

- Slitiny na bázi Al-Sc mají dobré mechanické vlastnosti, což je způsobeno právě přítomností skandia. Tyto slitiny se mohou legovat také zirkoniem, kde kombinací obou prvků lze dosáhnout nejlepších vlastností. Slitiny legované skandiem mají stabilní jemnozrnnou strukturu vhodnou k superplastickému tváření.

Titan a jeho slitiny

Titan je polymorfní kov bílé barvy, který má velmi dobrou korozivzdornost a poměrně velkou mez únavy. Při nízkých teplotách má hexagonální (šesterečnou) mřížku, ovšem při teplotách nad 882 °C má mřížku kubickou, prostorově středěnou. Další vlastnosti titanu jsou v tab. 2.2.

Tab. 2.2 Vybrané vlastnosti titanu [27].

Hustota	4,51 g·cm ⁻³
Relativní atomová hmotnost	47,867
Teplota tavení	1661 °C
Teplota varu	3287 °C

Titan a jeho slitiny našly uplatnění jak v leteckých motorech, tak i v draku. V motoru se titanové slitiny využívají zejména jako části kompresoru (rotory, prstence, lopatky, apod.), zatímco na draku se využívají zejména ve

formě potahů křidel a ocasních ploch. Mimo letectví se titan využívá například v chemickém či energetickém průmyslu. Slitiny titanu dosahují u civilních letounů přibližně 10 až 15 % z celkové hmotnosti letadla. [28]

Titan má dvě alotropické modifikace, jde o fázi α a fázi β . Fáze α se vyskytuje přibližně do teploty 882 °C a od této teploty se vyskytuje fáze β . Podle výskytu těchto fází lze slitiny titanu rozdělit do tří základních skupin:

- slitiny α ,
- slitiny $\alpha+\beta$,
- slitiny β .

Slitiny α mají výborné mechanické vlastnosti až do 600 °C. Jedná se o strukturně velmi stabilní slitiny. Mezi prvky stabilizující fázi α patří uhlík, kyslík, dusík a zejména hliník. Tyto slitiny jsou dobře svařitelné, a to zejména laserem nebo svazkem elektronů, ovšem prokazují se omezenou tvářitelností za studena. Hliník je v titanu dobře rozpustný a nebývá ho v praxi více než 7 %. [29] [30]

Slitiny $\alpha+\beta$ jsou ze všech slitin titanu nejrozšířenější, protože dvoufázová struktura vzniká snadno. Tyto slitiny mají do velké míry ovlivněny své mechanické vlastnosti podmínkami tváření a tepelného zpracování, nicméně obecně mají tyto slitiny vysokou pevnost, které se však při vyšších teplotách zhoršují (nad 400 °C). [29] [30]

Slitiny β vznikají zvyšováním obsahu prvků stabilizujících fázi β až do stavu, kdy se ve slitině nachází pouze β fáze. Hlavním předpokladem pro dosažení pouze β fáze ve struktuře je, aby se snížila teplota fázové přeměny z α na β nebo aby se průběh této transformace výrazně zpomalil. Toho se docílí přidáním velkého množství přídavných prvků (až 30 %). Tyto slitiny jsou dobře svařitelné a mají vysokou pevnost až do 500 °C, ovšem obsahují velké množství legujících prvků, které oproti ostatním titanovým slitinám zvyšují měrnou hmotnost. [29] [30]

Slitiny titanu používané v leteckém průmyslu:

- Ti-6Al-4V,
- Ti-7Al-4Mo,
- Ti-13V-11Cr-3Al,
- Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo.

Slitina Ti-6Al-4V je nejrozšířenější ze všech slitin titanu, na její výrobu se spotřebuje až polovina roční produkce titanu. Využití nachází zejména v leteckém průmyslu, kde se z nich vyrábějí lopatky kompresorů, části konstrukce draku apod. Dále se tyto slitiny využívají v medicíně například jako kostní šrouby. Jde o slitiny $\alpha+\beta$. Hliník (jeho obsah je do 7 %) ve slitině Ti-6Al-4V stabilizuje fázi α zatímco vanad (jehož je ve slitině kolem 4,5 %) působí jako stabilizátor fáze β . Obsah kyslíku nepřesahuje 0,2 % a obsah dusíku nepřesahuje 0,05 %. Zvyšování obsahu těchto prvků vede ke zvýšení pevnosti, ovšem zhoršení tažnosti, houževnatosti, korozivzdornosti a odolnosti proti vzniku trhlin. Tyto slitiny jsou vhodné pro tváření i pro odlévání, nicméně obecně platí, že tvářené slitiny dosahují vyšší pevnosti. [31]

Slitina Ti-7Al-4Mo je tepelně zpracovaná $\alpha+\beta$ slitina, která má větší pevnost než slitina Ti-6Al-4V. Obsah molybdenu, který je ve slitině jako stabilizátor fáze β , zlepšuje tepelné zpracování a substituční zpevnění. Tato slitina se používá na odlévané součásti, které vyžadují pevnost při vyšších teplotách, například jako lopatky kompresorů. [31]

Slitina Ti-13V-11Cr-3Al je β slitina, kde je fáze β stabilní za pokojové teploty. Má dobrou tažnost a vysokou pevnost (až 825 MPa), které se docílují pomocí stárnutí. Právě vysoká pevnost a relativně nízká hustota dělá z této slitiny výborný konstrukční materiál. Obsahuje kolem 11 % chromu a její hlavní využití je na součásti konstrukce draku, jako například výztuhy. [31]

Slitina Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo je tepelně zpracovaná $\alpha+\beta$ slitina. Používá se na dlouhodobě zatížené součásti při teplotách do 400 °C, při krátkodobém zatížení ji lze použít až do teplot kolem 550 °C. Jde o substitučně zpevněnou slitinu v důsledku přítomnosti molybdenu, který zde stabilizuje β fázi. Křemík v této slitině zvyšuje creepovou odolnost. Je používána zejména jako součást motorů, například jako lopatky kompresoru. [31]

Slitiny niklu a kobaltu

Nikl je drahý kov bílé barvy. Je feromagnetický až do Curieho teploty, která je rovna 357 °C a má kubickou plošně centrovanou mřížku. Nikl má dobré plastické vlastnosti, ovšem nízkou tvrdost, kterou lze zvýšit tvářením za studena. [21] [29] Některé vybrané vlastnosti niklu jsou znázorněny v následující tab. 2.3.

Tab. 2.3 Vybrané vlastnosti niklu [32].

Hustota	8,91 g·cm ⁻³
Relativní atomová hmotnost	58, 6934
Teplota tavení	1453 °C
Teplota varu	2732 °C

Nikl má velmi dobrou korozivzdornost, a to nejen atmosférickou, ale i ve vodě a alkalických roztocích. Tato vlastnost ovlivňuje i jeho hlavní využití a tak se používá zejména jako legující prvek především do

korozivzdorných ocelí. Dále se nikl využívá na niklové slitiny a zbytek jeho využití připadá na pokovování, mincovnictví apod. [33]

V leteckém průmyslu se využívají zejména žárupevné a žáruvzdorné slitiny, které se obecně nazývají superslitiny. Niklové superslitiny se běžně využívají v prostředích, kde jsou vystaveny teplotám až 80 % teploty tavení, například na výrobu oběžných kol a lopatek plynových turbín. Spodní hranice využití těchto superslitin se pohybuje kolem 650 °C, ovšem vše je dáno ekonomickým aspektem, protože pod touto teplotou už se mohou použít levnější konstrukční materiály, jako například žáruvzdorné a žárupevné oceli. V leteckém průmyslu se používají zejména niklové superslitiny s označením Inconel, Hastelloy, apod, jedná se o precipitačně či karbidicky zpevněné slitiny. [33]

Kobalt je drahý, stříbrolesklý kov s namodralým nádechem. Existuje ve dvou alotropických modifikacích. Za normálních teplot je stabilní hexagonální modifikace α , ta se ovšem při teplotě 417 °C rekrystalizuje na modifikaci β , která má kubickou plošně středěnou mřížku. Vybrané vlastnosti kobaltu jsou v tab. 2.4. [21]

Tab. 2.4 Vybrané vlastnosti kobaltu [34].

Hustota	8,89 g·cm ⁻³
Relativní atomová hmotnost	58,9332
Teplota tavení	1495 °C
Teplota varu	2870 °C

Kobalt má dobrou odolnost vůči atmosférické korozi a vyšší tvrdost než nikl. Podobně jako nikl se kobalt používá zejména jako legující prvek, a to zejména do rychlořezných a nástrojových ocelí. Kobalt se dále využívá

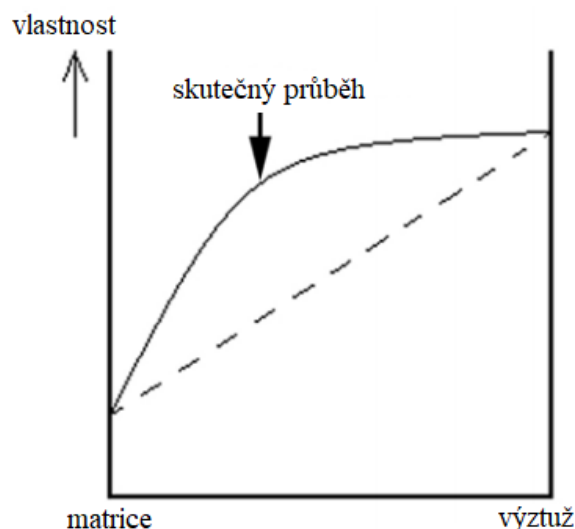
při galvanickém pokovování, na výrobu baterií a magnetů. Přibližně čtvrtina roční produkce pak připadá na výrobu superslitin. Kobaltové žárupevné slitiny se precipitačně nevytvřují a jejich základ tvoří kromě kobaltu také chrom, molybden a nikl. Kobaltové superslitiny se používají jako alternativa niklových superslitin. Využívají se zejména tam, kde niklové být použity nemohou, například v prostředích obsahujících síru nebo sodík, protože zde podléhají niklové superslitiny korozi. [21]

Žárupevné oceli

Hlavní požadavek na všechny žárupevné materiály je, aby se s narůstající teplotou nezhoršovaly jejich mechanické vlastnosti, z toho vyplývá, že tyto oceli jsou vhodné na součásti namáhané za vyšších teplot. Dále je po těchto ocelích požadována vysoká pevnost při tečení, vysoká mez kluzu, pevnost v tahu, odolnost proti křehkému porušení a odolnost proti korozi v prostředí spalin.

Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou nehomogenní anizotropní materiály, které se skládají ze dvou a více fází. Jednotlivé fáze se liší svými mechanickými, chemickými i fyzikálními vlastnostmi, které společně přispívají k dosažení finálních vlastností kompozitu. Fáze se v kompozitních materiálech dělí na spojitě, tzv. matrice a nespojitě dispergované v matrici, tzv. výztuže. Kompozity se běžně vyrábějí mísením nebo spojováním jednotlivých složek, což je oproti slitinám výrazný rozdíl, protože u nich vznikají jednotlivé fáze především fázovými přeměnami. [29] [35]



Obr. 2.2 Synergické chování složek kompozitu [29].

Kompozitní materiály se projevují synergickým chováním, což znamená, že finální vlastnosti kompozitu jsou lepší, než pouhé sečtení jednotlivých složek, jak je na obr. 2.2. Tento fakt je významný, protože vede k získávání materiálů, které mají nové vlastnosti. Jsou-li například vlákna kompozitního materiálu samostatně křehká, výsledný kompozit může vykazovat určitou míru houževnatosti, protože je lomová trhlinka bržděna rozhraním matrice a vláken. [29]

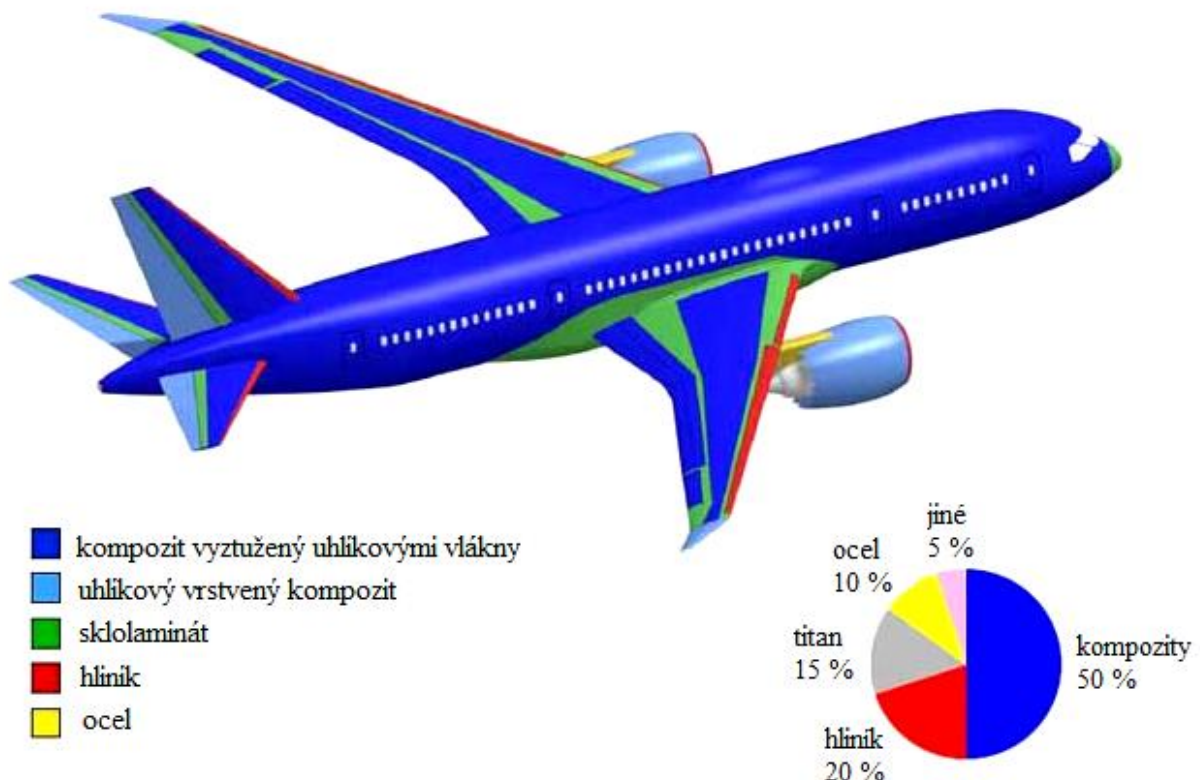
Dělení kompozitů podle tvaru výztuže [36]:

- částicové,
- vláknové (ty se dále dělí na kompozity s krátkými a dlouhými vlákny),
- sendvičové (vrstvené).

Dělení kompozitů podle typu matrice [36]:

- kompozity s kovovou matricí,
- kompozity s polymerní matricí,
- kompozity s keramickou matricí,
- kompozity se silikátovou matricí.

Hlavní přínos kompozitních materiálů spočívá v redukci hmotnosti, ovšem jejich využití je opodstatněné i z hlediska jejich vlastností, jedná se totiž o tvrdé a otěruvzdorné materiály. Obr. 2.3 znázorňuje procentuální využití kompozitních materiálů na civilním letadle Boeing 787. Boeing 787 je přibližně z 50 % své hmotnosti bez motorů vystavěn z kompozitních materiálů. [38] V Příloze 1 jsou použité materiály v Airbus A350. Ze vzájemného srovnání těchto dvou letadel vyplývá, že u Airbusu A350 jsou ještě více využívány kompozitní materiály než u Boeingu 787, a to přibližně o 3 %.



Obr. 2.3 Použité materiály v Boeing 787 [37].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ELEKTROEROZIVNÍ HLOUBENÍ LETECKÉ SLITINY INCO 713LC

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

Kapitola 3 se zabývá realizací experimentální části, která byla provedena ve společnosti PENTA Trading, spol. s.r.o. (dále jen PENTA). PENTA je česká firma založená v roce 1991 s dceřinou společností na Slovensku a se zákazníky téměř po celém světě. Je významným dodavatelem elektroerozivních obráběcích strojů, a to konkrétně drátových řezaček, CNC hloubiček, CNC vrtaček a obráběcích center. Poskytuje rovněž jejich servis a prodej veškerého spotřebního materiálu pro elektroerozivní stroje včetně kvalitních grafitových elektrod. Logo firmy PENTA je zobrazeno na obr. 3.1. Hlavní sídlo firmy se nachází v Říčanech u Prahy, v rámci České republiky má tato firma pobočky v Brně, Postřelmově, Žďáru nad Sázavou a Lounech. Na Slovensku je další pobočka v Popradě. Své stroje PENTA dodává do firem různých velikostí v Evropě, Asii, Severní i Jižní Americe a Austrálii. V současnosti má tato firma více než 50 zaměstnanců. [38]



Obr. 3.1 Logo firmy [38]

V nabídce elektroerozivních hloubiček má firma špičkové hloubičky EXERON a také vlastní hloubičky PENTA CNC, které jsou technicky na velmi dobré úrovni. Jde o české výrobky s německým řídicím systémem BECKHOFF, které dosahují úrovně nejlepších strojů ve své třídě. PENTA CNC představuje celou řadu elektroerozivních hloubiček. Do této řady patří i hloubička PENTA 433GS CNC, na které byly provedeny experimenty, a která bude podrobněji popsána v kapitole 3.2.2. [38]

3.2 Návrh experimentální práce

Během experimentálního elektroerozivního hloubení byl zkoumán vliv hloubicích parametrů na leteckou slitinu Inco 713LC. Při návrhu experimentu se postupovalo s ohledem na parametry elektroerozivního hloubení, které PENTA pro letecké materiály v současnosti používá. Parametry nastavení stroje pro výrobu experimentálních vzorků byly stanoveny dle doporučení vysoce kvalifikované obsluhy daného stroje v souladu s doporučenými parametry výrobce stroje. Proces elektroerozivního hloubení tedy simuloval podmínky a parametry tak, aby co nejvíce odpovídaly reálně používaným technologiím. Bylo provedeno 10 experimentů a každý se prováděl novou elektrodou. K hloubení byly použity grafitové elektrody s čelní plochou 10x10 mm. Pro zjednodušení experimentu bylo zvoleno hloubení do hloubky 0,5 mm, která už je dostatečná pro měření opotřebenosti elektrody a zároveň příznivá z hlediska časové náročnosti. Ze stejného důvodu nebylo využito planetování, hloubení probíhalo pouze v ose Z.

3.2.1 Základní materiál Inco 713LC

Experiment byl proveden na materiálu Inco 713LC. Tento materiál patří mezi niklové superslitiny, které již byly popsány v kapitole 2.1. Tento materiál se v praxi využívá pro výrobu rotorových kol turbín, které se nacházejí mimo jiné i v leteckých motorech. Slitina Inco 713LC (low carbon) je nízkouhlíkovou modifikací slitiny Inco 713C, její chemické složení je v tab. 3.1 a mechanické vlastnosti v tab. 3.2. Obsah uhlíku je u této slitiny snížen proto, aby teploty likvidu a solidu byly co nejvyšší a aby nedocházelo k tvorbě karbidů, které mohou tvořit na hranicích zrn spojitý film, kvůli kterému by došlo k výrazné degradaci creepových vlastností. Ke zlepšení vlastností hranic zrn je používán bór. Měrná hmotnost slitiny je $8010 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Tato slitina byla vyvinuta C. G. Bieberem v Bayonne Research Laboratory společnosti The International Nickel Company Inc. [39]

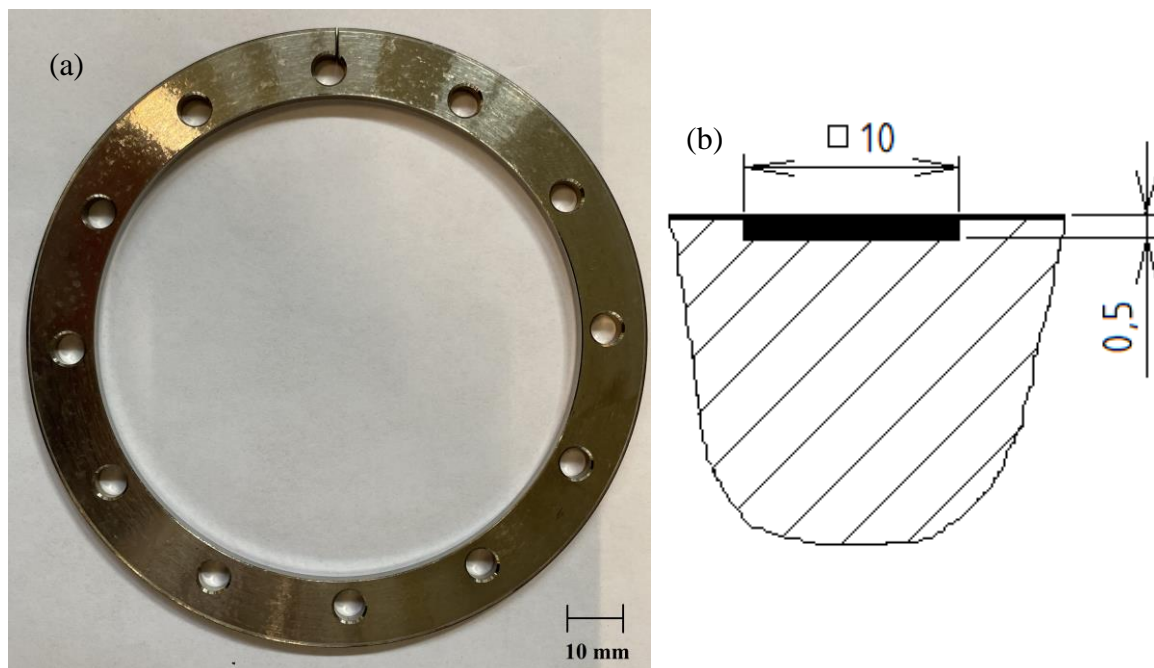
Tab. 3.1 Přípustné rozmezí chemického složení slitiny Inco 713LC (hm. %) [39].

Cr	Mo	C	Si	S	Zr	Nb+Ta	Al	B	Ti	Ni
11,00- 13,00	3,80- 5,20	0,04- 0,07	max. 0,05	max. 0,015	0,05- 0,15	1,50- 2,50	5,50- 6,50	0,005- 0,015	0,40- 1,00	základ

Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti slitiny Inco 713LC [39].

$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
750	895	15	10

Experiment byl proveden na výřezu prstence z turbíny pro letecký průmysl, která se nachází v leteckém motoru. Tento prstenec je na obr. 3.2 (a) a byl vyřezán z důvodu zjednodušení experimentu. Prstenec má rovinné plochy a snadno se upíná. Rozměry hloubeného tvaru jsou na obr. 3.2 (b), hloubení probíhalo s ohledem na časovou náročnost do hloubky 0,5 mm, tato hloubka je již také dostatečná pro měření opotřebení elektrod.



Obr. 3.2 (a) Vzhled materiálu pro experiment, (b) rozměry hloubeného tvaru.

3.2.2 Elektroerozivní hloubicí stroj, výběr elektrod a dielektrikum

Pro experiment byl použit stroj PENTA 433GS CNC (obr. 3.3) od firmy PENTA. Tyto stroje jsou vyrobeny z polymerbetonu, který má pozitivní vliv na celkovou tuhost, a tím i na přesnost obrábění. Součástí stroje je i LED osvětlení pracovního prostoru, protipožární systém, skříňka na nářadí, základní upínací sada, filtrační zařízení apod. Technická data a rozměry stroje se nachází v tab. 3.3. [40]

Stroj disponuje generátorem PGM2, který může generovat proudové stupně od 0,5 A do 300 A, je schopen utvářet podmínky pro širokou škálu hloubicích parametrů, což přispívá k dosažení vysokého úběru materiálu a nízkému opotřebení elektrod. Brání vzniku zápalu, čímž chrání i elektrodu. Jedná se o generátor s jednoduchou, avšak moderní konstrukcí - pouze jedna generátorová deska a jedna řídicí deska. [40] Technická data a vzájemné srovnání všech elektroerozivních hloubicích strojů PENTA CNC se nachází v Příloze 2.

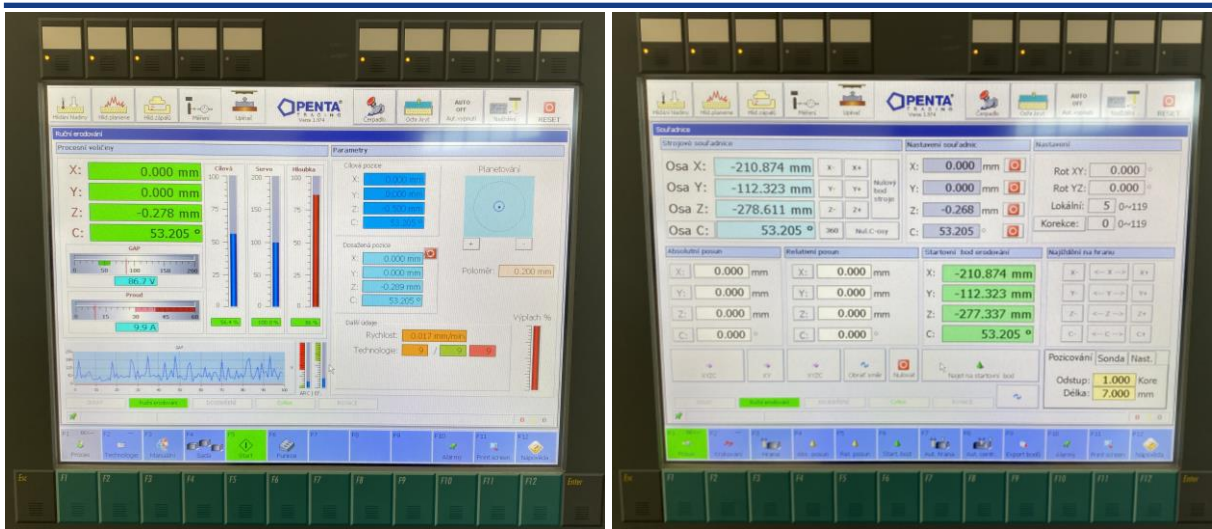


Obr. 3.3 Elektroerozivní hloubička PENTA 433GS CNC.

Tab. 3.3 Technická data hloubičky PENTA 433GS CNC [40].

Pojezdy X x Y x Z [mm]	400 x 300 x 300
Pracovní vana X x Y x Z [mm]	1000 x 550 x 320
Upínací stůl [mm]	700 x 350
Odstup stůl - pinola (min. - max.) [mm]	130 - 430
Maximální hmotnost obrobku [kg]	700
Maximální hmotnost elektrody na pinole [kg]	100
Rozměry stroje (X x Y x Z) [mm]	2050 x 1760 x 2380
Hmotnost stroje [kg]	2210
Náplň dielektrika [l]	300

Součástí stroje je i patnáctipalcová LCD dotyková obrazovka (obr. 3.4), která slouží ke kompletnímu ovládní hloubičky, mezi které patří například hlídání hladiny dielektrika, nastavení parametrů obráběcího procesu a sledování jeho průběhu.



Obr. 3.4 Ovládací panel stroje.

K elektroerozivnímu hloubení byly zvoleny grafitové elektrody s čelní plochou 10x10 mm, jedna z elektrod je znázorněna na obr. 3.5. Vyhluběný tvar byl tedy čtverec s délkou strany 10 mm (obr. 3.2 (b) z kapitoly 3.2.1).



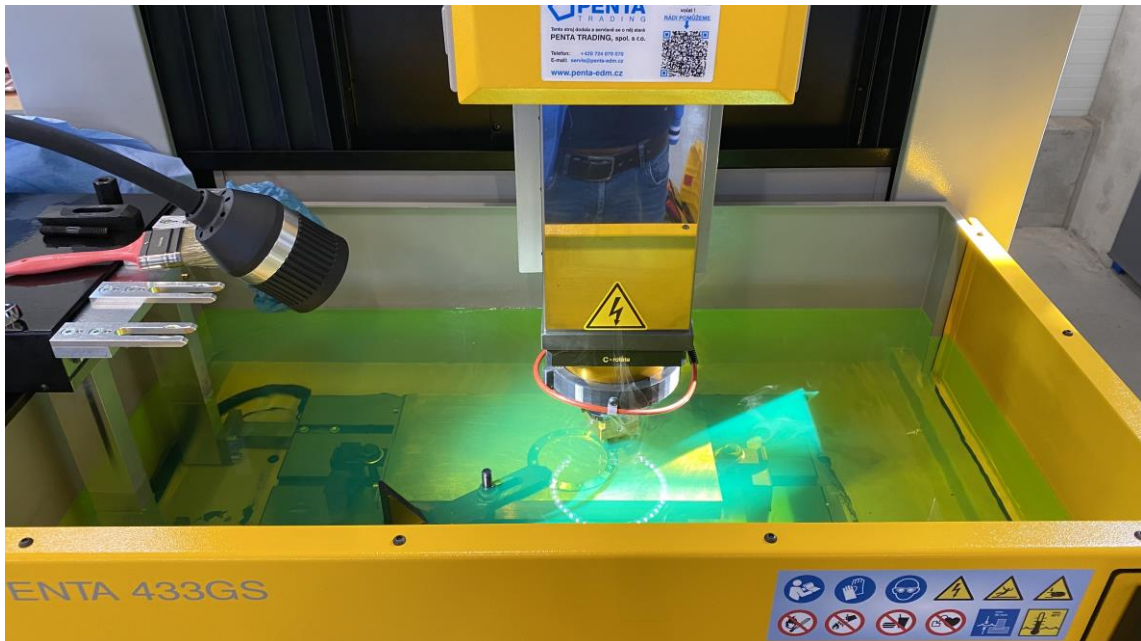
Obr. 3.5 Použitá grafitová elektroda.

Pro experiment bylo využito dielektrikum IonoPlus IME-MH. Toto dielektrikum je vhodné pro hrubování, dokončování i leštění. Díky nízkému obsahu aromátů nezapáchá a zlepšuje hygienu na pracovišti. Nedráždí pokožku a nevyvolává alergické reakce. V neposlední řadě vykazuje dlouhou životnost bez známek degradace a změn vlastností (min. 5 let). Další vybrané vlastnosti jsou v tab. 3.4.

Tab. 3.4 Technická data dielektrika IonoPlus IME-MH [41].

Technická data		Stanoveno dle normy
Hustota při 15 °C	0,79 g·cm ⁻³	DIN 51757
Kinematická viskozita při 40 °C	2,5 mm ² ·s ⁻¹	DIN 51562
Teplota tuhnutí	-15 °C	DIN ISO 3016
Zápalná teplota	nad 220 °C	DIN EN 22719
Bod vzplanutí	107 °C	DIN EN 22719
Obsah aromatických uhlovodíků max.	0,01 %	DIN 51378

Dielektrikum IonoPlus IME-MH je kapalina žluto-zelené barvy, jak lze vidět na obr. 3.6. Pro správný průběh elektroeroze by měla hladina dielektrika být cca 3 až 5 centimetrů nad povrchem obráběného materiálu.



Obr. 3.6 Pracovní vana s dielektrikem.

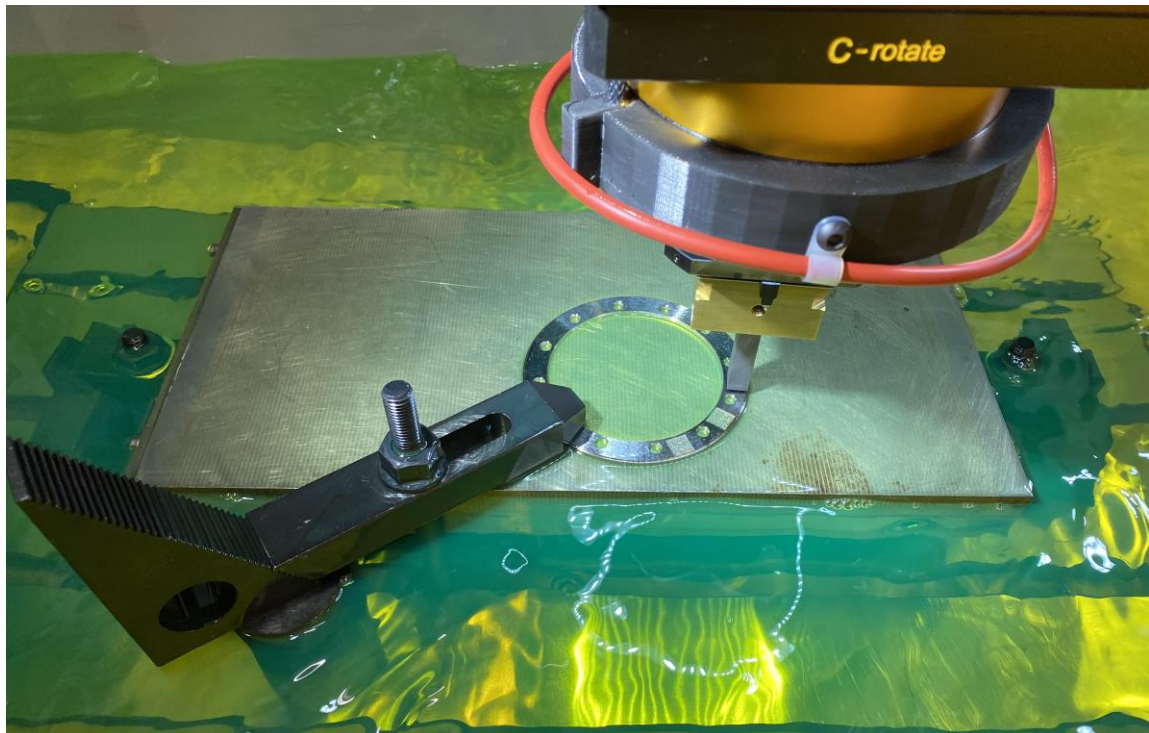
3.2.3 Výběr hloubicích parametrů

Mezi parametry, které nejvíce ovlivňují hloubicí proces, patří proud, doba trvání jednoho pulzu a zapalovací napětí. Proud je jedním ze základních parametrů, který určuje množství energie v jiskře. Doba trvání jednoho pulzu (T_{on}) je doba, po kterou je zapnutý pulz a protéká proud v jedné jiskře. Zapalovací napětí slouží k zapálení jiskry z větší vzdálenosti, aby byl dodržen dostatečný odstup mezi elektrodou a obrobkem. Parametry, které nemají výrazný vliv na průběh elektroeroze, a proto zůstaly pro všechny experimenty konstantní, jsou:

- doba prodlevy mezi jednotlivými pulzy (T_{off}), pro všech 10 experimentů bylo nastaveno $T_{off}=20 \mu s$,
- přídatná jednotka generátoru pro obrábění těžce obrobitelných materiálů (C_{box}),
- nastavení napětí v jiskrové mezeře (GAP),
- rychlost reakce,
- rychlost zdvihu,
- velikost zdvihu,
- ochrana,
- speciální výplach.

3.3 Realizace experimentální práce

Na niklové superslitině Inco 713LC bylo vyhloubeno 10 dutin do hloubky 0,5 mm. Hloubení všech dutin probíhalo pouze v ose Z (ve svislém směru). Základní materiál ve tvaru prstence byl pomocí upínek upnut na základní desku v pracovní vaně (obr. 3.7). Výška dielektrika byla nastavena optimálně dle doporučení výrobce stroje. Hloubení bylo provedeno grafitovými elektrodami.



Obr. 3.7 Způsob upnutí obráběného materiálu.

Tab. 3.5 obsahuje parametry, které nejvíce ovlivňují proces hloubení a hodnoty, které byly použity při jednotlivých experimentech. Proud byl postupně snižován tak, aby bylo dosaženo přijatelné kvality povrchu s ohledem na časovou náročnost erodování.

Tab. 3.5 Základní hloubicí parametry.

	Proud [A]	Doba trvání jednoho pulzu [μs]	Zapalovací napětí [V]
Vzorek 1	34,54	450	160
Vzorek 2	34,54	10	220
Vzorek 3	20,22	450	220
Vzorek 4	20,22	10	220
Vzorek 5	10,70	90	160
Vzorek 6	10,70	90	220
Vzorek 7	5,94	90	220
Vzorek 8	5,94	10	160
Vzorek 9	3,80	90	220
Vzorek 10	5,94	5	280

S výjimkou experimentu č. 10 byly pro všechny experimenty použity pouze 3 úrovně doby trvání jednoho pulzu, a to 450, 90 a 10 μ s. Rovněž u zapalovacího napětí byly kromě vzorku č. 10 použity hodnoty pouze 160 a 220 V. Průběh elektroerozivního hloubení je zobrazen na obr. 3.8.



Obr. 3.8 Průběh hloubicího procesu.

Jak lze vidět na obr. 3.9, rozdíl kvality jednotlivých povrchů je na první pohled patrný.



Obr. 3.9 Výsledné vyhloubené dutiny po hloubení grafitovou elektrodou.

3.4 Výsledky experimentální práce

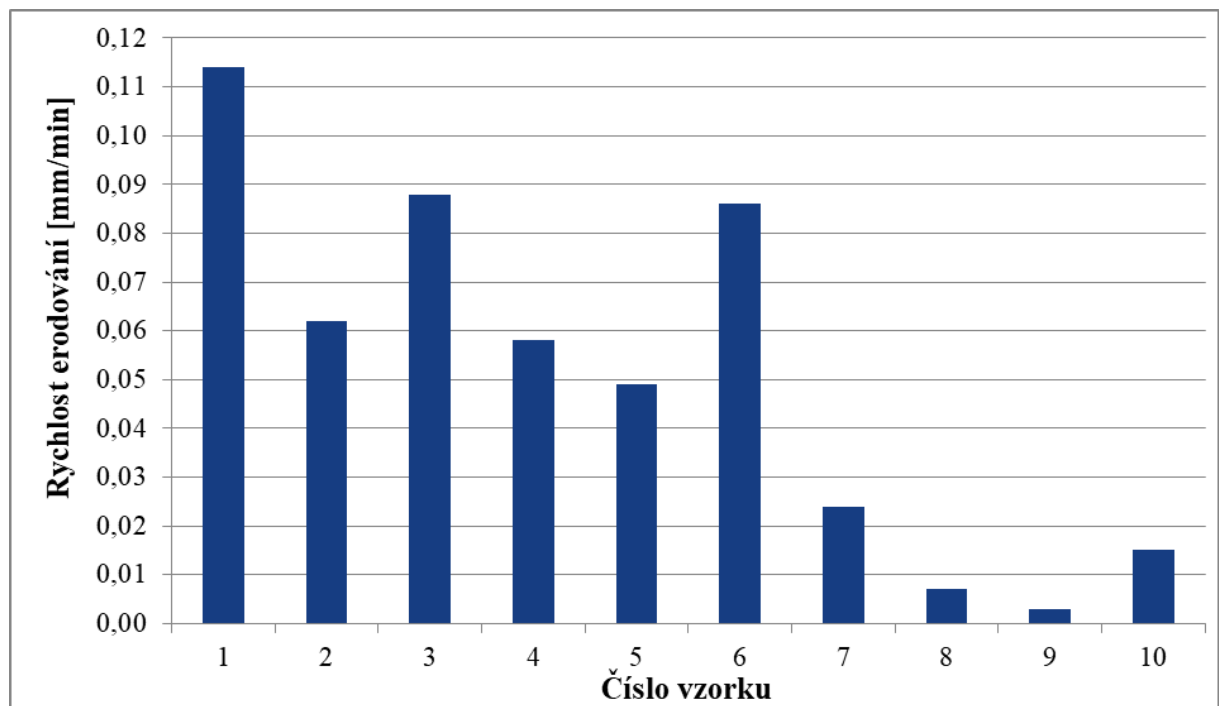
Po experimentálním elektroerozivním hloubení následovala příprava vzorků na vyhodnocení kvality a morfologie povrchu. U grafitových elektrod bylo zkoumáno opotřebení povrchu a rohů. Z materiálu ve tvaru prstence, na kterém se prováděly experimenty, byly vyřezány vzorky pomocí elektroerozivního řezání drátem. Finální vzorky byly poté zality do kotoučů z pryskyřice a vybroušeny. Průběh a výsledky vyhodnocení kvality povrchu, morfologie povrchu a opotřebení elektrod jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

Čas erodování jednotlivých experimentů je znázorněn v tab. 3.6. Jednotlivé časy se od sebe výrazně liší, zatímco první experiment trval 4 minuty a 23 vteřin, tak devátý experiment trval 2 hodiny, 47 minut a 26 vteřin.

Tab. 3.6 Čas erodování.

Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Čas erodování [min]	4:23	8:03	5:41	8:36	10:11	5:49	21:06	76:27	167:26	33:10

Z času erodování a hloubky erodování (u všech experimentů 0,5 mm) lze vypočítat rychlost erodování. Rychlost erodování byla nanesena do grafu na obr. 3.10. Rychlost erodování je nepřímo úměrná času erodování, tzn. čím vyšší je čas erodování, tím nižší je rychlost erodování.



Obr. 3.10 Rychlost erodování.

3.4.1 Topografie povrchu vzorků

Topografie povrchu byla studována pomocí kontaktního 3D profilometru Dektak XT od výrobce Bruker (obr. 3.11) a naměřená data byla následně zpracována v softwaru Vision 64.



Obr. 3.11 Profilometr Dektak XT [42].

Tab. 3.7 znázorňuje topografii povrchu vzorků, kde Ra, Rq, Rz jsou parametry profilové a Sa, Sq, Sz jsou parametry plošné. Jedná se o 6 základních parametrů:

- Ra [μm] - Průměrná aritmetická úchylka profilu
- Rq [μm] - Průměrná kvadratická úchylka profilu
- Rz [μm] - Největší výška profilu
- Sa [μm] - Průměrná aritmetická výška
- Sq [μm] - Průměrná kvadratická výška
- Sz [μm] - Maximální výška

Z tab. 3.7 je patrné, že nejnižší hodnoty Ra se podařilo dosáhnout na vzorku č. 10 ($I=5,94\text{ A}$, $T_{\text{on}}=5\ \mu\text{s}$, $U=280\text{ V}$), a to $2,128\ \mu\text{m}$. Naproti tomu u vzorku č. 1 ($I=34,54\text{ A}$, $T_{\text{on}}=450\ \mu\text{s}$, $U=160\text{ V}$) byla naměřena hodnota $Ra=18,596\ \mu\text{m}$. Dosažené hodnoty kvality povrchu jsou velmi rozmanité a je patrné, že významný vliv na kvalitu povrchu má zejména doba trvání jednoho pulzu.

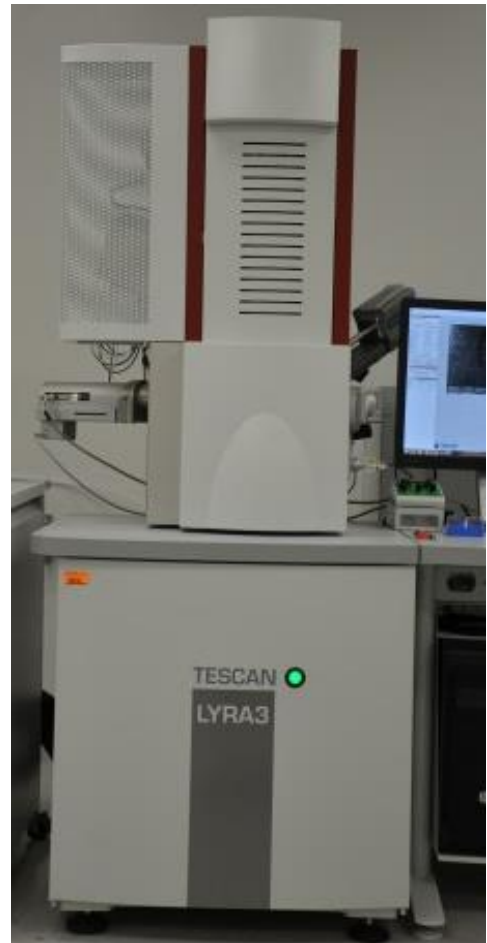
Tab. 3.7 Topografie povrchu vzorků.

	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	Sa [μm]	Sq [μm]	Sz [μm]
Vzorek 1	18,60	22,36	110,94	18,21	22,05	106,82
Vzorek 2	9,82	12,90	90,60	4,99	6,84	64,38
Vzorek 3	15,44	18,48	80,25	15,28	18,35	84,21
Vzorek 4	3,46	4,42	27,40	3,24	4,16	28,34
Vzorek 5	6,34	7,85	41,51	6,32	7,76	40,99
Vzorek 6	6,91	8,56	50,69	6,60	8,31	56,81
Vzorek 7	4,57	5,89	37,75	4,27	5,56	41,12
Vzorek 8	2,56	3,24	20,20	2,40	3,06	19,35
Vzorek 9	3,60	4,59	29,72	3,49	4,47	30,47
Vzorek 10	2,13	2,63	15,90	2,04	2,54	16,39

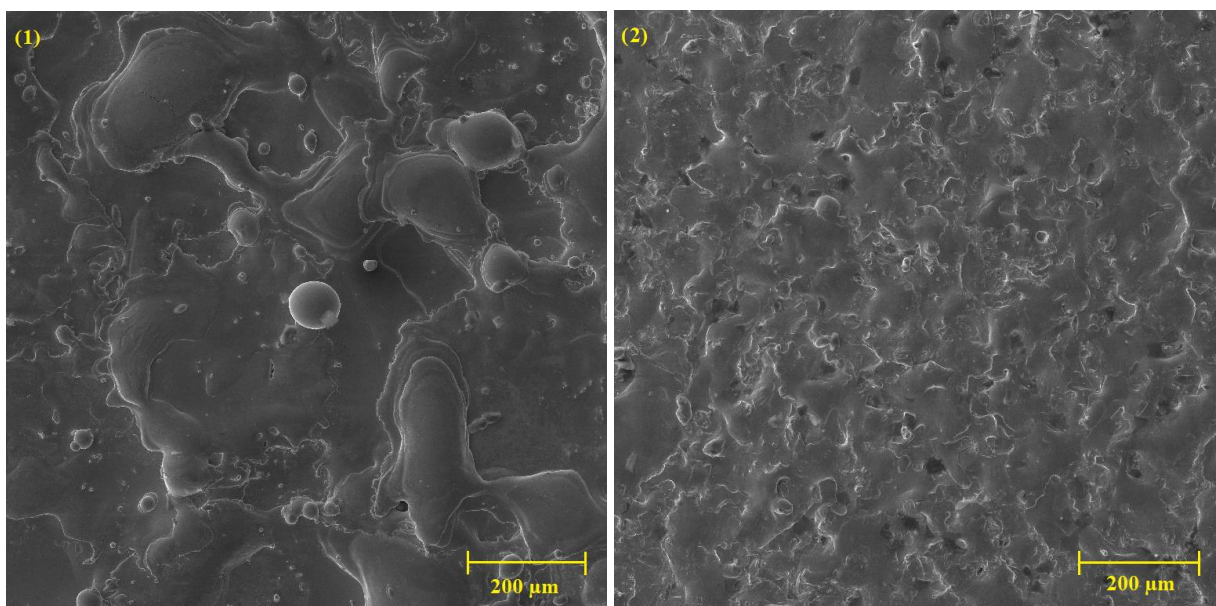
3.4.2 Morfologie povrchu vzorků

Všechny experimentálně vyrobené vzorky byly očištěny v ultrazvukové čističce a analyzovány užitím elektronového rastrovacího mikroskopu (SEM) LYRA3 od firmy Tescan (obr. 3.12). Toto zařízení bylo vybaveno energiově-disperzním detektorem rentgenového záření, což umožnilo studium změny chemického složení povrchu po experimentálním elektroerozivním hloubení. U tohoto typu mikroskopu je obraz tvořen detekcí sekundárních a zpětně rozptýlených elektronů emitovaných z místa dopadu svazku částic.

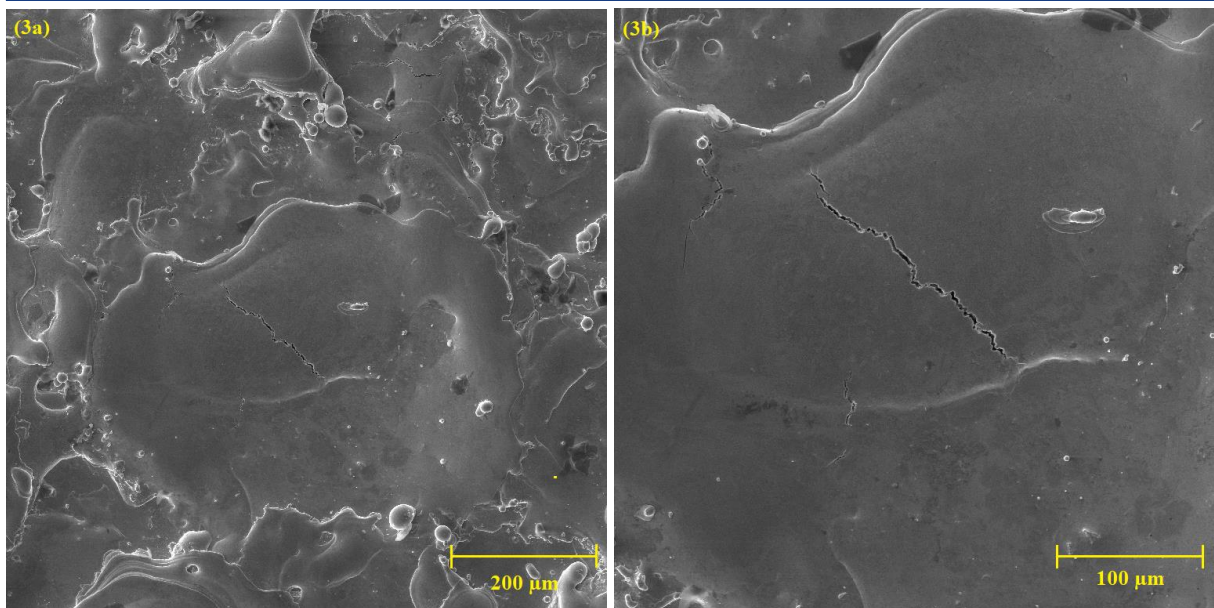
Vlivem účinků jednotlivých elektrických výbojů vznikají na elektroerozivně obrobeném povrchu i na nástrojové elektrodě krátery, což je patrné na obr. 3.13. Na obr. 3.13 lze okem vidět, že vzorek 1 má na povrchu větší krátery a větší nerovnosti, což je způsobeno zejména vyšší hodnotou doby trvání jednoho pulzu T_{on} .



Obr. 3.12 Elektronový rastrovací mikroskop LYRA3 [43].

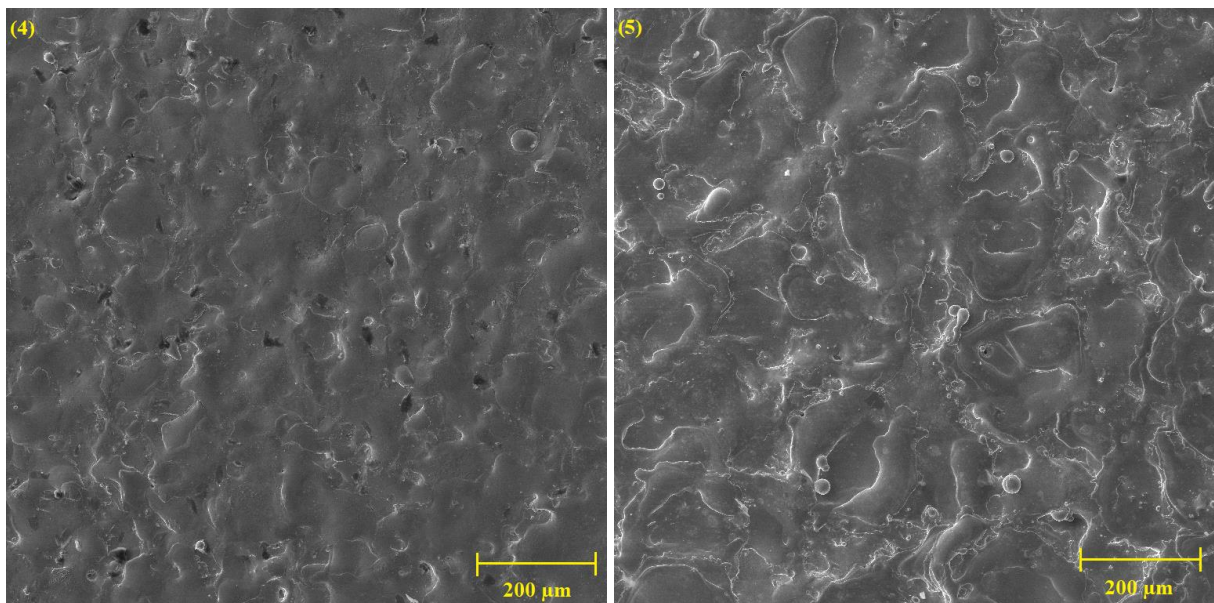


Obr. 3.13 Snímky povrchu vzorků (1) vzorek 1 při zvětšení 200x, (2) vzorek 2 při zvětšení 200x.



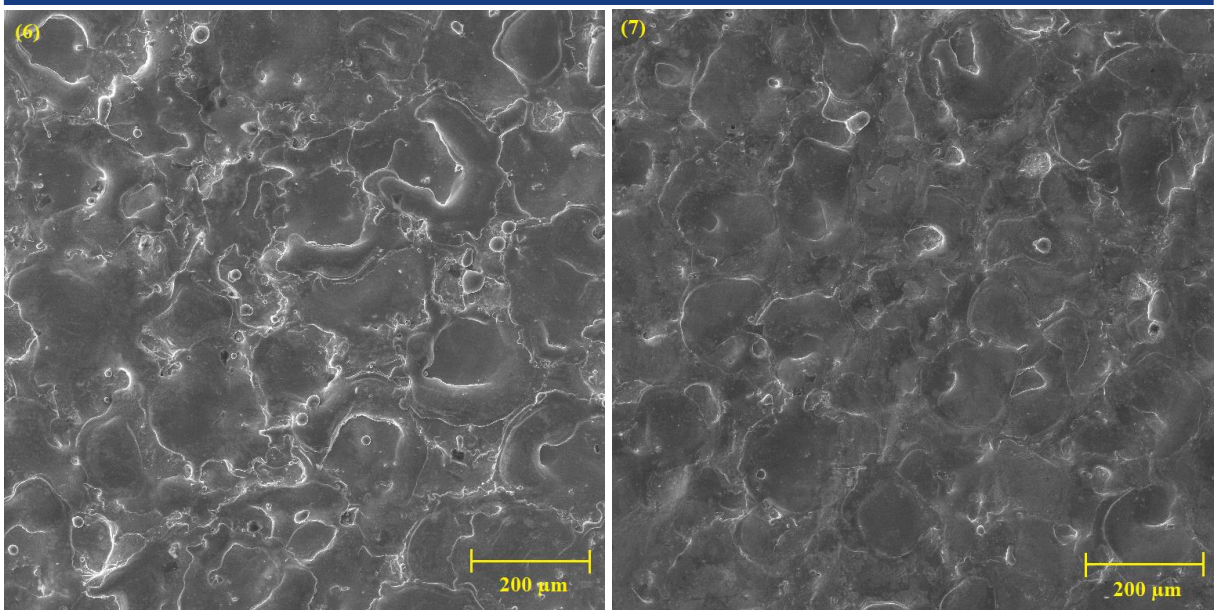
Obr. 3.14 Snímky povrchu vzorků (3a) vzorek 3 při zvětšení 200x, (3b) vzorek 3 při zvětšení 500x.

Obr. 3.14 znázorňuje povrch vzorku číslo 3 po elektroerozivním hloubení při 200x zvětšení (obrázek vlevo) a při 500x zvětšení (obrázek vpravo). Na tomto obrázku jsou patrné defekty, z nichž jedna trhlinka je dlouhá 150-200 μm , nelze s určitostí říci, čím je tato trhlinka v materiálu způsobena a zda je výskyt těchto defektů záležitostí pouze jednoho druhu erodovacího materiálu elektrod, nicméně je pravděpodobné, že jsou tyto defekty v materiálu způsobené vysokými hodnotami hloubících parametrů ($I=20,22$ A, $T_{\text{on}}=450$ μs , $U=220$ V).



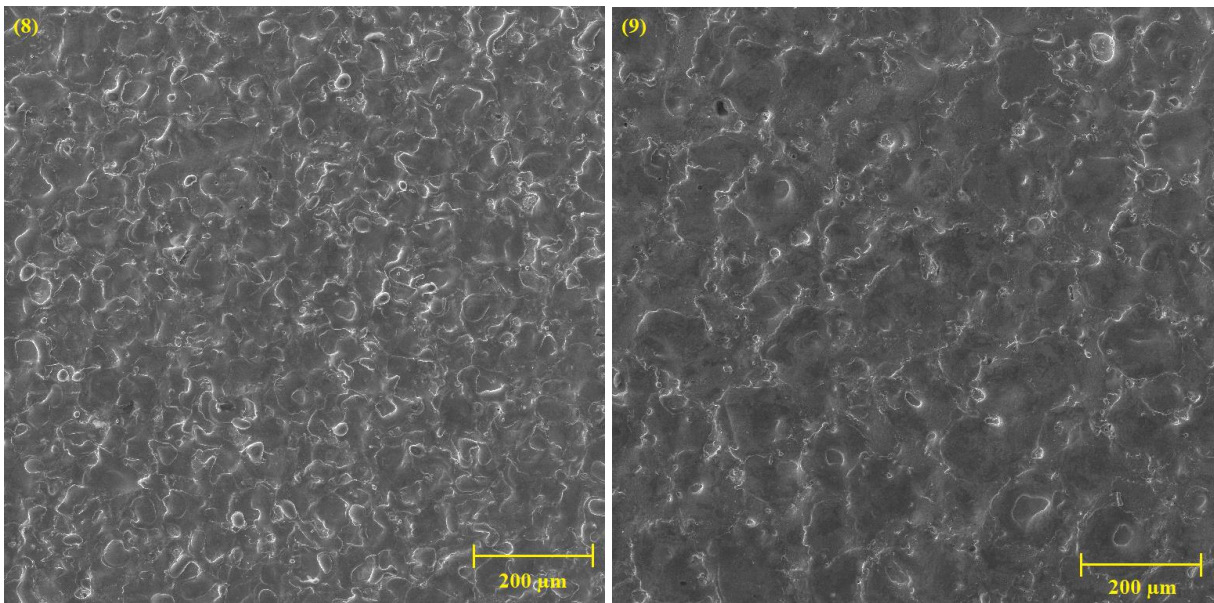
Obr. 3.15 Snímky povrchu vzorků (4) vzorek 4 při zvětšení 200x, (5) vzorek 5 při zvětšení 200x.

Na obr. 3.15 jsou znázorněny snímky povrchu vzorků 4 (obrázek vlevo) a 5 (obrázek vpravo), i zde je patrný rozdíl v kvalitě povrchu. Vzorek 4 má lepší kvalitu povrchu, přičemž při jeho hloubení byl použit vyšší proud i zapalovací napětí ($I=20,22$ A, $T_{\text{on}}=10$ μs , $U=220$ V), oproti vzorku 5 ($I=10,70$ A, $T_{\text{on}}=90$ μs , $U=160$ V). Z toho vyplývá, že doba trvání jednoho pulzu, má velice významný vliv na výslednou kvalitu povrchu.



Obr. 3.16 Snímky povrchu vzorků (6) vzorek 6 při zvětšení 200x, (7) vzorek 7 při zvětšení 200x.

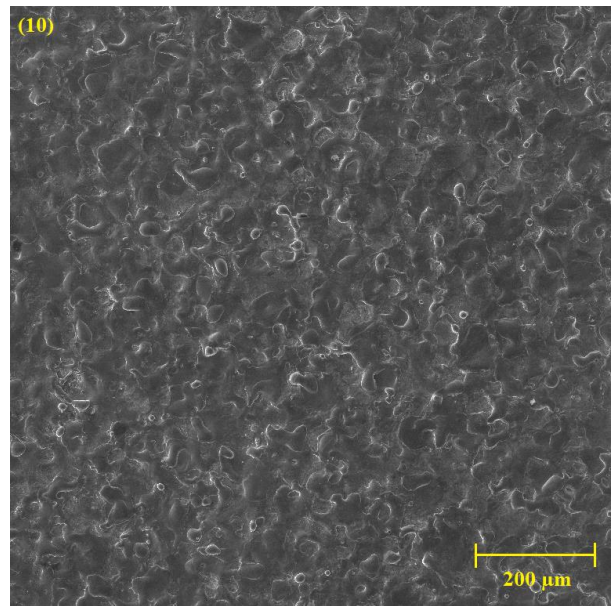
Na obr. 3.16 se nachází snímky povrchu vzorků 6 (obrázek vlevo) a 7 (obrázek vpravo). Povrch vzorku 7 má lepší kvalitu povrchu, nicméně časová náročnost hloubení vzorku 6 je téměř čtyřikrát nižší než hloubení vzorku 7. Z tohoto hlediska lze parametry hloubení pro vzorek 6 ($I=10,70$ A, $T_{on}=90$ μ s, $U=220$ V) považovat za velice příznivé.



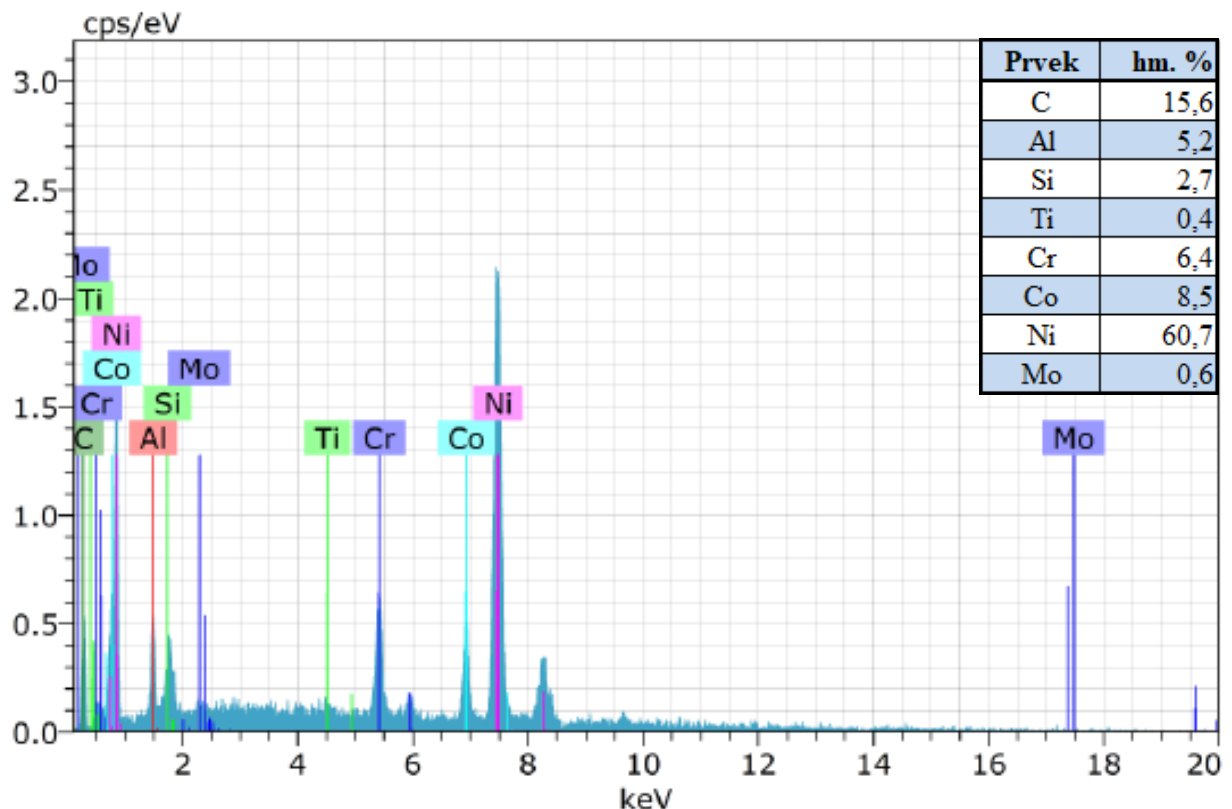
Obr. 3.17 Snímky povrchu vzorků (8) vzorek 8 při zvětšení 200x, (9) vzorek 9 při zvětšení 200x.

Hloubení povrchu vzorků 8 a 9 (obr. 3.17, vlevo vzorek 8 a vpravo vzorek 9) dosahovalo nejvyšší časové náročnosti. U vzorku 9 byl čas erodování více než dvakrát vyšší než u hloubení vzorku 8, ale přitom měl vzorek 9 horší kvalitu povrchu, z tohoto hlediska se snižování proudu pod hodnotu 5-6 A jeví, jako velmi nevhodné a nevhodné.

Obr. 3.18 znázorňuje povrch vzorku 10 po elektroerozivním hloubení, tento vzorek dosáhl největší kvality povrchu ($R_a=2,128 \mu\text{m}$). Zde se opět projevuje významný vliv doby trvání jednoho pulzu na výsledný povrch obrobeneé plochy ($I=5,94 \text{ A}$, $T_{\text{on}}=5 \mu\text{s}$, $U=280 \text{ V}$).



Obr. 3.18 Snímek povrchu vzorku 10 při zvětšení 200x.

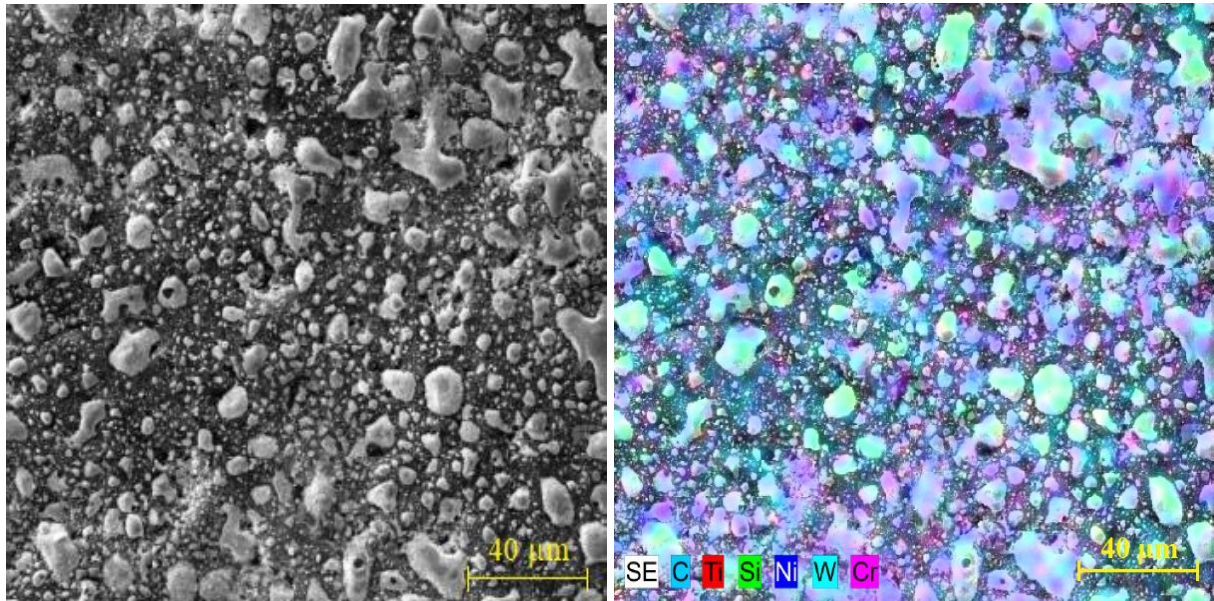


Obr. 3.19 Chemické složení povrchu vzorku po elektroerozivním hloubení.

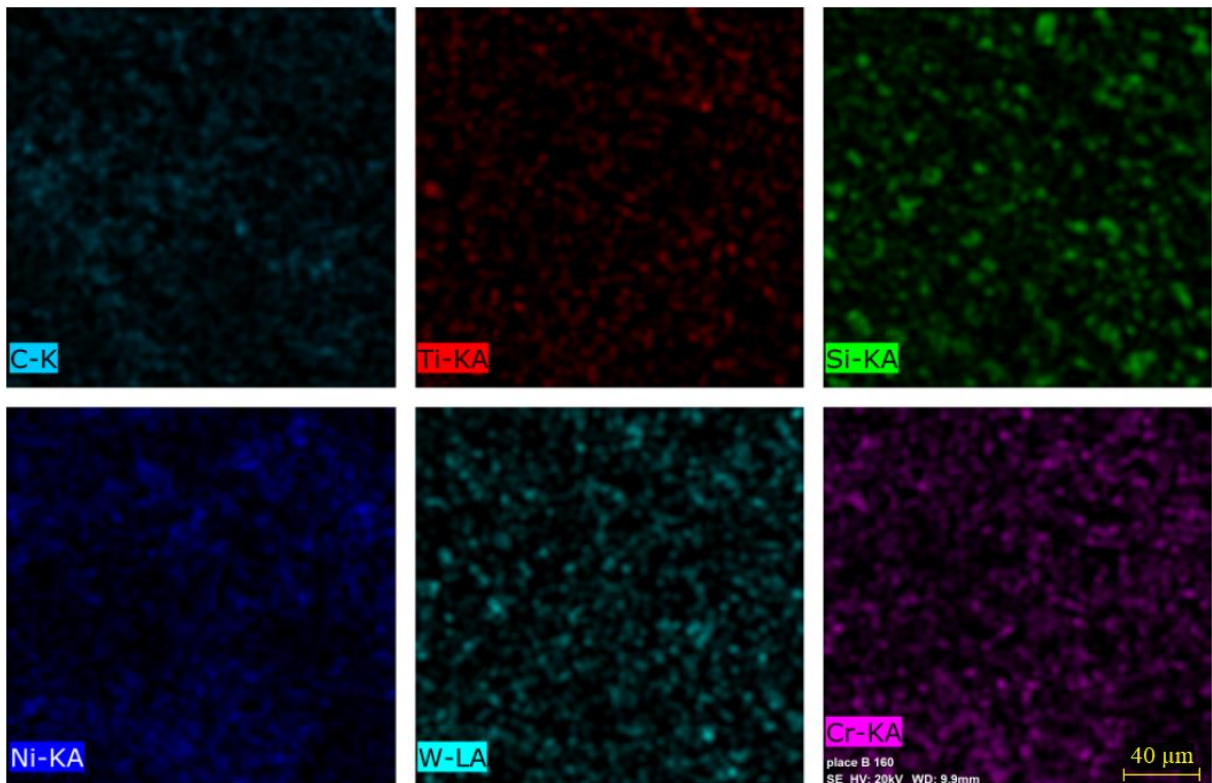
Elektronový rastrovací mikroskop byl vybaven energiově-disperzním detektorem rentgenového záření, díky kterému bylo patrné chemické složení povrchu vzorku po elektroerozivním hloubení (obr. 3.19). Z analýzy chemického složení povrchu jednoho ze vzorků je patrný po obrábění vysoký podíl uhlíku (15,6 hm %), což je způsobeno ulpíváním uhlíku z grafitové elektrody na povrchu vzorku. Jak již bylo zmíněno, Inco 713LC je niklová superslitina, proto její základ tvoří nikl. Jak plyne z obr. 3.19, na povrchu vzorku bylo detekováno 60,7 hm. % niklu. Další prvky, které se v tomto materiálu nachází, jsou hliník, křemík, titan, chrom, kobalt a molybden.

3.4.3 Morfologie povrchu elektrod

Opotřebení elektrod bylo zkoumáno, stejně jako povrch vzorků v kapitole 3.4.2, elektronovým rastrovacím mikroskopem (SEM) LYRA3 od firmy Tescan (kapitola 3.4.2). Na povrchu grafitových elektrod ulpívá velké množství oderodovaného materiálu z obrobku, což je patrné z analýzy chemického složení (obr. 3.20 vpravo). Částice a vzniklé krátery na povrchu elektrody po elektroerozivním hloubení dosahují rozměrů až 30x30 μm a jsou patrné na obr. 3.20 vlevo. Obr. 3.21 znázorňuje prvkovou mapu povrchu jedné z elektrod po elektroerozivním hloubení, na tomto obrázku je rovněž patrná přítomnost zejména niklu a chromu.

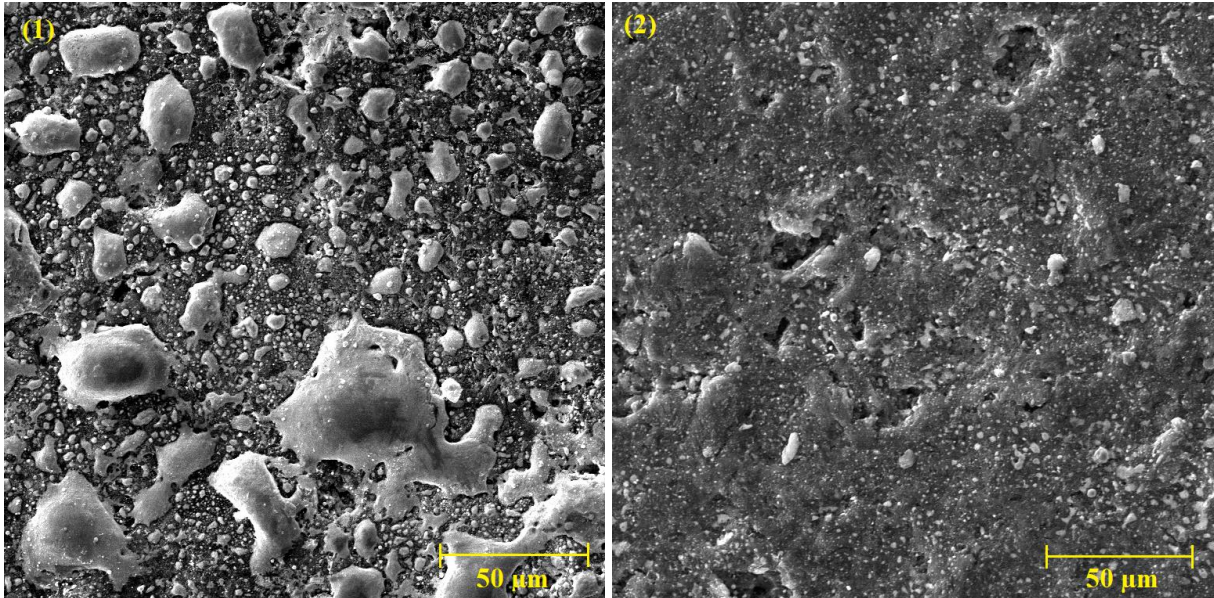


Obr. 3.20 Snímek povrchu elektrody včetně analýzy chemického složení.



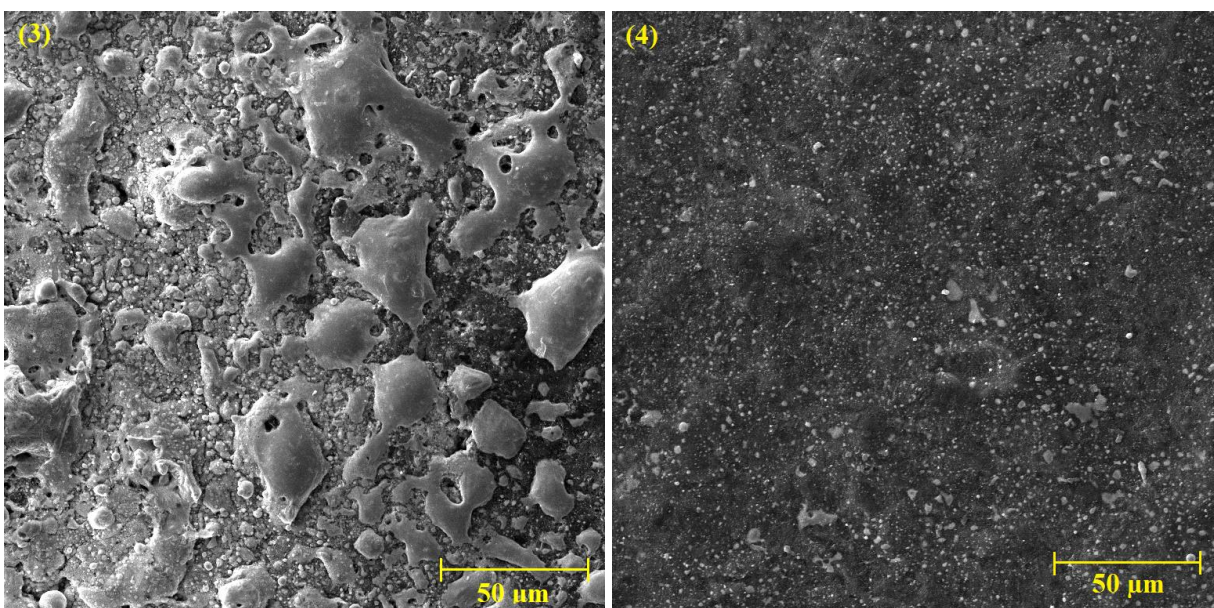
Obr. 3.21 Prvková mapa povrchu elektrody po elektroerozivním hloubení.

Některé elektrody byly procesem hloubení poškozeny více, jak je patrné z obr. 3.22 (vlevo elektroda 1, vpravo elektroda 2). Na elektrodě 1 i 2 jsou patrné díry, kde chyběl materiál. Na elektrodě 1 lze vidět velké množství oderodovaného materiálu z obrobku, oproti tomu na elektrodě 2 jsou patrné trhliny, u kterých nelze s jistotou říct, čím jsou na elektrodě způsobeny.



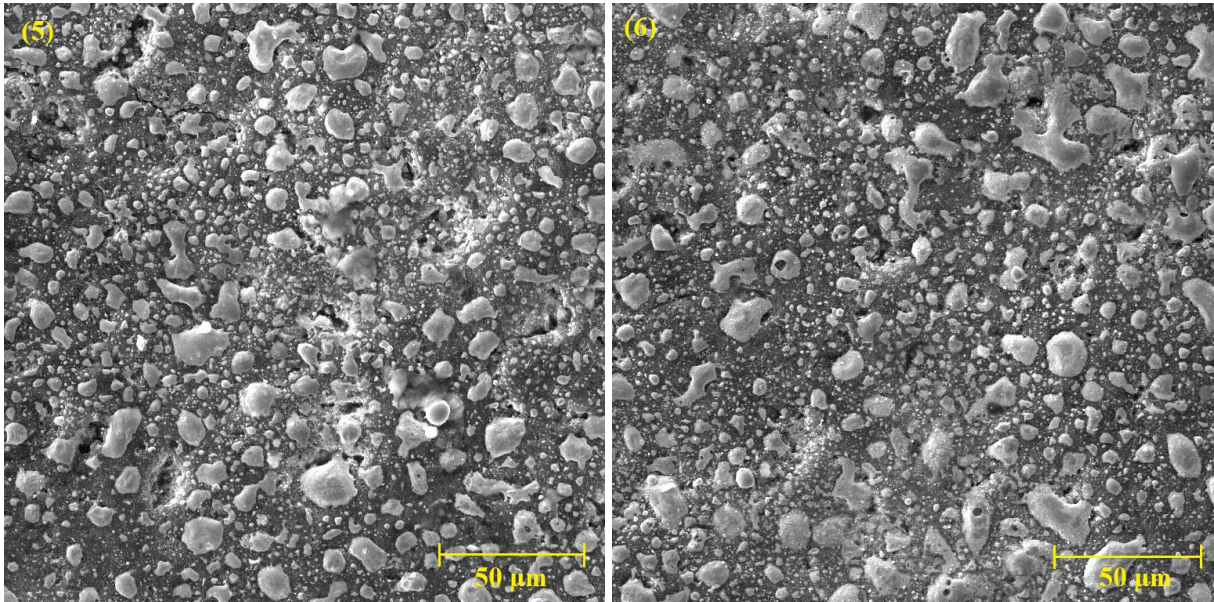
Obr. 3.22 Snímky povrchu elektrod (1) elektroda 1 při zvětšení 1000x, (2) elektroda 2 při zvětšení 1000x.

Obr. 3.23 znázorňuje povrchy elektrod 3 (vlevo) a 4 (vpravo). Na povrchu elektrody 3 jde vidět velké množství oderodovaného materiálu z obrobku, podobně jako na elektrodě 1 (obr. 3.22 vlevo). Je tedy velmi pravděpodobné, že je množství oderodovaného materiálu na elektrodě způsobeno vysokou hodnotou doby trvání jednoho pulzu ($T_{on}=450 \mu s$) a rovněž může mít vliv na horší kvalitu povrchu, kterou mají oba vzorky. Elektroda 4 nevykazuje velké množství děr, trhlin či oderodovaného materiálu.



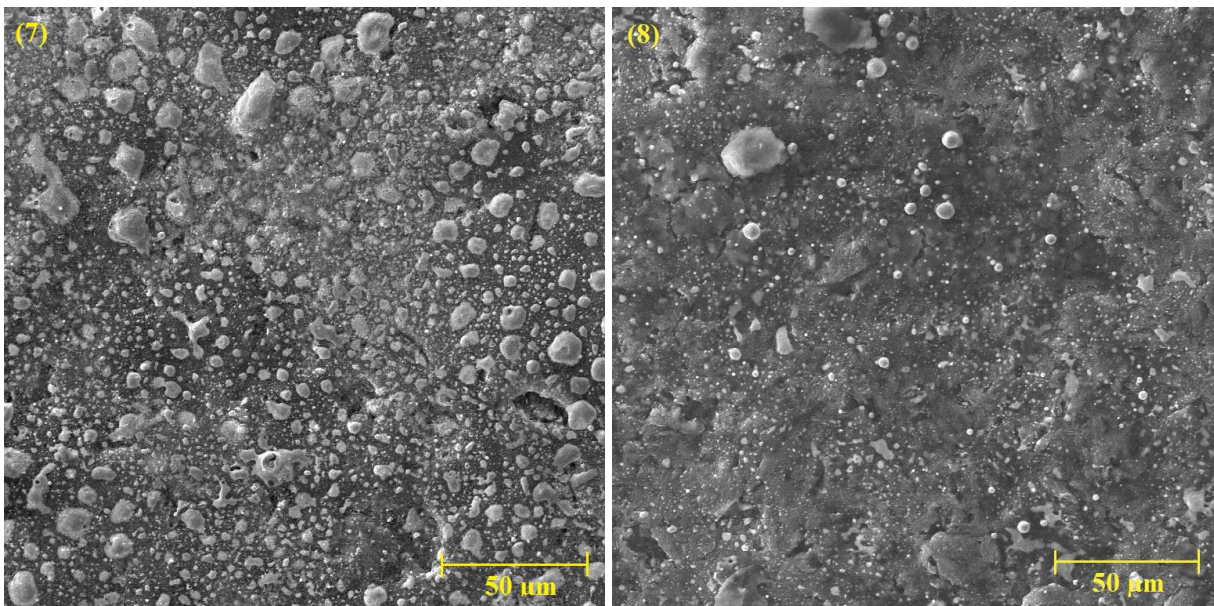
Obr. 3.23 Snímky povrchu elektrod (3) elektroda 3 při zvětšení 1000x, (4) elektroda 4 při zvětšení 1000x.

Povrch elektrod 5 (obr. 3.24 vlevo) a 6 (obr. 3.24 vpravo) vypadá na první pohled podobně, při pozornějším hledání je patrné, že oderodovaný materiál z obrobku dosahuje u elektrody 6 trochu větších rozměrů, a to až $30 \times 30 \mu\text{m}$. U experimentu 5 a 6 bylo dosaženo podobných výsledků - tedy podobný povrch elektrod, podobný povrch vzorků i dosažená kvalita povrchu byla u těchto vzorků podobná.



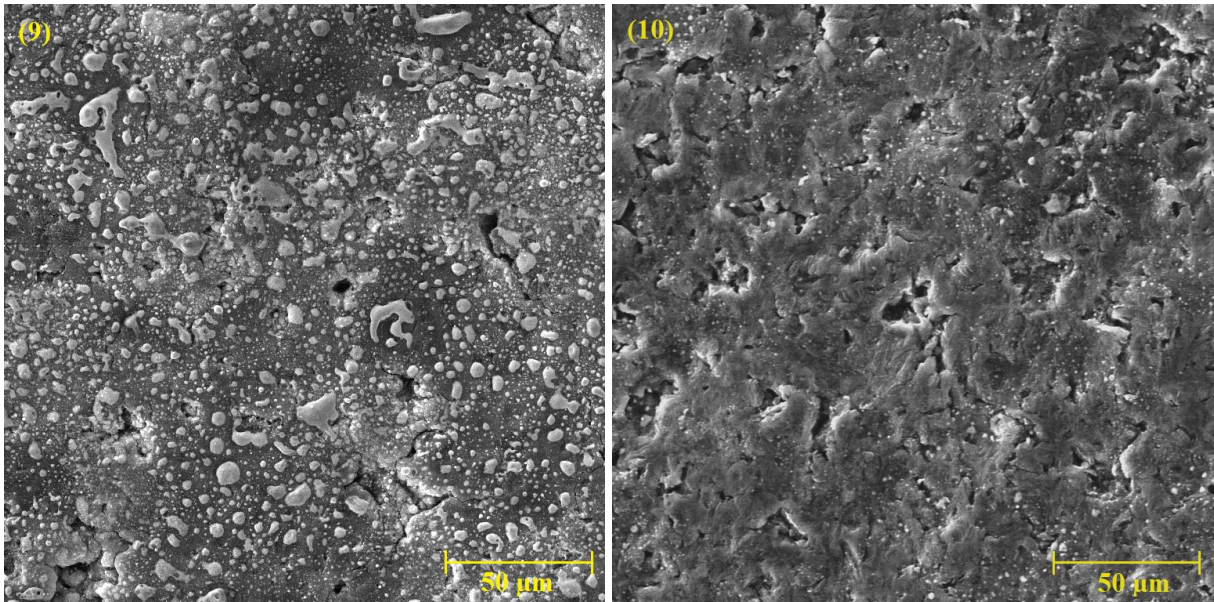
Obr. 3.24 Snímky povrchu elektrod (5) elektroda 5 při zvětšení 1000x, (6) elektroda 6 při zvětšení 1000x.

Na obr. 3.25 je znázorněn povrch elektrod 7 (obrázek vlevo) a 8 (obrázek vpravo), z obrázku vyplývá, že elektroda 7 má na povrchu víc oderodovaného materiálu, který ovšem zpravidla nedosahuje větších rozměrů než $20 \times 20 \mu\text{m}$. Na povrchu elektrody 8 jsou viditelné díry a trhlinky, které dosahují délky $20 \mu\text{m}$.



Obr. 3.25 Snímky povrchu elektrod (7) elektroda 7 při zvětšení 1000x, (8) elektroda 8 při zvětšení 1000x.

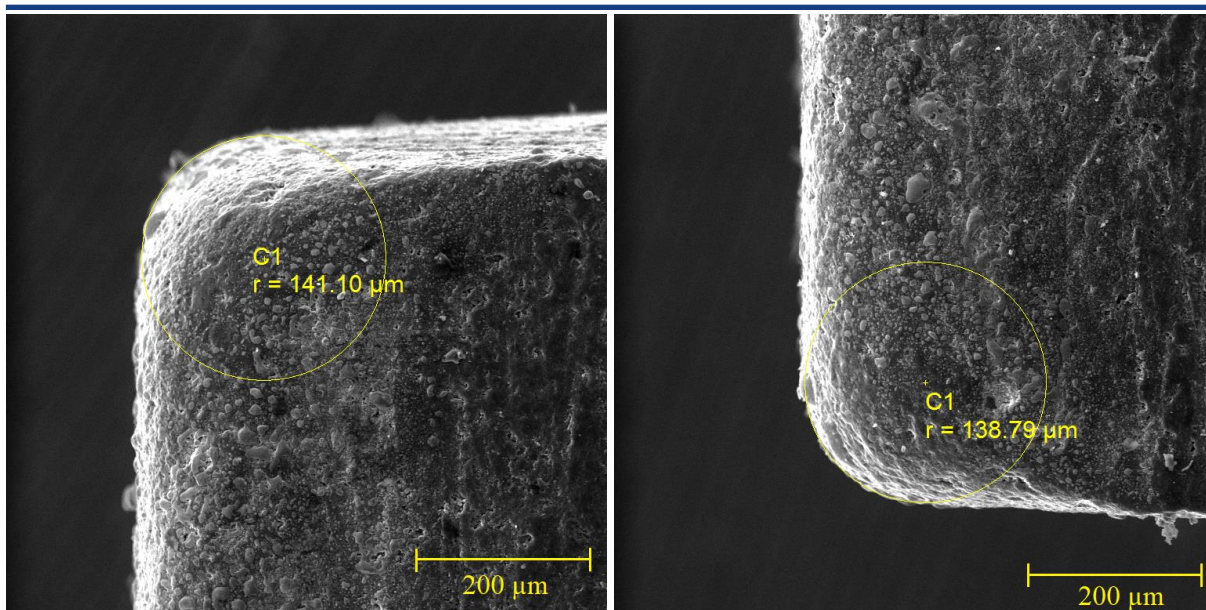
Povrchy elektrod 9 a 10 jsou znázorněny na obr. 3.26. Povrch elektrody 9 (obrázek vlevo) vykazuje určité množství oderodovaného materiálu obrobku, díry i trhlinky, ale to vše v přijatelné míře. Oproti tomu na povrchu elektrody 10 (obrázek vpravo) se vyskytuje o dost méně oderodovaného materiálu obrobku, který není téměř vidět ani při zvětšení 1000x. Tento fakt bude velmi pravděpodobně do určité míry dán tím, že na vzorku 10 bylo dosaženo největší kvality povrchu ($R_a=2,128 \mu\text{m}$).



Obr. 3.26 Snímky povrchu elektrod (9) elektroda 9 při zvětšení 1000x, (10) elektroda 10 při zvětšení 1000x.

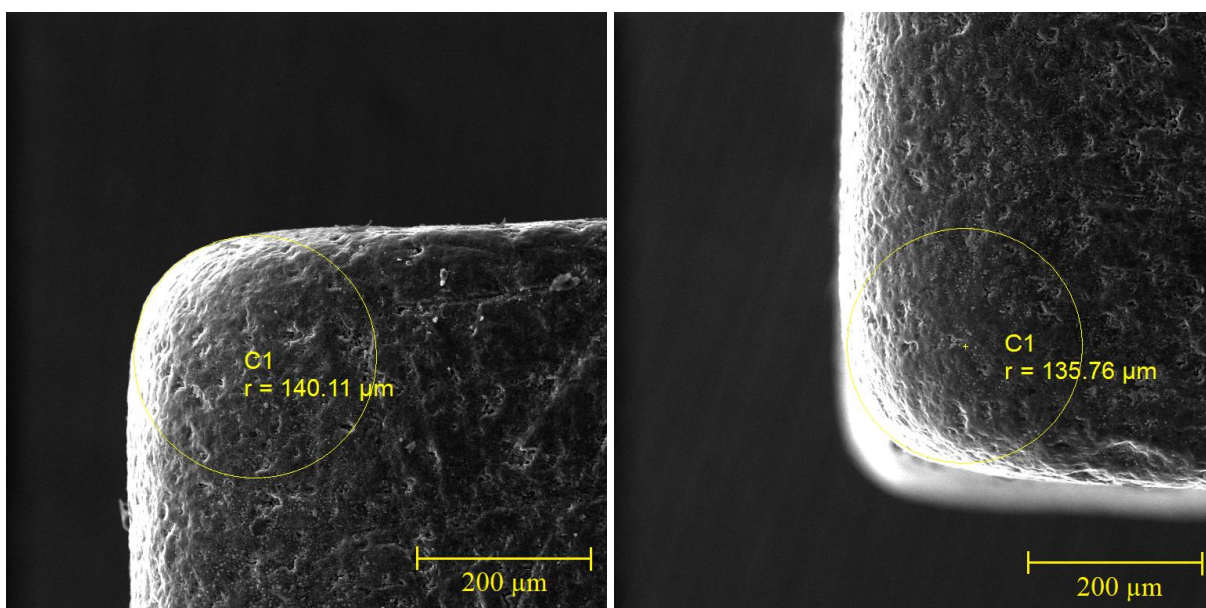
3.4.4 Opotřebení rohů elektrod

Analýza opotřebení elektrod může být posouzena z hlediska porovnání hmotnosti elektrody před a po elektroerozivním hloubení, nicméně tato metodika neumožňuje posouzení opotřebení v rozích elektrod, z čehož plyne, že by nebylo možné zjistit, jak bude degradován výsledný tvar obráběného materiálu. Pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu (SEM) LYRA3 od firmy Tescan (kapitola 3.4.2, obr. 3.12) byly vytvořeny snímky dvou rohů každé elektrody a následně jimi byla vedena aproximační kružnice. Tato aproximační kružnice je měřítkem opotřebení dané elektrody. Obr. 3.27 zachycuje opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 1 při zvětšení 300x. Rozdíl hodnot opotřebení je pouze $2,31 \mu\text{m}$.



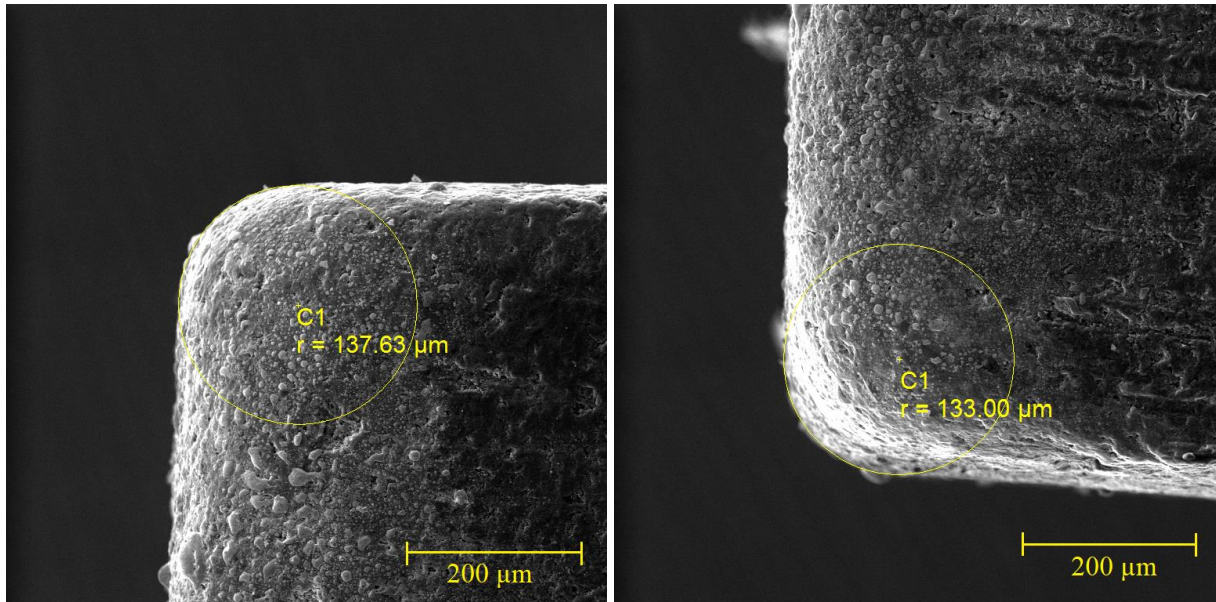
Obr. 3.27 Opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 1 při zvětšení 300x.

Na obr. 3.28 se nacházejí snímky opotřebení sousedních rohů elektrody 2 při zvětšení 300x. Rozdíl mezi hodnotami opotřebení je $4,35 \mu\text{m}$. Ve srovnání s elektrodou 1 dosahuje elektroda 2 nižších hodnot opotřebení, avšak odchylka těchto hodnot byla větší.



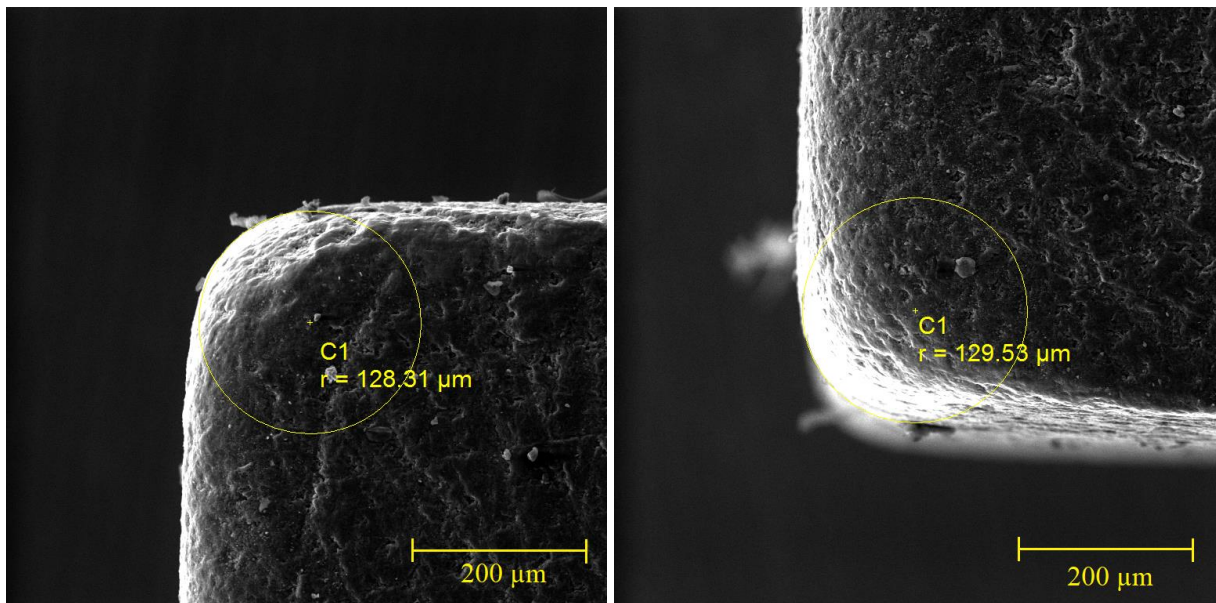
Obr. 3.28 Opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 2 při zvětšení 300x.

U opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 3 (obr. 3.29) dosahuje aproximační kružnice v těchto rozích hodnot $137,63 \mu\text{m}$ a $133,00 \mu\text{m}$. Čas erodování experimentu 3 byl poměrně krátký, nicméně z experimentů vyplývá, že mezi dobou erodování a opotřebením rohů elektrod neexistuje přesná přímá ani nepřímá úměrnost a větší vliv na opotřebení elektrod mají pravděpodobně parametry zvolené pro hloubení (doba trvání jednoho pulzu, proud, zapalovací napětí).



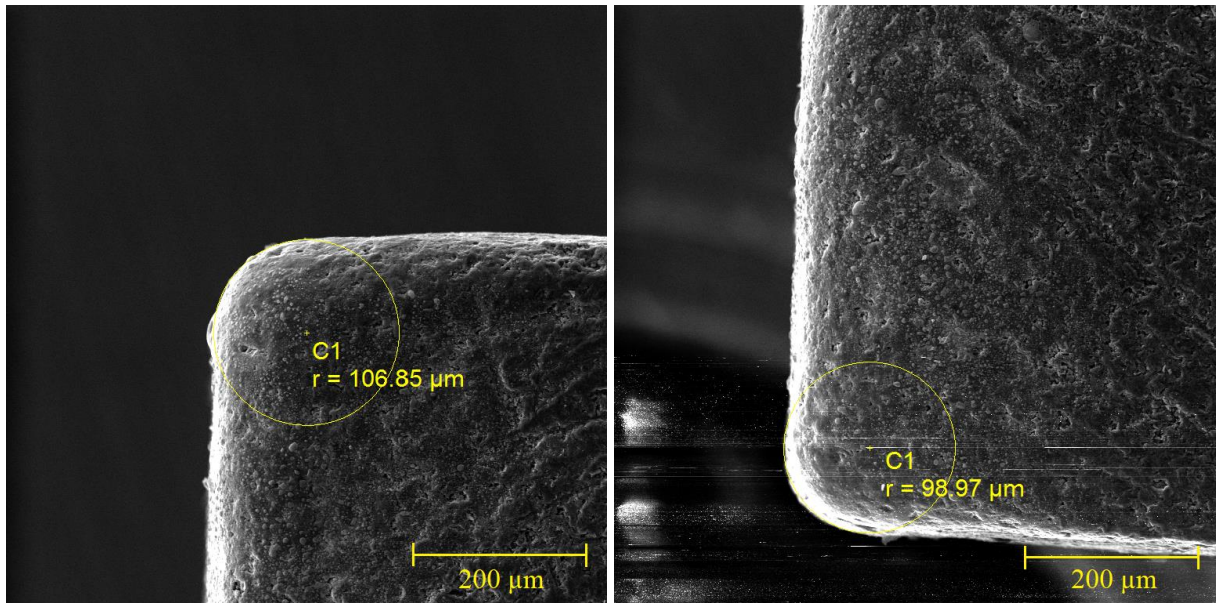
Obr. 3.29 Opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 3 při zvětšení 300x.

Na obr. 3.30 je znázorněno opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 4. Zde je rozdíl opotřebení u sousedních rohů téměř zanedbatelný, pouze $1,22 \mu\text{m}$. Míra opotřebení je u elektrody použité při čtvrtém experimentu $128,31 \mu\text{m}$ a $129,53 \mu\text{m}$.



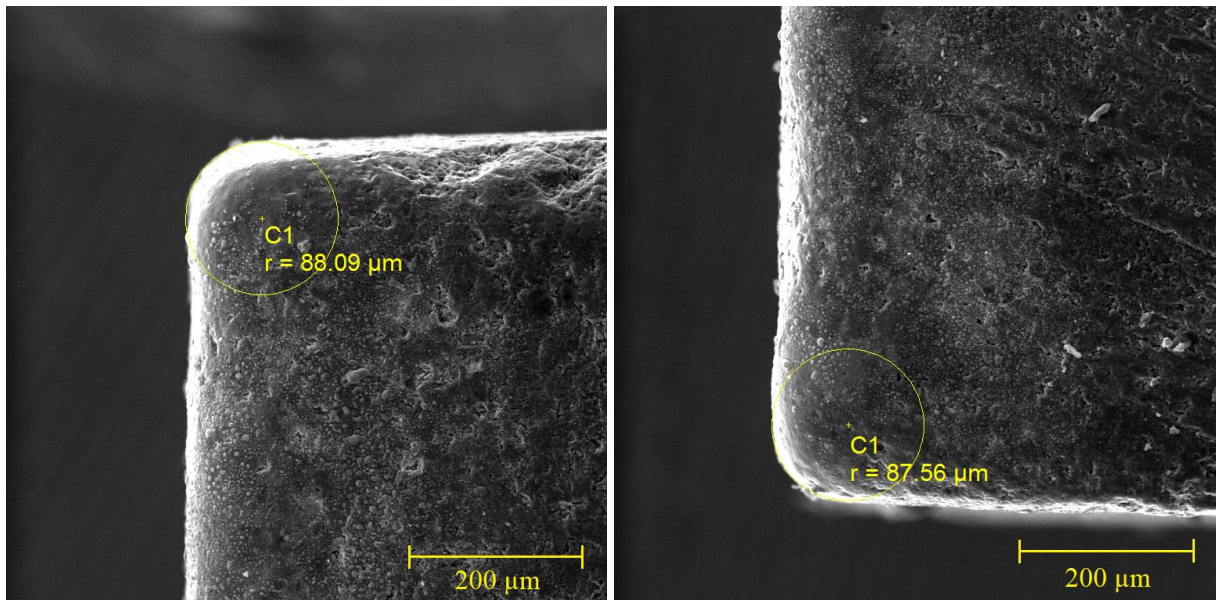
Obr. 3.30 Opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 4 při zvětšení 300x.

Opotřebení sousedních rohů elektrody 5 (obr. 3.31) je už patrně nižší než opotřebení předchozích čtyř elektrod. Hodnoty poloměrů aproximačních kružnic opotřebení jsou $106,85 \mu\text{m}$ a $98,97 \mu\text{m}$. Dosažení nižších hodnot opotřebení rohů elektrod je pravděpodobně způsobeno vhodnou kombinací hloubicích parametrů a nižší hodnotou proudu.



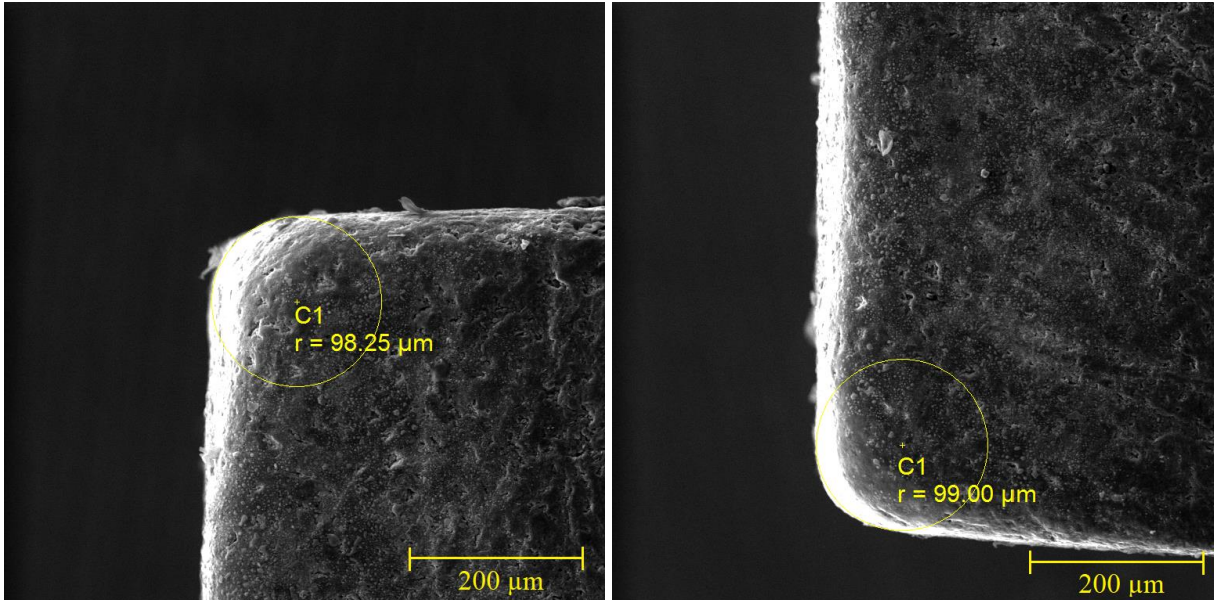
Obr. 3.31 Opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 5 při zvětšení 300x.

Opotřebení rohů elektrody 6, znázorněné na obr. 3.32, dosahuje nejnižších hodnot opotřebení ze všech elektrod. Opotřebení v obou sousedních rozích je pod $90 \mu\text{m}$, konkrétně $88,09 \mu\text{m}$ a $87,56 \mu\text{m}$. Rozdíl těchto dvou hodnot je také téměř zanedbatelný, pouze $0,53 \mu\text{m}$. Hloubicí parametry u experimentu 6 ($I=10,70 \text{ A}$, $T_{\text{on}}=90 \mu\text{s}$, $U=220 \text{ V}$) se zdají být velmi příznivé jak z hlediska opotřebení rohů elektrod, tak z hlediska času erodování.



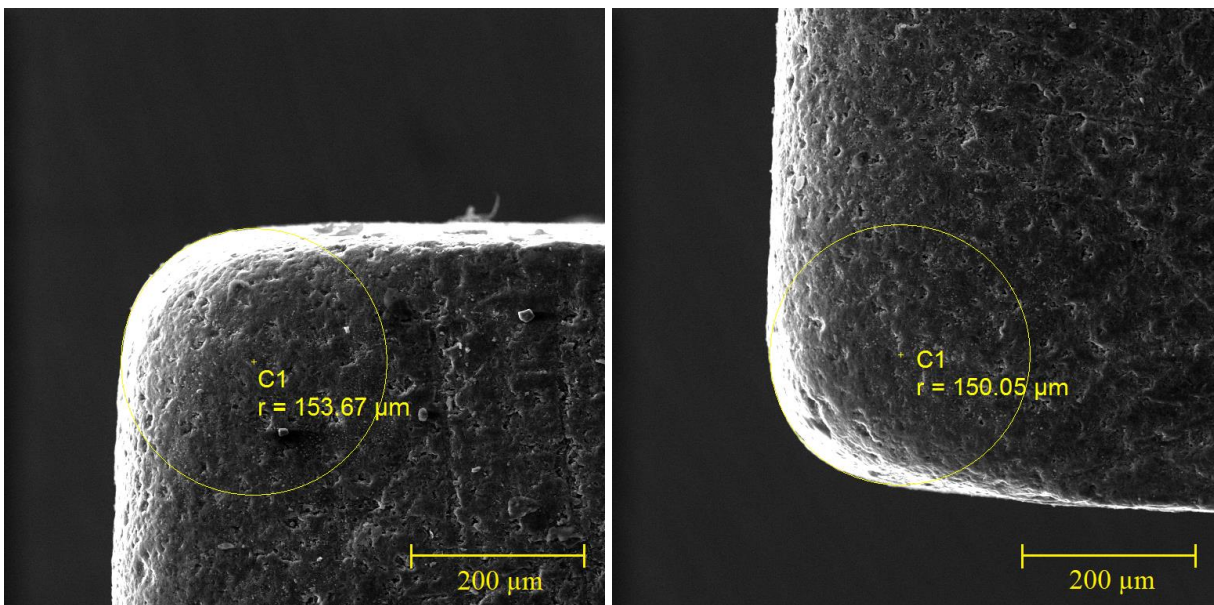
Obr. 3.32 Opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 6 při zvětšení 300x.

Opotřebení sousedních rohů elektrody 7 (obr. 3.33) dosahuje hodnot poloměrů aproximačních kružnic těsně pod 100 μm , konkrétně 98,25 μm a 99,00 μm . Tyto hodnoty lze považovat za příznivé, vzhledem k tomu, že všechny předchozí experimenty měly nižší dobu erodování. Je tedy pravděpodobné, že hodnoty opotřebení rohů elektrod jsou více ovlivněny hloubicími parametry, než dobou erodování.



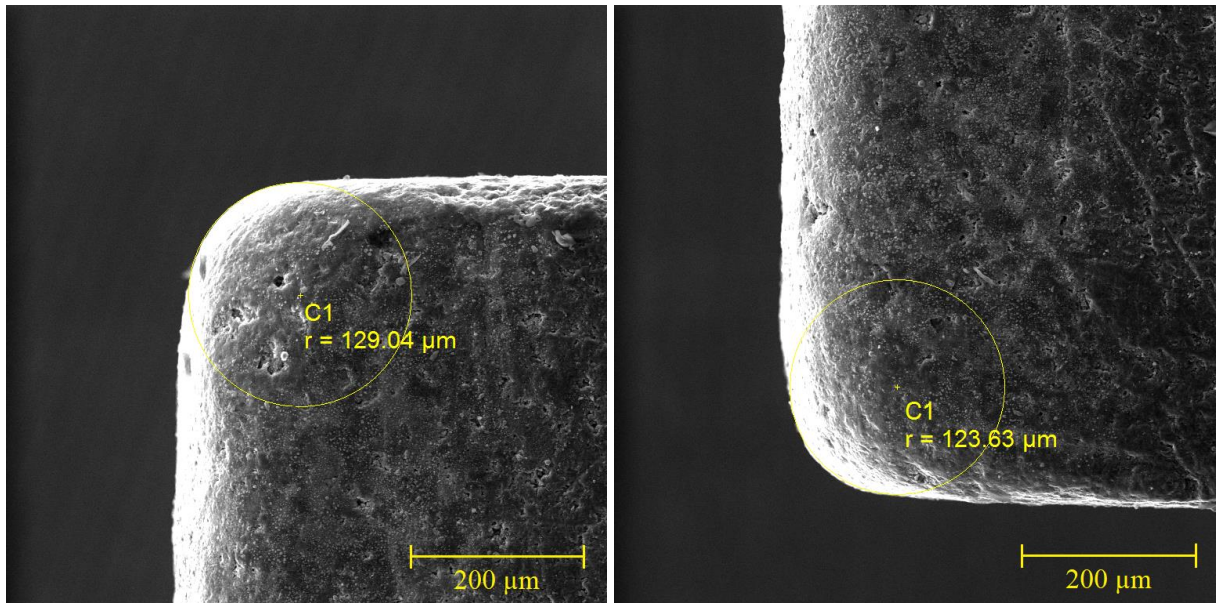
Obr. 3.33 Opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 7 při zvětšení 300x.

Na obr. 3.34 je znázorněno opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 8, které už oproti elektrodě 7 dosahuje více jak padesátiprocentního nárůstu. Hodnoty poloměrů aproximačních kružnic v rozích dosahují hodnot 153,67 μm a 150,05 μm .



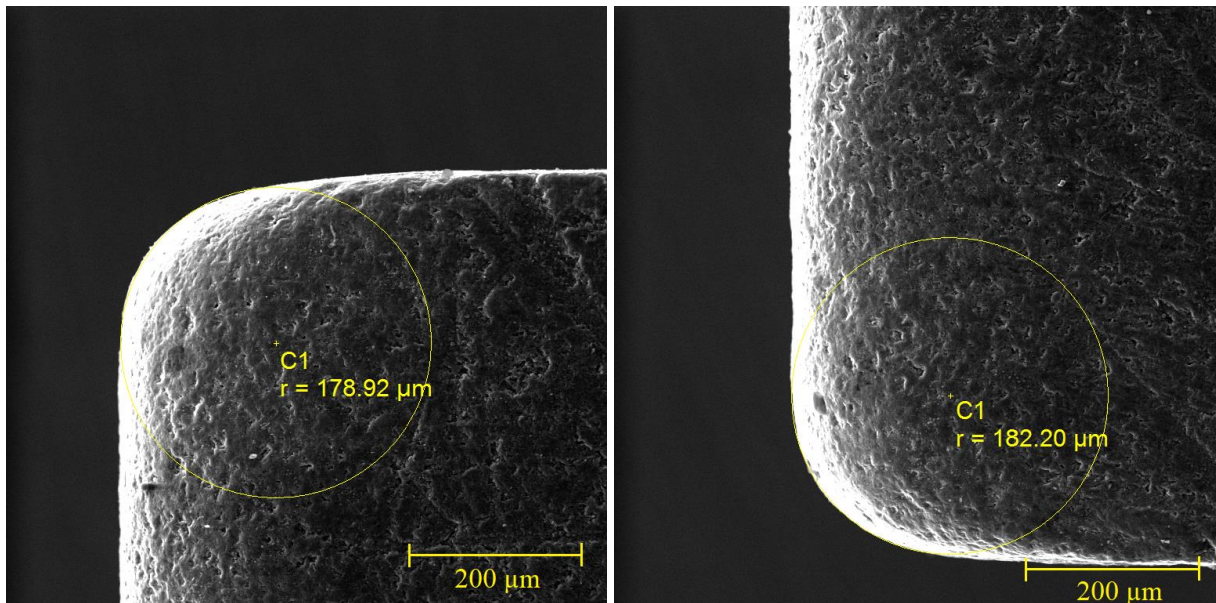
Obr. 3.34 Opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 8 při zvětšení 300x.

Opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 9, znázorněné na obr. 3.35, dosahuje hodnot $129,04 \mu\text{m}$ a $123,63 \mu\text{m}$. Doba erodování u experimentu 9 byla nejvyšší ze všech prováděných experimentů, ovšem hodnoty opotřebení rohů elektrod ani zdaleka nejvyšší nejsou.



Obr. 3.35 Opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 9 při zvětšení 300x.

Nejvyšší hodnoty opotřebení rohů se vyskytují na elektrodě 10 (obr. 3.36), konkrétně $178,92 \mu\text{m}$ a $182,20 \mu\text{m}$, ovšem tento experiment trval 33 minut a 10 sekund a tudíž například oproti experimentu 9 je u něho doba erodování několikanásobně nižší. Takto vysoké hodnoty opotřebení rohů elektrody mohou být způsobeny rozdílnou kombinací hloubicích parametrů (vysoké zapalovací napětí, nízká doba trvání jednoho pulzu).



Obr. 3.36 Opotřebení dvou sousedních rohů elektrody 10 při zvětšení 300x.

V tab. 3.8 jsou zobrazeny hodnoty opotřebení rohů jednotlivých elektrod. Z této tabulky je patrné, že nejnižší hodnota opotřebení byla naměřena na elektrodě 6 a poté na elektrodě 7, u všech ostatních elektrod alespoň jedna z hodnot překonala 100 μm . V tabulce je rovněž uveden průměr z hodnot opotřebení ve zkoumaných rozích. Rozdíl mezi nejnižší naměřenou hodnotou opotřebení (87,56) a nejvyšší naměřenou hodnotou (182,20) je při hloubení do hloubky 0,5 mm poměrně výrazný.

Tab. 3.8 Hodnoty opotřebení rohů jednotlivých elektrod.

Číslo elektrody	Hodnota opotřebení rohu 1 [μm]	Hodnota opotřebení rohu 2 [μm]	Průměr [μm]
1	141,10	138,79	139,95
2	140,11	135,76	137,94
3	137,63	133,00	135,32
4	128,31	129,53	128,92
5	106,85	98,97	102,91
6	88,09	87,56	87,83
7	98,25	99,00	98,63
8	153,67	150,05	151,86
9	129,04	123,63	126,34
10	178,92	182,20	180,56

4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Z obráběcích parametrů má největší vliv na celý proces elektroeroze hodnota proudu a doba trvání jednoho pulzu. Zejména nalezení jejich vhodné kombinace je klíčová pro plynulý a pro povrch elektrody i obrobku šetrný průběh elektroerozivního hloubení. Tab. 4.1 zobrazuje tři faktory u všech provedených experimentů, tedy čas erodování, kvalitu povrchu obrobku po hloubení a opotřebení rohů elektrod vyjádřené hodnotou aproximačních kružnic v rozích elektrod.

Z provedených experimentů se jako nejvhodnější hrubovací operace jeví šestý experiment ($I=10,70$ A, $T_{on}=90$ μ s, $U=220$ V), při kterém bylo naměřeno nejnižší opotřebení na rozích elektrod, průměrná kvalita povrchu v porovnání s ostatními experimenty a nízká časová náročnost. Dosažené výsledky u šestého experimentu byly dány optimálním poměrem proudu a doby trvání jednoho pulzu, při současné příznivé hodnotě zapalovacího napětí.

Jako nejprůzračnější dokončovací operace se dle naměřených hodnot kvality povrchu jeví desátý experiment ($I=5,94$ A, $T_{on}=5$ μ s, $U=280$ V), který rovněž dosahuje příznivého času erodování, nicméně opotřebení rohů elektrod dosahuje nejvyšších hodnot. Z devátého experimentu ($I=3,80$ A, $T_{on}=90$ μ s, $U=220$ V) vyplývá, že snižování proudu pod 5 A nemá při hloubení tohoto leteckého materiálu význam, a to jak z hlediska časové náročnosti, tak z hlediska dosažené kvality povrchu. Lze předpokládat, že i úprava doby trvání jednoho pulzu a zapalovacího napětí by vzhledem k nízké hodnotě proudu neměly výraznější přínos na čas erodování, či kvalitu povrchu.

U experimentů 1 a 3 bylo v porovnání s ostatními experimenty využito nejvyšších hodnot doby trvání jednoho pulzu ($T_{on}=450$ μ s) a právě u těchto experimentů bylo dosaženo jednoznačně nejhorší kvality povrchu, ovšem nejnižšího času erodování (tab. 4.1), z tohoto tedy plyne, že vysoké hodnoty doby trvání jednoho pulzu mají velice negativní vliv na kvalitu povrchu, ovšem zároveň příznivý vliv na čas erodování. Při experimentu 3 byla na povrchu vzorku objevena trhлина (150 - 200 μ m), nelze s určitostí konstatovat čím je tato trhлина způsobena, nicméně může být způsobena vysokou hodnotou doby trvání jednoho pulzu ($T_{on}=450$ μ s).

Tab. 4.1 Souhrnná tabulka dosažených hodnot při experimentech.

Experiment	Čas erodování [min]	Kvalita povrchu vzorku Ra [μ m]	Opotřebení 1. rohu elektrody [μ m]	Opotřebení 2. rohu elektrody [μ m]
1	4:23	18,596	141,10	138,79
2	8:03	9,821	140,11	135,76
3	5:41	15,438	137,63	133,00
4	8:36	3,457	128,31	129,53
5	10:11	6,336	106,85	98,97
6	5:49	6,905	88,09	87,56
7	21:06	4,570	98,25	99,00
8	76:27	2,563	153,67	150,05
9	167:26	3,601	129,04	123,63
10	33:10	2,128	178,92	182,20

ZÁVĚR

Pro splnění experimentální části byla provedena rešerše elektroerozivního obrábění a současného stavu materiálů využívaných v leteckém průmyslu. Bylo provedeno shrnutí nekonvenčních metod obrábění se zaměřením na elektroerozivní hloubení, kde byly zmíněny poznatky o výbojích, zdrojích elektrické energie, dielektriku, nástrojových elektrodách a charakteristickém kráterovitém povrchu dosaženém elektroerozivním hloubením. Následně byl v teoretické části proveden popis materiálů, které se využívají pro letecký průmysl.

Během experimentální části byl prokázán vliv obráběcích parametrů na povrch obrobku, elektrody i na celý průběh elektroeroze. Klíčovým faktorem je volba proudu a doby trvání jednoho pulzu v závislosti na hodnotě zapalovacího napětí.

Během experimentu byly zjištěny optimální hodnoty proudu pro elektroerozivní hloubení niklové superslitiny INCO 713LC, a to v rozmezí přibližně mezi 5 - 35 A v závislosti na požadované operaci. Na povrchu elektrod dochází během procesu elektroerozivního hloubení k ulpívání materiálu obrobku, k tvorbě trhlinek a děr. Nebylo prokázáno, že by s rostoucím časem erodování rostlo i opotřebení na rozích elektrod.

Při experimentální práci byl jako nejvhodnější pro hrubovací operace zvolen šestý experiment. Pro dokončovací operace byl jako nejvhodnější zvolen desátý experiment, při kterém bylo ovšem dosaženo největšího opotřebení rohů elektrod.

Přestože byly splněny stanovené cíle této diplomové práce, bylo by vhodné ověřit dosažené výsledky provedením většího počtu experimentů na větší sérii vzorků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-708-2518-9.
- [2] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [3] OSÍČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění*. Brno, 2012.
- [4] MÁDL, J., J. KAFKA, M. VRABEC a R. DVOŘÁK. *Technologie obrábění*. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [5] Elektronická učebnice. *ELUC* [online]. Olomoucký kraj [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1405>
- [6] State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2003 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695503001627>
- [7] Electro-discharge machining. *Electro-discharge machining* [online]. London: Gareth Weeks, 2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: www.engineeringclicks.com/electro-discharge-machining-edm/
- [8] *NTN Precision* [online]. Velké Meziříčí: NTN Precision [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.ntnprecision.cz/zakazkova-vyroba/elektroerozivni-obrabeni-edm/>
- [9] KALINOVÁ, Jana. Digitální učební materiál. *Fyzikální metody obrábění: Elektroerozivní obrábění* [online]. 2013 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3664343/>
- [10] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: ČVUT, 1989.
- [11] KOHOUT, Jaroslav. *Elektroerozivní CNC hloubicí stroje, Penta CNC: Obsluha stroje*. 2019.
- [12] ETMM. *ETMM* [online]. Würzburg: Rosemarie Stahl, 2018 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.etmm-online.com/what-is-electrical-discharge-machining-and-how-does-it-work-a-689686/>
- [13] Elektronická učebnice. *ELUC* [online]. Olomoucký kraj [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1399>
- [14] Elektronická učebnice. *ELUC* [online]. Olomoucký kraj [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1401>
- [15] HUMÁR, Anton. Technologie I: Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. *Technologie I technologie obrábění 3. část* [online]. Brno: VUT v Brně, 2005 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/13479-Technologie-i-technologie-obrabeni-3-cast.html>
- [16] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [17] PENTA Trading. *PENTA Trading* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.penta-edm.cz/text-grafit/>
-

- [18] BLEYS, Philip, Jean-Pierre KRUTH, Bert LAUWERS, Benny SCHACHT, Vimalan BALASUBRAMANIAN, Ludo FROYEN a Jan Van HUMBEECK. Surface and Sub-Surface Quality of Steel after EDM. *Surface and Sub-Surface Quality of Steel after EDM* [online]. 2005 [cit. 2020-06-05]. DOI: 10.1002/adem.200500211. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/adem.200500211>
- [19] JKZ Bučovice, a.s. *W. NR. 1.2738 HH* [online]. Bučovice: JKZ Bučovice [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/cs/produkty/nastrojove-oceli/na-vyrobu-forem/w-nr-12738-hh>
- [20] UHOSTAL, Vladimír. *Letecké materiály*. Brno: Editační středisko VUT Brno, 1988.
- [21] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2002. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [22] JEŘÁBEK, Ivan. *Základy letadlové techniky. Základy letadlové techniky* [online]. Praha: FS ČVUT, 2014 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: http://webdav.agents.fel.cvut.cz/data/teaching/bep/BEP2_2014.pdf
- [23] LEYENS, Christoph a Manfred PETERS. Titanium and titanium Alloys: Fundamentals and Applications. *Titanium and titanium Alloys* [online]. 2003 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: [http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/MATERIALS%26COMPONENTS/Pressure_vessels/edited_by_C._Leyens_and_M._Peters.-Titanium_and_Titanium_Alloys-Wiley-VCH\(2001\).pdf](http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/MATERIALS%26COMPONENTS/Pressure_vessels/edited_by_C._Leyens_and_M._Peters.-Titanium_and_Titanium_Alloys-Wiley-VCH(2001).pdf)
- [24] MICHNA, Š., I. LUKÁČ, V. OČENÁŠEK, R. KOŘENÝ, J. DRÁPALA, H. SCHNEIDER a A. MIŠKUFOVÁ A KOL. *Encyklopedie hliníku*. Slovenská republika, Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [25] Hliník. *Periodická video tabulka prvků* [online]. Praha: Přírodovědecká fakulta UK v Praze, 2015 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://www.chemickeprvky.cz/prvek/al/>
- [26] UHOSTAL, V. *Současný stav a trendy vývoje lehkých slitin v konstrukci draků letadel*. Brno: Klub české společnosti pro nové materiály a technologie při VUT v Brně, 2000.
- [27] Titan. *Periodická video tabulka prvků* [online]. Praha: Přírodovědecká fakulta UK v Praze, 2015 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://www.chemickeprvky.cz/prvek/ti/>
- [28] Application of Titanium Alloy Strips in Aerospace. *TSM Technology* [online]. China: TSM Technology, 2020 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.tsm-titanium.com/info/application-of-titanium-alloy-strips-in-aerosp-43682209.html>
- [29] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [30] SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [31] BOYER, Rodney, Gerhard WELSCH a E.W. COLLINGS. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. USA: ASM International, 1994.
- [32] Nikl. *Periodická video tabulka prvků* [online]. Praha: Přírodovědecká fakulta UK v Praze, 2015 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://www.chemickeprvky.cz/prvek/ni/>

-
- [33] DAVIS, Joseph R. *ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys*. USA: ASM International, 2000. ISBN 978-0-87170-685-0.
- [34] Kobalt. *Periodická video tabulka prvků* [online]. Praha: Přírodovědecká fakulta UK v Praze, 2015 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://www.chemickeprvky.cz/prvek/co/>
- [35] Mechanical comparison of new composite materials for aerospace applications. *Composites* [online]. 2019 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836818305481?via>
- [36] Kompozitní materiály. *Katedra materiálového inženýrství a chemie* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11.pdf>
- [37] Who is responsible for the safety of composite structure. *Lessons learnt for aviation safety* [online]. 2011 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.1001crash.com/index-page-composite-lg-2.html>
- [38] O nás. *PENTA Trading* [online]. Říčany: PENTA Trading [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.penta-edm.cz/o-nas/>
- [39] PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Vliv podmínek zatěžování na strukturu a porušování lité niklové superslitiny*. VUTIUM. Brno, 2005. Dostupné také z: <https://adoc.tips/queue/edice-habilitani-a-inaugurani-spisy-sv-181-issn-x.html>
- [40] PENTA Trading. *PENTA Trading* [online]. Říčany: PENTA Trading [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://www.penta-edm.cz/hloubicka-penta-433gs-cnc/>
- [41] *IonoPlus IME-MH*. Praha. Dostupné také z: <http://www.interspark.cz/files/IME-MH.pdf>
- [42] Mechanical profilometer Bruker Dektak XT (DEKTAK). *CEITEC* [online]. Brno: CEITEC NANO, 2018 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://nano.ceitec.cz/mechanical-profilometer-bruker-dektak-xt-dektak/>
- [43] Nanoscale Imaging Capabilities. *FICS Research* [online]. USA: University of Florida [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <http://fics.institute.ufl.edu/facilities/nanoscale-imaging-capabilities/>
- [44] BACHMANN, Jens, Xiaosu YI, Hugh GONG a et al. *Outlook on ecologically improved composites for aviation interior and secondary structures* [online]. CEAS Aeronaut J 9, 2018 [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13272-018-0298-z>
- [45] PENTA CNC. *České hloubičky světové úrovně!* [online]. Říčany: PENTA Trading [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://www.penta-edm.cz/dokumenty/produkty/penta_cnc_katalog_cj_2018.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
EDM	-	Electro Discharge Machining - elektroerozivní obrábění
V_i	mm^3	množství odebraného materiálu
K	-	součinitel, který má různou hodnotu pro anodu a katodu při výboji
W_i	J	energie výboje
t_i	μs	doba impulsu
t_o	μs	doba pauzy
t_d	μs	doba zpoždění výboje
t_e	μs	doba výboje
T	μs	doba periody
U_z	V	napětí na prázdno
I	A	pracovní proud výboje
I_e	A	střední vybíjecí proud
U_e	V	střední vybíjecí napětí
U	V	napětí
Q_v	$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	celkové množství odebraného materiálu
f	s^{-1}	frekvence výbojů
r	-	účinnost elektrického výboje
η	-	účinnost generátoru
q	-	časové využití periody stroje
RC	-	generátory s odporem a kapacitou
RLC	-	generátory s odporem, indukčností a kapacitou
v	%	relativní objemové opotřebení
V_N	$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	objemové opotřebení nástroje
V_0	$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	odebraný objem materiálu obrobku
D	mm	požadovaný průměr dutiny
a	mm	velikost pracovní mezery
R_{\max}	-	kvalita obrobenej plochy
z	mm	tloušťka narušeného povrchu
M	mm	minimální hodnota, o kterou musí být nástroj menší pro dosažení požadovaného průměru
δ	μm	úchylka tvaru obrobku od žádaného
δ_{ST}	μm	chyba obráběcího stroje
δ_T	μm	chyba vzniklá nárůstem teploty
$\delta_{NÁST}$	μm	výrobní nepřesnost nástrojové elektrody
δ_{ER}	μm	chyba daná podstatou elektroerozivního obrábění
CNC	-	Computer Numerical Control - číslicové řízení pomocí počítače
$R_{p0,2}$	MPa	nevýrazná mez kluzu
R_m	MPa	mez pevnosti
A	%	tažnost
Z	%	kontrakce (zúžení)
T_{on}	μs	doba trvání jednoho pulzu
T_{off}	μs	doba prodlevy mezi jednotlivými pulzy
C_{box}	-	přídavná jednotka generátoru

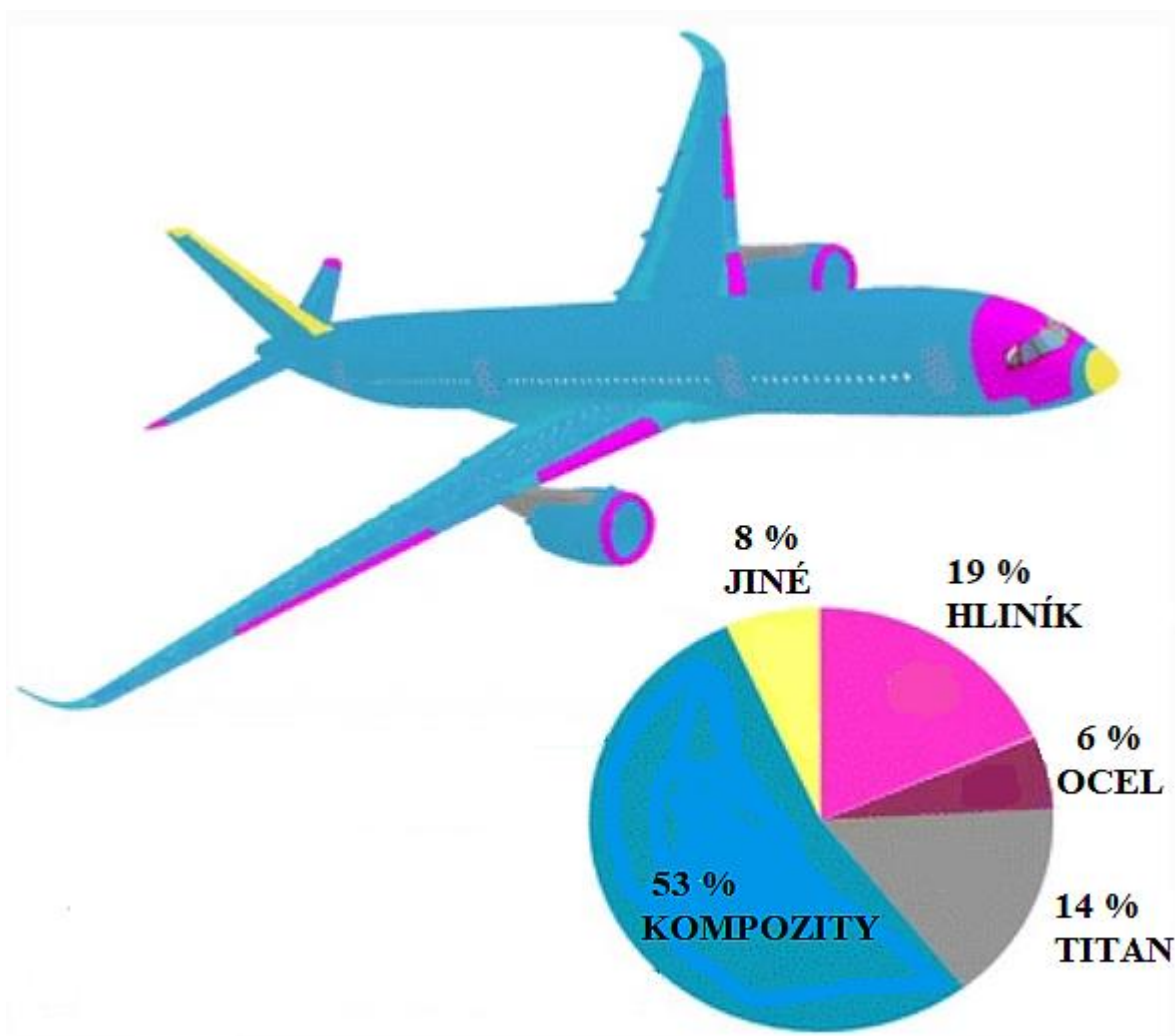
GAP	V	nastavení napětí v jiskrové mezeře
R_a	μm	průměrná aritmetická úchylka profilu
R_q	μm	průměrná kvadratická úchylka profilu
R_z	μm	největší výška profilu
S_a	μm	průměrná aritmetická výška
S_q	μm	průměrná kvadratická výška
S_z	μm	maximální výška
SEM	-	elektronový rastrovací mikroskop

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Použité materiály v Airbus A350 [44]
Příloha 2 Srovnání elektroerozivních hloubiček PENTA CNC [45]

PŘÍLOHA 1

Použité materiály v Airbus A350 [44]



PŘÍLOHA 2

Srovnání elektroerozivních hloubiček PENTA CNC [45]

Typ stroje		PENTA 534GRi CNC	PENTA 654GRi CNC	PENTA 854GRi CNC
Pojezdy os X x Y x Z	mm	500 x 300 x 400	600 x 500 x 400	800 x 500 x 400
Rozměr pracovní vany	mm	820 x 600	1100 x 900	1200 x 1000
Max. hladina dielektrika	mm	350	520	520
Upínací plocha stolu	mm	740 x 390	800 x 700	900 x 800
Odstup stůl – pinola (min. – max.)	mm	150 – 550	150 – 550	150 – 550
Max. hmotnost obrobku	kg	700	1500	1800
Max. hmotnost elektrody na pinole	kg	100	120	120
Rozměry stroje (š x h x v)	mm	1900 x 2100 x 3020	2500 x 2900 x 3500	2600 x 3000 x 3500
Hmotnost stroje	kg	3800	4500	5000
Náplň dielektrika	l	350	650	750

Typ stroje		PENTA 433GS CNC PENTA 433G CNC	PENTA 540 CNC	PENTA 650G CNC	PENTA 1060 CNC PENTA 1070G CNC
Pojezdy os X x Y x Z	mm	400 x 300 x 300	500 x 400 x 350	600 x 500 x 500	1000 x 600 x 500 1000 x 700 x 550
Rozměr pracovní vany	mm	1000 x 550	1200 x 700	1400 x 800	1900 x 1100 1900 x 1200
Max. hladina dielektrika	mm	320 350	400	500	550
Upínací plocha stolu	mm	700 x 350	800 x 450	1000 x 600	1250 x 750
Odstup stůl – pinola (min. – max.)	mm	130 – 430	200 – 550	220 – 720	200 – 700 200 – 750
Max. hmotnost obrobku	kg	700 1200	2000	4000	4500 5500
Max. hmotnost elektrody na pinole	kg	100	200	400	400
Rozměry stroje (š x h x v)	mm	2050 x 1760 x 2380 2900 x 1750 x 2350	2160 x 2450 x 2380	3500 x 2700 x 2700	3300 x 3400 x 3100
Hmotnost stroje	kg	2210 2650	3500	6300	6000 9000
Náplň dielektrika (l)	l	300 380	500	720	1500 1700