



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ROZBOR VÝSLEDKŮ Z EXPERIMENTÁLNÍHO ELEKTROEROZIVNÍHO HLOUBENÍ SPECIÁLNÍCH MATERIÁLŮ PRO LETECKÝ PRŮMYSL

ANALYSIS OF RESULTS FROM EXPERIMENTAL ELECTRODISCHARGE SINKING OF
SPECIAL MATERIALS FOR AEROSPACE INDUSTRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Veronika Macháčová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--------------------------------|
| Ústav: | Ústav strojírenské technologie |
| Studentka: | Bc. Veronika Macháčová |
| 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:

Rozbor výsledků z experimentálního elektroerozivního hloubení speciálních materiálů pro letecký průmysl

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na firemním elektroerozivním stroji se provede experimentální obrábění speciálních materiálů používaných především v leteckém průmyslu. Obrobené vzorky budou vyhodnoceny.

Cíle diplomové práce:

- Základní teorie elektrohloubení
- Charakteristika firemního elektrohloubicího stroje
- Přehled zkoumaných vzorků
- Provedení obráběcích experimentů
- Posouzení výsledků

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.

.....
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je experimentální elektroerozivní hloubení materiálu z oblasti leteckého průmyslu. První část je věnována zpracování obecného přehledu týkajícího se technologie elektroerozivního obrábění s důrazem na elektroerozivní hloubení. Následuje praktická část věnovaná samotnému elektroerozivnímu hloubení materiálu Nimonic 263 měděnou nástrojovou elektrodou a následné vyhodnocení povrchových a podpovrchových změn v tomto materiálu. Je posouzeno i opotřebení nástrojové elektrody a ve výsledku zhodnoceno, jak se tato kombinace obráběného materiálu a materiálu nástrojové elektrody chová při různých nastavení pracovních podmínek a jaký má vliv na povrchovou vrstvu obráběného materiálu.

Klíčová slova

Elektroerozivní obrábění, elektroerozivní hloubení, Nimonic 263, EDM, letecký průmysl

ABSTRACT

The aim of this master's thesis is experimental electric discharge sinking of special materials for the aerospace industry. The first part is a general overview regarding the technology of electric discharge machining with emphasis on electric discharge sinking. Following this is a practical part devoted to the electric discharge sinking of the Nimonic 263 material with a copper tool electrode with a subsequent evaluation of surface and subsurface changes in this material. The wear of the tool electrode is also examined with the conclusion highlighting combination of machined material and tool electrode material behave in different working conditions and how the surface layer of machined material is affected.

Key words

Electric discharge machining, electric discharge sinking, Nimonic 263, EDM, aerospace industry

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACHÁČOVÁ, Veronika. Rozbor výsledků z experimentálního elektroerozivního hloubení speciálních materiálů pro letecký průmysl. Brno 2020. 64 stran, 2 přílohy Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124472>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Rozbor výsledků z experimentálního elektroerozivního hloubení speciálních materiálů pro letecký průmysl** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

24.6.2020

Datum

Bc. Veronika Macháčová

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat Ing. Milanu Kalivodovi za ochotu, cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování této diplomové práce.

Děkuji firmě PENTA TRADING, spol. s.r.o. za poskytnutí zázemí, odborných rad a materiálů pro výrobu vzorků.

Děkuji výzkumné infrastruktuře CzechNanoLab (ID LM2018110, MŠMT, 2020 - 2022), CEITEC, Vysoké učení technické v Brně, s jejichž podporou vznikla část práce.

Děkuji Ing. Kateřině Mouralové, Ph.D. za její čas, práci a odborné rady, bez kterých by tato práce nevznikla.

A v neposlední řadě děkuji rodině a blízkým za trpělivost a podporu ve studiu.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ABSTRAKT | 4 |
| PROHLÁŠENÍ | 5 |
| PODĚKOVÁNÍ..... | 6 |
| OBSAH..... | 7 |
| ÚVOD..... | 9 |
| 1 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ..... | 10 |
| 1.1 Vývoj elektroerozivního obrábění | 10 |
| 1.2 Využití elektroeroze..... | 11 |
| 1.3 Princip elektroeroze..... | 12 |
| 1.3.1 Průběh vzniku výboje | 13 |
| 1.3.2 Generátor impulzů..... | 16 |
| 1.3.3 Nástrojové elektrody..... | 17 |
| 1.3.4 Dielektrická kapalina | 18 |
| 1.3.5 Vlastnosti povrchu obrobku po elektroerozivním obrábění..... | 19 |
| 1.4 Elektroerozivní drátové řezání..... | 22 |
| 1.5 Elektroerozivní broušení..... | 24 |
| 1.6 Elektroerozivní hloubení..... | 24 |
| 1.6.1 Nástrojové elektrody pro hloubení a jejich pohyb..... | 24 |
| 1.6.2 Materiály nástrojových elektrod | 26 |
| 1.6.3 Elektroerozivní hloubicí stroje | 28 |
| 1.6.3.1 GE | 28 |
| 1.6.3.2 ONA..... | 29 |
| 1.6.3.3 Exeron | 29 |
| 1.6.3.4 Sodick..... | 30 |
| 1.6.3.5 Mitsubishi..... | 31 |
| 1.6.4 Využití elektroerozivního hloubení | 31 |
| 2 EXPERIMENTÁLNÍ ELEKTROEROZIVNÍ HLOUBENÍ | 34 |
| 2.1 Použité vybavení pro elektroerozivní hloubení..... | 34 |
| 2.2 Obráběný materiál Nimonic 263..... | 37 |
| 2.3 Parametry obrábění..... | 38 |
| 2.4 Vliv pracovních parametrů na rychlost hloubení..... | 40 |
| 3 VYHODNOCENÍ POVRCHOVÉ STRUKTURY PO EDM..... | 41 |
| 3.1 Topografie povrchu | 41 |
| 3.2 Morfologie povrchu..... | 43 |

| | | |
|-----|---|----|
| 3.3 | EDX..... | 46 |
| 3.4 | Vyhodnocení podpovrchové oblasti | 47 |
| 3.5 | Opotřebení nástrojové elektrody | 49 |
| 4 | SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ A DALŠÍ DOPORUČENÍ | 52 |
| | ZÁVĚR | 53 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 54 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A ZNAČEK | 59 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ | 62 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK | 64 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 64 |
| | PŘÍLOHA 1..... | 65 |
| | PŘÍLOHA 2..... | 71 |

ÚVOD

Neustálé navyšování požadavků na kvalitu a vývoj nových materiálů vede k nárůstu využití jiných než konvenčních technologií, které v mnoha případech tyto vysoké nároky nemohou splnit nebo je jejich použití finančně náročnější. Zde nastupují nekonvenční technologie.

Mezi tyto technologie patří i elektroerozivní obrábění, jehož kořeny sahají do 50. let minulého století. Jedná se o metodu využívající elektro-tepelných procesů úběru materiálu bez vzájemného kontaktu nástroje a obrobku. Uplatňuje se v mnoha odvětvích, mezi které patří i letecký průmysl. Právě v něm jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu, přesnost a spolehlivost vyráběných dílů, zároveň se však jedná o díly tvarově složité a navíc sestojené z materiálů, které jsou často konvenčními metodami těžkoobrobitelné, proto se často používá elektroerozivní obrábění. Každý materiál na tuto technologii reaguje jinak a výsledný povrch ovlivňuje mnoho faktorů jako je materiál nástrojové elektrody, použité dielektrikum a jeho proudění v nádrži, parametry obrábění a v neposlední řadě samotný obráběný materiál. Zamezení vzniku povrchových, či podpovrchových vad při elektroerozivním obrábění je klíčové pro správnou funkci obrobku a v odvětví leteckého průmyslu se tyto vady pečlivě sledují.

Experimentální elektroerozivní hloubení, následné posouzení ovlivnění povrchové a podpovrchové vrstvy obráběného materiálu, vyhodnocení opotřebení nástrojových elektrod a rychlosti hloubení je cílem této diplomové práce. Pro hloubení bude použit stroj PENTA 433GS CNC, který je české výroby a jako letecký materiál se bude hloubit a dále vyhodnocovat materiál Nimonic 263, který je používán v plynových turbínách a odolává vysokým teplotám při zachování vysoké pevnosti [33].

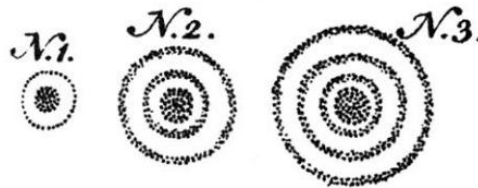
1 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

Elektroerozivní obrábění patří mezi jednu z nejrozšířenějších metod nekonvenčního obrábění. Nekonvenční metody nevyužívají k obrábění pouze mechanickou energii, ale liší se právě využitím jiných forem energie, jako je tepelná, elektrická, chemická, ultrazvuková nebo abrazivní, a jejich kombinací. K rozvoji v tomto odvětví dochází v 2. polovině 20. století, a to hlavně díky vývoji nových druhů těžko obrobitelných materiálů a vyšší složitosti konstrukce obrobků. Mezi tyto metody patří dále také obrábění paprskem plazmy, laseru a vody, elektronovým a iontovým paprskem, ultrazvukové, elektrochemické a chemické obrábění.

Elektroerozivní obrábění využívá elektro-tepelných procesů úběru materiálu a mezinárodně je známé pod zkratkou EDM – Electric Discharge Machining [1, 4, 5].

1.1 Vývoj elektroerozivního obrábění

Počátky výzkumu erozivních vlastností elektrického výboje u elektricky vodivých materiálů začaly již v roce 1768. Anglický vědec Joseph Priestley si jako první všiml vzniku drobných kráterů na povrchu kovu při elektrickém výboji (obr. 1.1). Později se tento jev nazval elektroeroze [1, 2, 3].

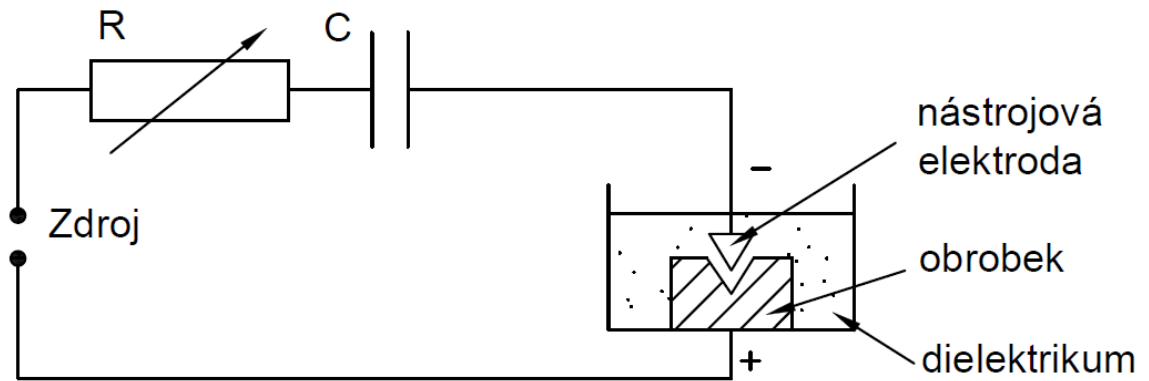


Obr. 1.1 Nákres kráterů pozorovaných Josephem Priestleyem [3].

Nejprve byla elektroeroze vnímána jako jev čistě nežádoucí, který vyvolává opotřebení elektrických kontaktů. Výzkum vedoucí k využití elektroeroze pro obrábění kovů prováděli v letech 1938 až 1944 manželé Boris a Natalya Lazarenkovi z Ruska. Na jeho základě byly definovány následující zákonitosti:

- všechny elektricky vodivé materiály podléhají elektroerozi, jak v plynném, tak i kapalném prostředí (dielektriku),
- vhodná volba parametrů rozlišuje dva typy výbojů, a to stacionární (oblouk) a nestacionární (jiskra), který je vhodný pro obrábění.

Jejich návrh zapojení (Lazarenkovo zapojení, obr. 1.2) byl používán dlouhou dobu jako zdroj elektrických výbojů při elektroerozivním obrábění [1, 2, 3].



Obr. 1.2 Lazarenkovo zapojení [2].

V průmyslu se elektroeroze začala používat mezi lety 1950 – 1954, kdy vznikaly první EDM stroje [1].

V současnosti se elektroerozivní obrábění dělí na:

- elektroerozivní hloubení (EDM Sinking),
- elektroerozivní drátové řezání (WEDM – Wire Electric Discharge Machining),
- elektroerozivní broušení (EDG – Electric Discharge Grinding) [1].

1.2 Využití elektroeroze

Základním požadavkem na obráběný materiál je jeho elektrická vodivost, která je podmínkou pro použití této technologie. Protože se jedná o technologii nevyužívající mechanickou energii pro úběr materiálu, je možné obrábět i speciální velmi tvrdé a houževnaté materiály, a to i za použití například měděných či grafitových elektrod, které dosahují výrazně menší tvrdosti. Tato technologie proto nalézá velké využití při obrábění kalených materiálů, slinutých karbidů, vyjiskřování zalomených nástrojů z obrobku, výrobě forem pro lisování či raznic nebo také úprava povrchů pro získání matného vzhledu.

Dalšími výhodami jsou možnost automatizace, velký rozsah pracovních parametrů, možnost obrábět díly s velkou tvarovou složitostí nebo velmi malých rozměrů, nedochází ke vzniku ořepů a výroba nástrojových elektrod je poměrně jednoduchá ve srovnání s konvenčními nástroji pro soustružení či frézování.

Nevýhodami technologie jsou dlouhé strojní časy, nutná přítomnost dielektrika, nepřímá úměra mezi produktivitou a kvalitou obrobku a nízká produktivita při obrábění materiálů dosahujících malé tvrdosti [1].

1.3 Princip elektroeroze

Při elektroerozivním obrábění jsou obrobek a nástrojová elektroda od sebe odděleny jiskrovou mezerou v rozmezí 0,01 mm až 0,4 mm, která se udržuje pomocí posuvového mechanismu. Obklopuje je kapalina s vysokým elektrickým odporem (dielektrikum) a jsou připojeny na generátor napěťových pulzů (obr. 1.3). Dochází mezi nimi ke vzniku rychle se opakujících periodických elektrických výbojů. Každý výboj generuje teplo, které natavuje nebo odpařuje kov obou elektrod a vytváří mikroskopické krátery. Cílem je dosáhnout co nejvyššího úběru materiálu obrobku vůči nástrojové elektrodě. Takto dochází k postupnému vzniku negativního obrazu nástroje na obrobku [1, 4, 5].

Výstupní parametry procesu elektroeroze jsou uvedeny v tab 1.1.

Tab. 1.1 Výstupní technologické parametry elektroerozivního obrábění [4, 14].

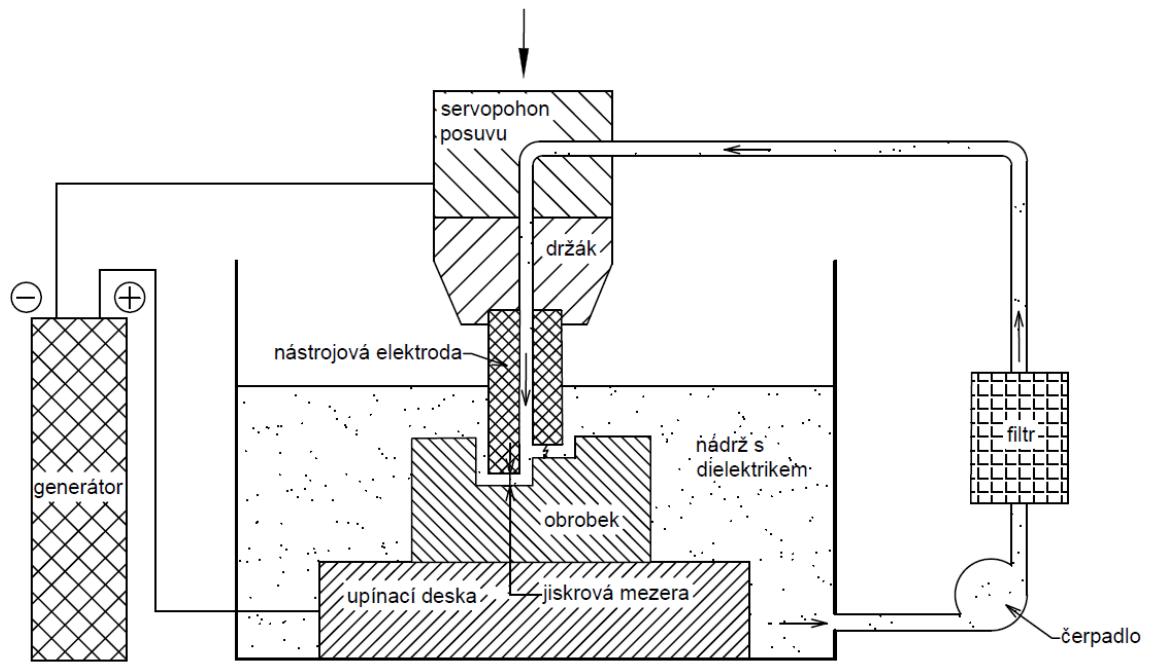
| Drsnost Ra [μm] | Stupeň přesnosti IT | Hloubka ovlivněné vrstvy [μm] | Úběr [cm ³ ·min ⁻¹] | Měrná spotřeba energie [kWh·cm ⁻³] |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------------------|---|--|
| 50 – 0,1 | 6 – 12 | 10 – 300 | 10 ⁻⁴ – 0,6 | 0,1 - 1 |

Polarita zapojení elektrod ovlivňuje intenzitu úběru materiálu a opotřebení elektrody. Při zapojení nástrojové elektrody jako katody (záporný pól) a obrobku jako anody (kladný pól) obecně platí, že s kratší dobou výboje klesá její opotřebení. Toto je nazváno kladné obrábění. V opačném případě záporného obrábění s delší dobou výboje roste opotřebení katody, proto je zapojena jako obrobek. Existují však i výjimky pro speciální kombinace materiálů obrobku a nástrojové elektrody [1,10].

Vedle výše popsaného principu se používá také elektroimpulzní a elektrokontaktní obrábění. Při elektroimpulzním se využívá obloukového výboje, kdy zdrojem pracovního proudu je pulzní (nezávislý) generátor. Nástrojová elektroda je zapojena na kladný pól a obrobek na záporný. Tímto způsobem je dosaženo velkých úbytků materiálu obrobku, při téměř nulovém opotřebení nástroje, ale kvalita povrchu se výrazně zhoršuje. Je tedy vhodné pro hrubovací operace a obrábění rozměrných výrobků [1].

Elektrokontaktní obrábění spočívá v použití obloukového výboje a malého počtu impulzů (50 až 500 Hz). Nástrojová elektroda vykonává rotační, případně přímočarý pohyb, a takto vyvolává mechanické buzení výbojů. Dochází k velkému úbytku materiálu obrobku, což má vliv na výslednou rozměrovou a tvarovou přesnost, navíc vyvolává tepelné ovlivnění do hloubky až 5 mm. Používá se například pro řezání těžkoobrobitelných materiálů, odřezávání náliček a vtoků ve slévárenství [1,5].

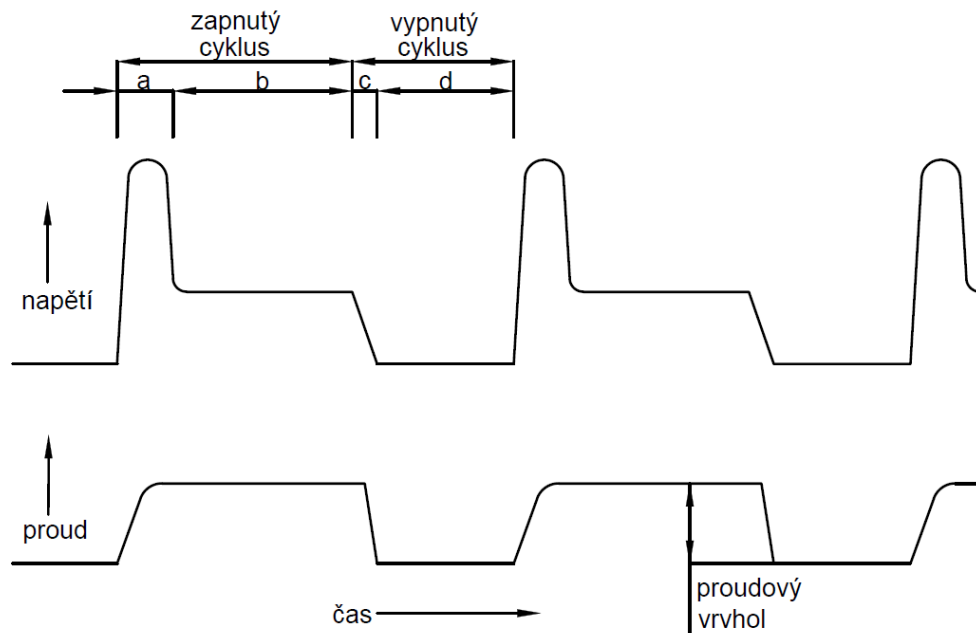
Na rozhraní elektroerozivního a elektrochemického obrábění je obrábění anodomechanické. Nástrojem je rotující kotouč, pásová pila nebo drát a je spolu s obrobkem, který je k němu přitlačován malou silou, připojen na stejnosměrný zdroj energie. Pracovní prostor je vyplněn kapalinou, která plní funkci izolátoru a chladicího média. Nejčastěji se používá křemičitan sodný (Na₂SiO₃) neboli vodní sklo. Elektrolyt vytváří mezi nástrojem a obrobkem pasivační vrstvu, která je vlivem nerovností povrchů ve výčnělcích v kombinaci s rotací nástroje stírána a dochází zde ke vzniku výboje. Další část úběru materiálu tvoří elektrochemické rozpouštění díky vhodným podmínkám pro současnou elektrolýzu [4, 5].



Obr. 1.3 Princip stroje pro elektroerozivní obrábění [1, 4].

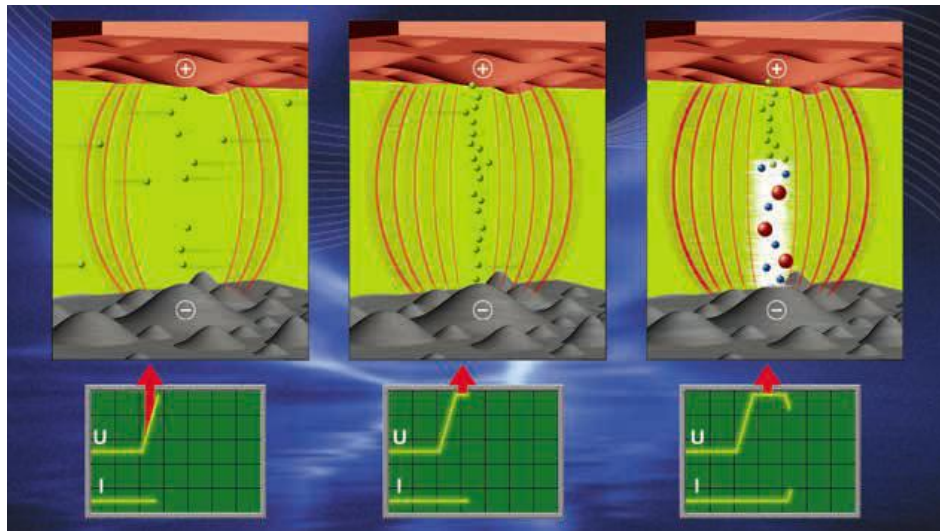
1.3.1 Průběh vzniku výboje

Proces vzniku jednoho výboje lze rozdělit do tří fází. Přípravná fáze (doba ionizace), fáze výboje, fáze vypnutí (deionizace a doběh). Průběh napětí a proudu má pro tento proces při správném chodu elektroeroze svůj charakteristický tvar (obr. 1.4).



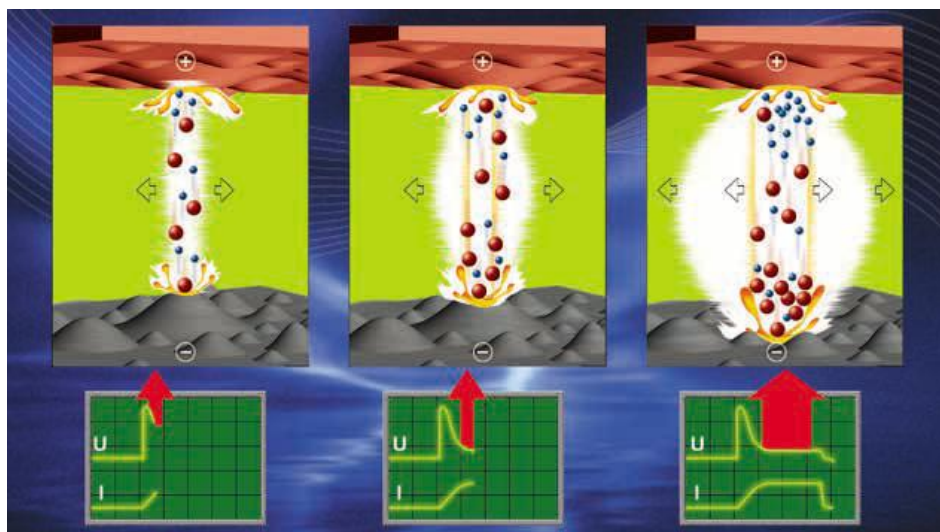
Obr. 1.4 Časový průběh jediného impulsu, a - doba ionizace, b - doba výboje, c - doba deionizace, d - doba doběhu [1, 4].

Přípravná fáze (obr. 1.5) začíná přívodem napětí na elektrody. Povrchy elektrod nejsou dokonale rovné, proto dochází ke vzniku elektrického napěťového pole, které dosahuje maximálních hodnot v místě, kde je jiskrová mezera nejmenší. Vzniká tak místo maximálního gradientu. Elektricky vodivé částice, které jsou přítomny v dielektriku, se do tohoto místa koncentrují a vytváří vodivé můstky. Napětí dosahuje nejvyšší, průrazné hodnoty. Ze záporné elektrody se uvolňují elektrony, které naráží na neutrální částice v jiskrové mezeře a tříští je. Vytváří tak kladné a záporné ionty. Tento proces se nazývá ionizace prostředí.



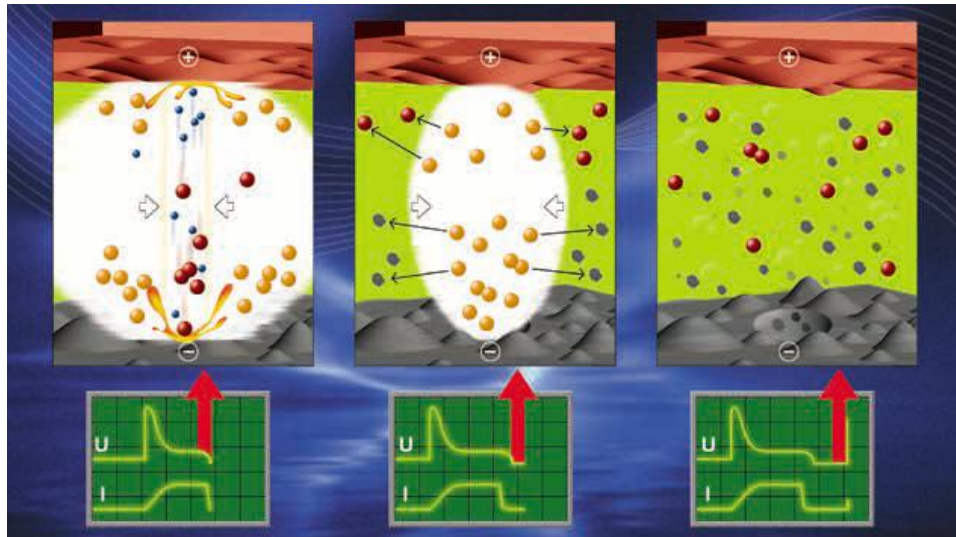
Obr. 1.5 Přípravná fáze [6].

Nastává fáze výboje (obr. 1.6), kdy se ionty koncentrují ve středu výbojového kanálu, poklesne zde odpor a začíná protékat proud. Vzniká vodivý kanál plazmy dosahující teplot až $20\,000\text{ °C}$, doba impulsu se pohybuje od 10^{-4} až 10^{-6} s. Nárazy elektronů na anodu a kationtů na katodu vytváří velké množství energie, která dosahuje až $10^7\text{ W}\cdot\text{mm}^{-2}$, a taví povrchy elektrod. Vysoké teploty způsobují růst tlaku uvnitř kanálu a jeho rozšiřování. Dochází také k vypařování dielektrika a vzniku bubliny, která expanduje. Proud dosahuje nejvyšší hodnoty a napětí se stabilizuje na tzv. zápalné hodnotě.



Obr. 1.6 Fáze výboje [6].

Po přerušení napětí nastává fáze vypnutí (obr. 1.7). Proud klesne na nulu a klesá i teplota. To způsobí pokles tlaku a kolaps bubliny. Materiál natavených elektrod je vytrháván z povrchu elektrod a vznikají charakteristické krátery. Po zániku bubliny vniká do prostoru mezi elektrodami opět dielektrikum, ochlazuje elektrody i taveninu a odplavuje ji ve formě kuliček. Dochází k deionizaci prostředí v jiskrové mezeře. Vodivé částice obsažené v dielektriku a ionty vytváří základ pro další cyklus vzniku výboje [1, 2, 7, 9].



Obr. 1.7 Fáze vypnutí [6].

Energii výboje vyjadřuje vztah (1.1) [2]:

$$W_i = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (1.1)$$

Kde: W [J] - energie výboje,
 u [V] - napětí,
 i [A] - proud,
 t [μ s] - doba trvání výboje.

A množství materiálu odebraného tímto výbojem je určeno vztahem (1.2) [2]:

$$V_i = K \cdot W_i \quad (1.2)$$

Kde: V_i [mm^3] - objem odebraného materiálu,
 K [$\text{mm}^3 \cdot \text{J}^{-1}$] - součinitel úměrnosti pro anodu a katodu,
 W [J] - energie výboje.

Celkové množství odebraného materiálu za jednotku času Q_v vyjadřuje úbytek na obou elektrodách současně (1.3) [2]:

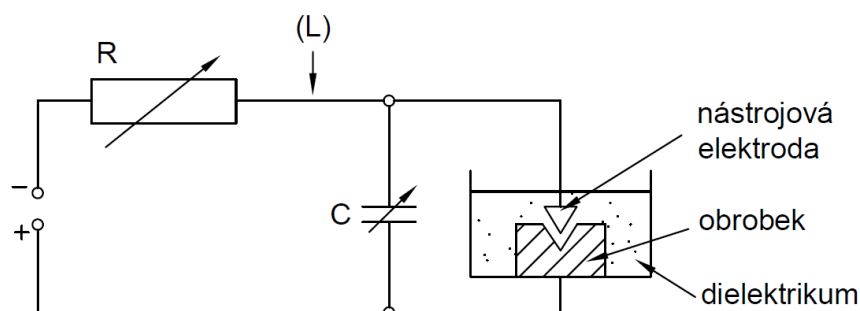
$$Q_v = K_i \cdot f \cdot \eta \cdot \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (1.2)$$

| | | | |
|------|---|---|--|
| Kde: | Q_v [$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] | - | objem odebraného materiálu, |
| | K [$\text{mm}^3 \cdot \text{J}^{-1}$] | - | součinitel úměrnosti pro anodu a katodu, |
| | f [s^{-1}] | - | frekvence výbojů, |
| | η [-] | - | účinnost elektrického výboje, |
| | u [V] | - | napětí, |
| | i [A] | - | proud, |
| | t [μs] | - | doba trvání výboje. |

1.3.2 Generátor impulzů

Generátor je základní částí každého elektroerozivního stroje, protože je zdrojem napěťových pulzů. Lze je rozdělit na závislé a nezávislé.

K nejstarším zdrojům výbojů patří generátor závislý (obr. 1.8). Jeho hlavními prvky jsou odpor a kondenzátor (Lazarenkovo zapojení). Chod spočívá v opakovaném nabíjení kondenzátoru C přes odpor R ze zdroje stejnosměrného proudu a jeho následné vybíjení formou výboje mezi obrobkem a nástrojovou elektrodou, když napětí dosáhne hodnoty průrazu. Průrazné napětí je závislé také na jiskrové mezeře, znečištění dielektrika a jeho izolačních vlastnostech. Doba přerušení přívodu napětí musí být delší než doba deionizace dielektrika mezi elektrodami, aby nedocházelo k opakovanému vzniku výbojů v jednom bodě, je tedy nutné aby dielektrikum vyplavovalo odtavené části elektrod. Obvod může být doplněn o indukčnost L , která prodlužuje dobu výboje a omezuje vybíjecí proud. Tyto generátory označujeme jako závislé, protože podmínky obrábění závisí na podmínkách v jiskrové mezeře. K výhodám patří jednoduchá a spolehlivá konstrukce, ale nevýhodou je velké opotřebení nástrojové elektrody, malá možnost regulace frekvence výbojů a nízká produktivita [1, 2, 4, 5].

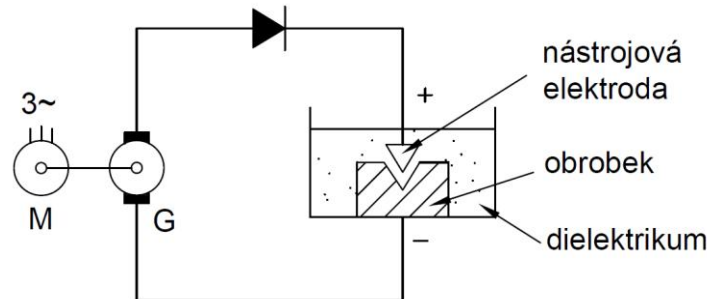


Obr. 1.8 Závislý generátor [5].

Používají se také generátory bez kondenzátorů, které v určité vzdálenosti elektrod vytváří elektrický oblouk, ne výboj. Teplota výboje může dosahovat až $10\,000\text{ °C}$ za $0,1\text{ ms}$ až $0,01\text{ ms}$, kdežto oblouk dosáhne teploty okolo $3\,600$ až $4\,000\text{ °C}$ během $0,1\text{ s}$ až $0,1\text{ ms}$ [1].

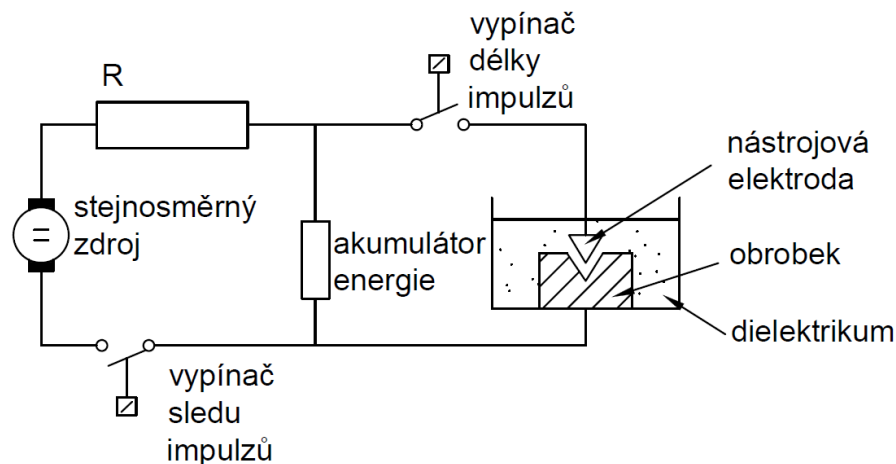
Dalším typem jsou nezávislé (pulzní) generátory (obr. 1.9), u kterých je možné nastavovat pracovní parametry eroze nezávisle na podmínkách v jiskrové mezeře. Tyto generátory lze dále rozlišit na rotační a polovodičové.

Rotační vytváří impulzy dynamem roztáčeným asynchronním motorem. Výhodami jsou stálá frekvence a vysoká efektivita procesu elektroeroze. Nevýhody jsou vysoká hlučnost a náročná regulace frekvence pulzů.



Obr. 1.9 Rotační nezávislý generátor [5].

Polovodičové nezávislé generátory (obr. 1.10) jsou dnes nejpoužívanějšími zdroji impulzů elektroeroze a jsou řízeny pomocí CNC systémů. Je možné u nich regulovat širokou škálu parametrů elektroeroze, opotřebení nástrojové elektrody klesá a impulzy jsou zpravidla delší s převládající iontovou vodivostí. Z toho důvodu se častěji používá zapojení, při kterém je obrobek katodou [1, 5].



Obr. 1.10 Polovodičový nezávislý generátor [5].

1.3.3 Nástrojové elektrody

Volba nástrojové elektrody značně ovlivňuje průběh procesu elektroeroze a jeho výsledek, jako je kvalita povrchu a jeho kontaminace materiálem elektrody, přesnost a efektivita obrábění nebo opotřebení elektrody. Na opotřebení elektrody má největší vliv teplota tavení použitého materiálu a parametry procesu elektroeroze. Nejvíce jsou opotřebovávány ostré hrany a rohy nástrojové elektrody.

Pro nástrojové elektrody se používají materiály, které mají velkou elektrickou a tepelnou vodivost, vysoký bod tavení a dobrou obrobitelnost pro výrobu tvarově složitých elektrod. Výběr materiálu nástrojové elektrody závisí na materiálu obrobku a na aplikaci, ve které bude využit.

Pro hloubení ocelí je nejvíce využíván grafit. Je dobře obrobitelný a levný, má vysokou teplotu tavení, která se pohybuje okolo 3000 °C, je chemicky stabilní, lehký a dodává se v různých zrnitostech. Obecně lze říci, že pro dokončovací operace je vhodnější jemnější grafit, který se opotřebovává pomaleji, ale zároveň má nižší rychlost úběru materiálu. Další nevýhodou je, že znečišťuje svými zplodinami dielektrikum. [1, 4, 14].

Dalším hojně využívaným materiálem je měď, která má dobrou elektrickou a tepelnou vodivost, vykazuje menší opotřebení a teplota tavení je 1083 °C. Používá se zejména pro obrábění karbidů, nejčastěji karbidu wolframu, a pro dokončovací operace s drsností povrchu pod 0,5 Ra [1].

Pro hloubení úzkých otvorů je možné použít mosaz, která je levná a snadno obrobitelná. Vykazuje však velké opotřebení.

Wolfram je nákladný materiál používaný zejména pro hloubení malých otvorů s průměrem do 0,2 mm. Má vysokou teplotu tavení 3390 °C a nekontaminuje materiál obrobku.

Mezi nákladné materiály nástrojové elektrody patří také kombinace měď – wolfram a stříbro – wolfram. Používají se pro speciální aplikace, jako je hloubení úzkých žeber a otvorů, a pro přesné obrábění. Jedná se o velmi křehký materiál, proto jej není možné po slinování už dále obrábět [1, 4].

Elektrody se vyrábí pomocí obrábění, lisování, práškové metalurgie, galvanoplastiky, lití nebo pomocí 3D tisku, kdy se využívá metody SLS (Selective Laser Sintering) neboli selektivní spékání kovového prášku laserem [4, 15].

1.3.4 Dielektrická kapalina

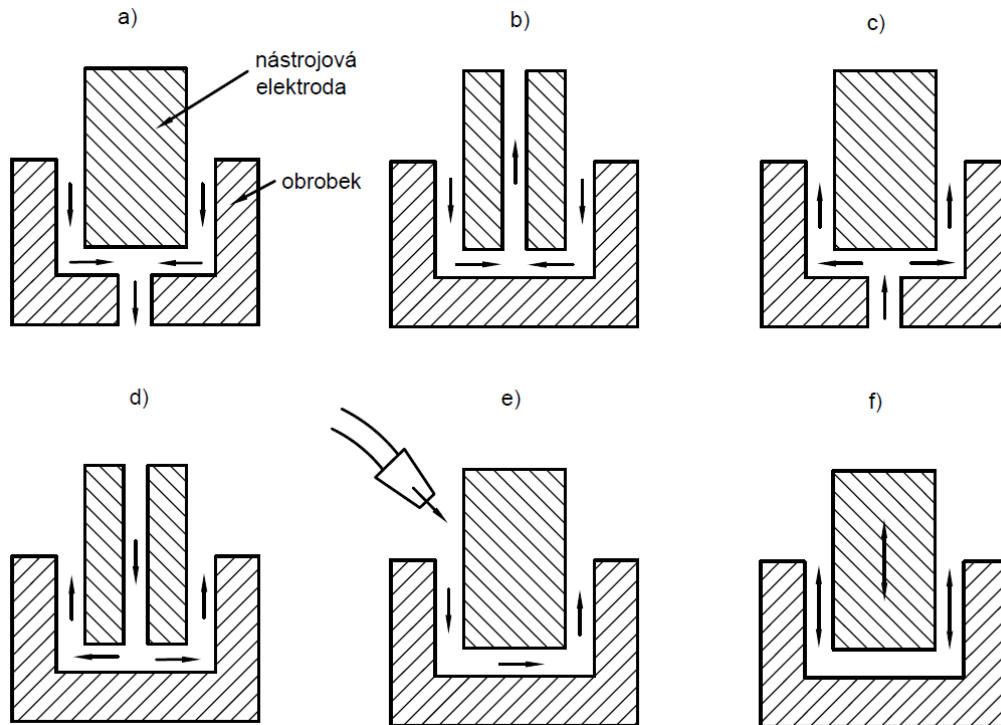
Dielektrická kapalina hraje důležitou roli v procesu elektroeroze. Jedná se o kapalinu s vysokým elektrickým odporem, která zamezuje průchodu proudu mezi elektrodami, dokud od sebe nejsou vzdáleny o jiskrovou mezeru. Má za úkol odvádět produkty eroze z míst výboje a ohraničuje výbojový kanál. Musí splňovat následující vlastnosti:

- elektrický odpor,
- chemická neutralita, která zamezuje vzniku koroze,
- vhodná viskozita a dobrá smáčivost, pro rychlou obnovu izolace po výboji,
- vysoký bod vzplanutí a vysoká tepelná vodivost,
- ekologická a hygienická nezávadnost,
- nízká cena [1, 5, 7].

Tyto vlastnosti splňují:

- kapaliny na bázi petroleje,
- strojní a transformátorové oleje,
- petrolej používaný především při hloubení,
- deionizovaná destilovaná voda, které se využívá při drátovém řezání [1, 2, 5].

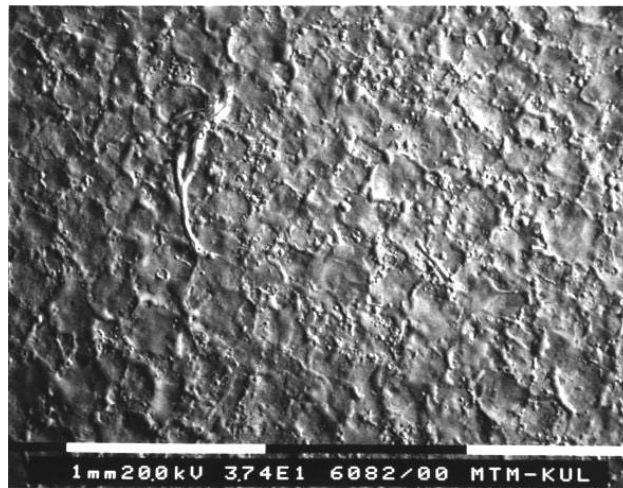
Pro správnou funkci je nutná správná teplota dielektrika, proudění mezi nástrojovou elektrodou a obrobek a čištění přes filtr. Proudění lze docílit více způsoby (obr. 1.11) [1,5,8].



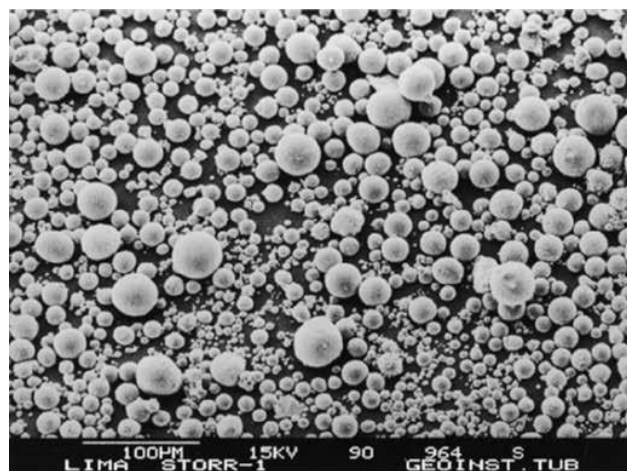
Obr. 1.11 Proudění dielektrika mezi obrobek a nástrojovou elektrodou, a) sání skrze obrobek, b) sání skrze nástrojovou elektrodu, c) vyplachování obrobek, d) vyplachování nástrojovou elektrodou, e) vnější vyplachování tryskou, f) pulzní vyplachování [1, 5, 8].

1.3.5 Vlastnosti povrchu obrobku po elektroerozivním obrábění

Povrch obrobeného materiálu má po elektroerozi charakteristický matný vzhled tvořený krátery (obr. 1.12), které jsou výsledkem jednotlivých výbojů, a odpad tvoří ztuhlé kuličky roztaveného materiálu (obr. 1.13). Kvalita povrchu je závislá na parametrech obrábění, jako je proud, napětí, délka výboje, polarita, také na kombinaci materiálů nástrojová elektroda - obrobek a na dielektriku. Při rostoucím proudu a delší době výboje vznikají krátery, které jsou hlubší a širší. Výsledný povrch dosahuje horší drsnosti, ale proces úběru materiálu je rychlejší, což je vhodné pro hrubování. V opačném případě při použití nižšího proudu a kratší doby výboje je povrch kvalitnější, ale za mnohem delší strojní čas a vyšší opotřebení nástrojové elektrody. Toho se využívá při dokončovacích operacích [1].



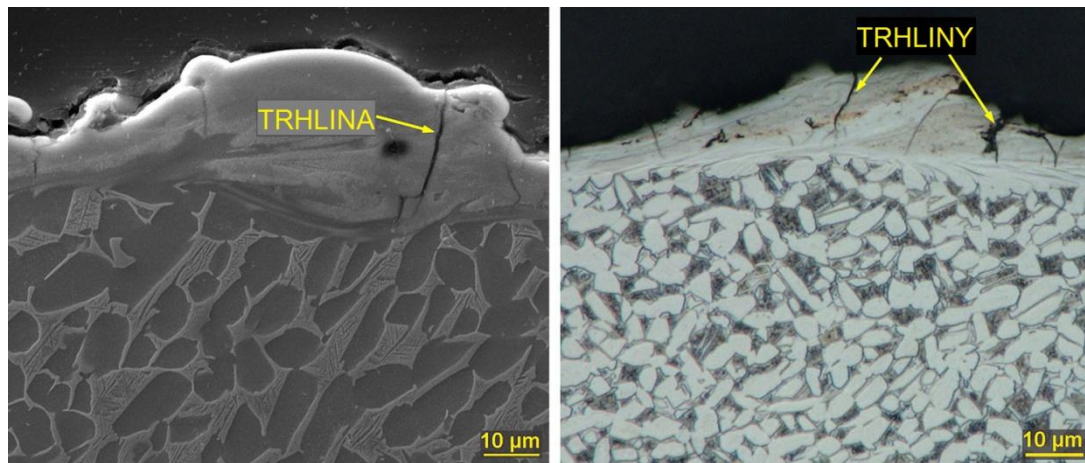
Obr. 1.12 Textura povrchu tvořená krátery po elektroerozivním hloubení [11].



Obr. 1.13 Odpad elektroeroze tvořený ztuhlými kuličkami roztaveného materiálu nástrojové elektrody a obrobku [6].

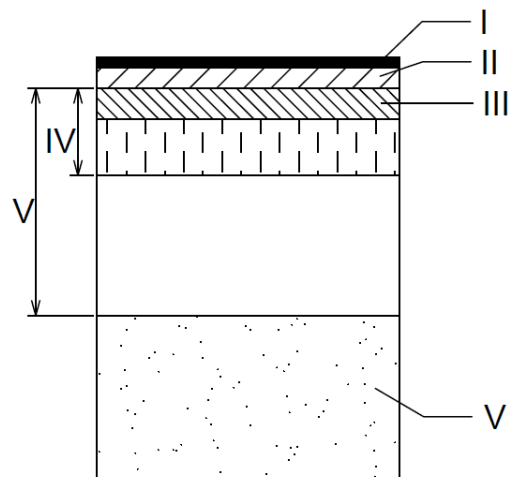
Výsledná přesnost obrobené plochy je dána kinematickou přesností stroje, přesností zhotovené elektrody, přesností nastavení polohy obrobku vůči nástrojové elektrodě, dielektrikem a jiskrovou mezerou. Rozměry výsledného povrchu se od nástrojové elektrody liší o velikost jiskrové mezery. Její velikost je závislá na pracovních parametrech obrábění. Pro vyšší energie výboje je mezera zpravidla větší. Je nutné brát v potaz také postupné opotřebovávání nástrojové elektrody [1].

Při procesu elektroeroze působí na obrobek vysoké teploty, které vytváří tepelně ovlivněnou vrstvu zasahující do různých hloubek, závislých na parametrech obrábění. Následné rychlé ochlazení dielektrikem způsobuje metalurgické změny v povrchové vrstvě a vznik zbytkových tahových napětí, které mohou být zdrojem rozšíření trhlin (obr. 1.14). Z těchto důvodů často elektroerozivní obrábění následuje obrábění mechanické, nejčastěji broušení [1, 3].



Obr. 1.14 Trhliny v příčném řezu slitiny titanu Ti- 6Al-4V po elektroerozivním drátovém řezání [12].

Povrchovou vrstvu materiálu po EDM lze rozčlenit dle obr. 1.15.

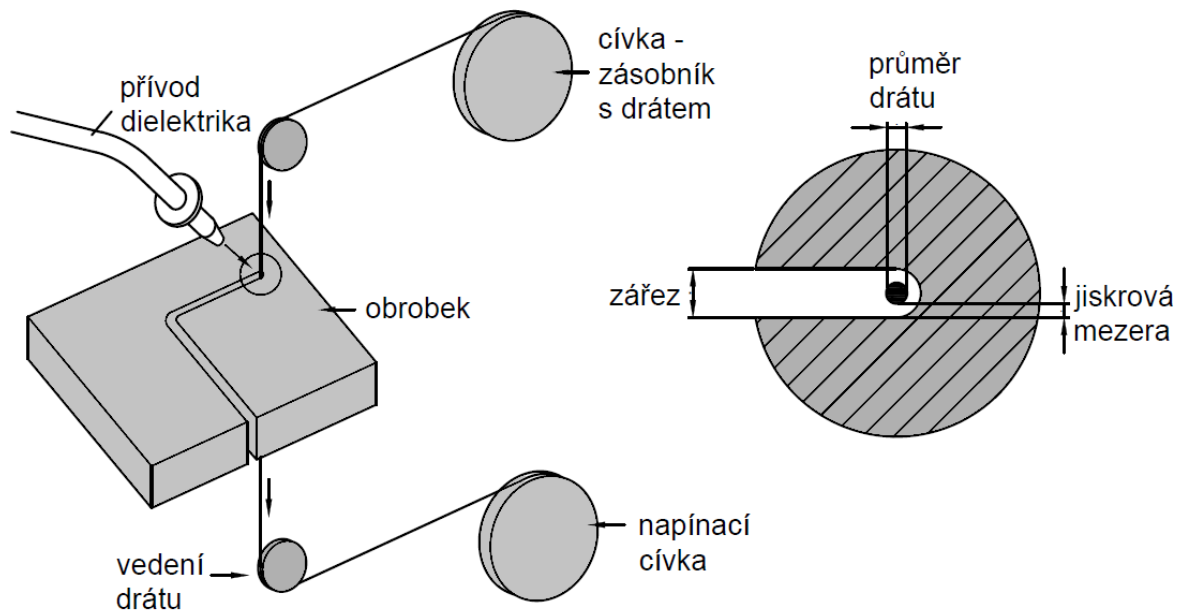


Obr. 1.15 Charakteristické vrstvy povrchu materiálu po EDM, I - mikrovrstva nasycená částicemi dielektrika pomocí difuze, II - vrstva nasycená materiálem elektrody, III - znovu ztuhlá tavenina, bílá vrstva, IV - tepelně ovlivněná vrstva, V - vrstva plastické deformace vyvolané tlakovými rázy impulzů, VI - základní materiál [1, 2].

Bílá vrstva je silně nauhličená tavenina. Uhlík vzniká pyrolýzou (tepelným rozpadem) dielektrika a putuje taveninou do nižších vrstev základního materiálu. Uhlíkové částice vedou ke vzniku karbidů a tím pádem zvýšení tvrdosti vrstvy až na 60 HRC. Často zde dochází ke vzniku trhlin kolmých na povrch, které jen zřídka zasahují do dalších vrstev pod ní. Vedle uhlíku základní materiál kontaminuje také materiál nástrojové elektrody. Kontaminaci povrchové vrstvy lze využít také jako jev žádoucí, například pro legování. Výsledný povrch získává lepší vlastnosti, jako je vyšší tvrdost, odolnost proti opotřebení a korozi. K tomu se využívá speciálních elektrod lisovaných z prášků legujících prvků nebo dielektrik, ve kterých jsou legující prvky rozpuštěny [1, 2, 11].

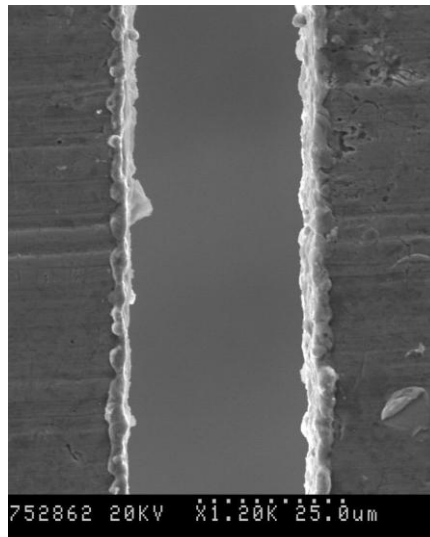
1.4 Elektroerozivní drátové řezání

Elektroerozivní drátové řezání, známé pod zkratkou WEDM je nejrozšířenějším využitím elektroerozivního obrábění. Princip metody spočívá v použití tenkého drátu jako nástrojové elektrody, který se odvíjí pomocí systému kladek a musí být napínán (obr. 1.16). Drát je v neustálém pohybu, protože dochází k jeho opotřebení a je možné jej použít pouze jednou. Nejčastěji je používají mosazné nebo měděné dráty, u kterých je nutná vysoká elektrická vodivost, pevnost v tahu a také lomová houževnatost, která má velký vliv na možné přetrhnutí drátu. Ve speciálních případech je možné využití drátů s ocelovým, mosazným či měděným jádrem povlakovaným kombinací vrstev materiálů jako je zinek, stříbro, měď nebo mosaz. Při drátovém řezání se jako dielektrikum používá nejčastěji deionizovaná destilovaná voda, která však může vést ke vzniku elektrolytické koroze. Používají se proto speciální generátory, které periodicky střídají polaritu a zabraňují tak oxidaci anody [1, 9, 11].



Obr. 1.16 Princip elektroerozivního drátového řezání [1].

Využití elektroerozivního drátového řezání je široké. Používá se k dělení velmi tvrdých materiálů s minimální šířkou řezu (obr. 1.17), jako je například i elektricky vodivá keramika nebo slinuté karbidy, pro výrobu střížných a lisovacích nástrojů nebo pro výrobu ostrých rohů. Speciální využití nalézá ve výrobě mikro komponentů, forem pro lisování plastů a metalurgických forem (obr. 1.18) [1, 4, 17, 20].



Obr. 1.17 32 μm široká drážka obráběná drátem o průměru 30 μm [16].



Obr. 1.18 Ukázka výrobků elektroerozivního drátového řezání [17].

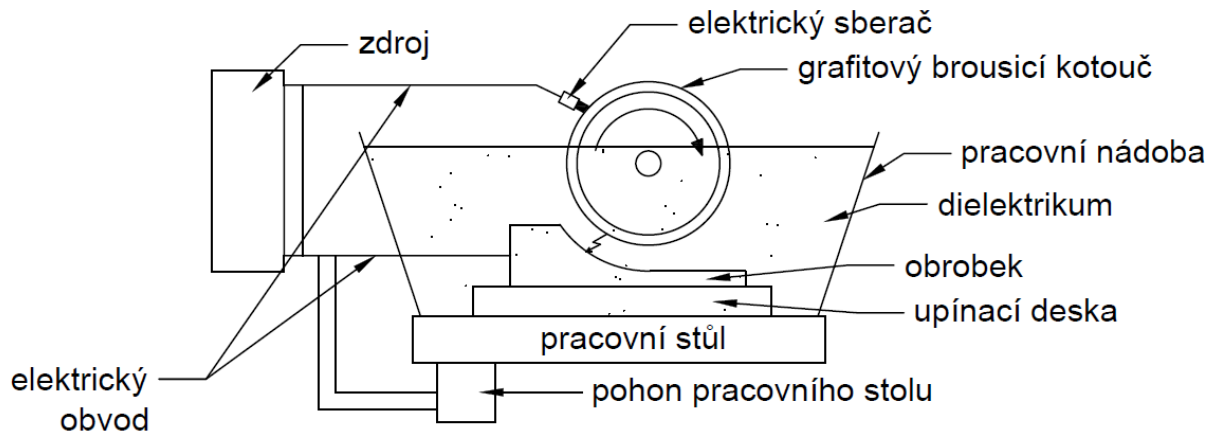
Mezi přední výrobce strojů pro elektroerozivní drátové řezání patří japonské firmy FANUC (obr. 1.19), Sodick a Mitsubishi, ale také španělská firma ONA [9].



Obr. 1.19 Elektroerozivní drátová řezačka FANUC ROBOCUT α -C600iB [24].

1.5 Elektroerozivní broušení

Nástrojovou elektrodu při procesu elektroerozivního broušení tvoří rotující kotouč vyrobený z mosazi nebo grafitu. Obrobek je zapojený na kladný pól a ponořený v dielektriku (obr. 1.20). Využívá se hlavně pro broušení velmi tvrdých materiálů a karbidů, tenkostěnných výrobků, kde klasické broušení může způsobovat deformace, nebo tvarové broušení. Elektroerozivní broušení dosahuje přesnosti až 0,001 mm díky velmi malým úběrům materiálu [1].



Obr. 1.20 Princip elektroerozivního broušení [1].

1.6 Elektroerozivní hloubení

Podstata technologie byla popsána již v předešlých kapitolách. Jedná se o první princip využití elektroerozivního účinku elektrického proudu a z něj poté vznikly další technologie jako elektroerozivní řezání nebo broušení [1].

1.6.1 Nástrojové elektrody pro hloubení a jejich pohyb

Nástrojové elektrody používané v elektroerozivním hloubení mohou být různých tvarů a velikostí, které závisí na jejich konkrétním použití. Na výrobu elektrod je kladen velký důraz, protože přesnost jejího sestavení a jakost jejího povrchu určuje výslednou kvalitu obráběného dílu. To platí především pro tvarové elektrody. Časté je použití dvou elektrod a to hrubovací a dokončovací, protože jiskrová mezera je pro hrubování větší a je nutné použití rozměrově jinak řešené elektrody. Další problém s korekcí jiskrové mezery je ten, že její čelní a boční hodnota se liší. Čelní jiskrová mezera je přímo určena ovládacím systémem a je obecně větší. Boční hodnotu ovlivňuje mnoho faktorů, například výška proudového impulsu, kombinace obráběného materiálu a nástrojové elektrody, napětí a další [1, 2, 6].

Důležitou skutečností, se kterou je při volbě nástrojové elektrody potřeba počítat je opotřebení nástrojové elektrody, ke kterému jsou nejvíce náchylné ostré hrany a špičky. Pro vyhodnocení relativního opotřebení nástrojové elektrody m_v se používá poměr objemového úbytku nástrojové elektrody V_E vůči úbytku objemu materiálu obrobku V_M v procentech [1, 4].

$$m_v = \frac{V_E}{V_M} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

- Kde: m_v [%] - relativní opotřebení nástrojové elektrody,
 V_E [m³] - objemový úbytek nástrojové elektrody,
 V_M [m³] - objemový úbytek materiálu obrobku [1].

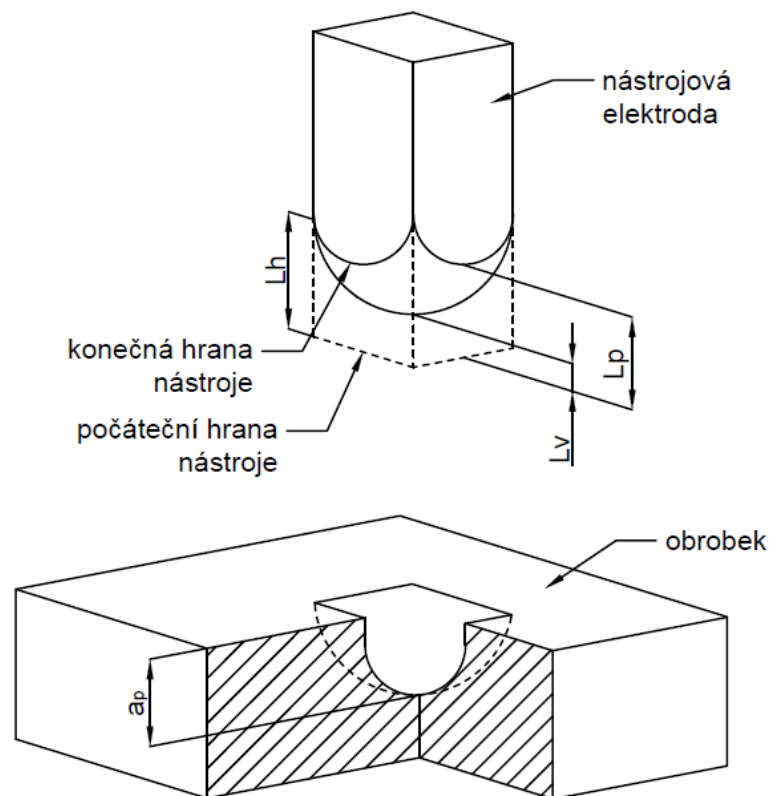
Další charakteristiky opotřebení lze určit následovně (obr. 1.21) [1]:

$$\text{stupeň opotřebení hrotu} = \frac{a_p}{L_v} \quad (1.4)$$

$$\text{stupeň opotřebení hrany} = \frac{a_p}{L_h} \quad (1.5)$$

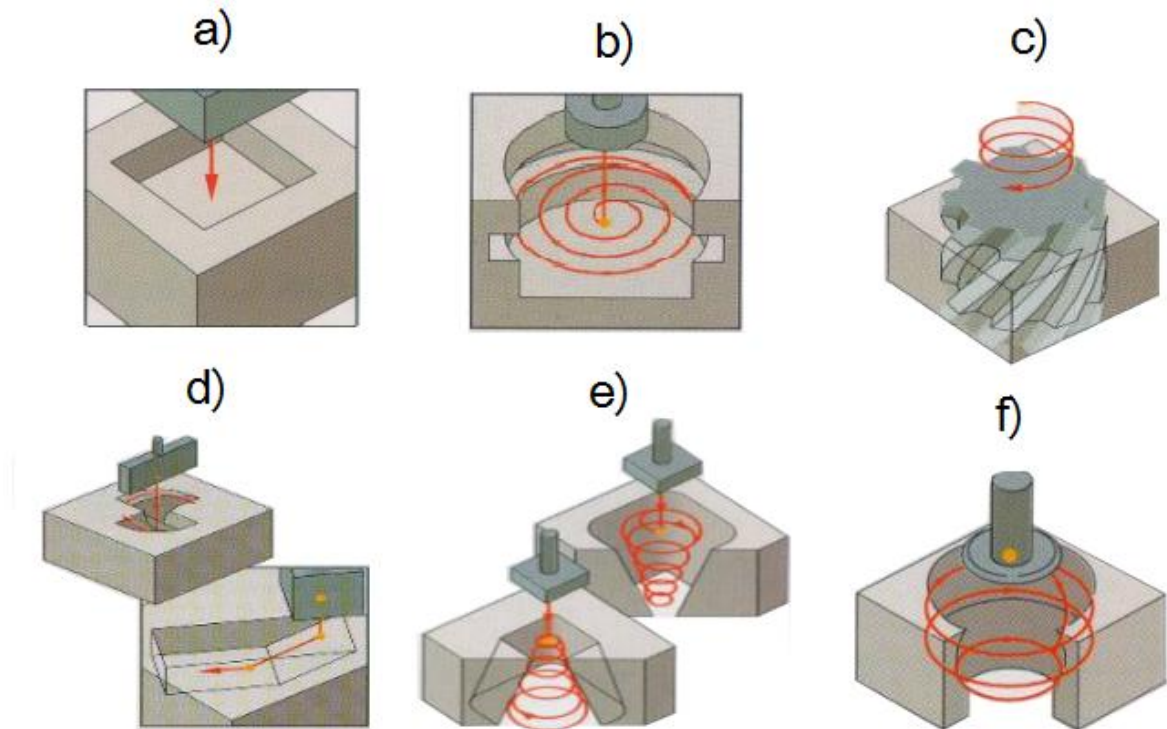
$$\text{stupeň opotřebení boční strany} = \frac{a_p}{L_b} \quad (1.6)$$

- Kde: a_p [mm] - hloubka řezu,
 L_v [mm] - opotřebení hrotu,
 L_h [mm] - opotřebení hrany,
 L_p [mm] - opotřebení boční strany [1].



Obr. 1.21 Opotřebení nástrojové elektrody [1].

Nástrojová elektroda může být tvarovaná přímo na daný zrcadlový obraz výsledného obrobku nebo je možné použít elektrody zjednodušené, které požadovaný tvar vytvoří za pomoci kombinace posuvů nejen svislé osy z, ale také os x a y, případně rotace osy c (obr. 1.22). Pohyb elektrody v rovině xy, který tak zvětšuje rozměry zhloubení, se nazývá planetování a využívá se často pro dosažení lepší jakosti povrchu bočních částí zhloubení a čela [5, 6, 8, 20].



Obr. 1.22 Možnosti pohybu nástrojové elektrody, a) přímočarý pohyb osy z, b) expanzní pohyb v rovině xy, c) pohyb do šroubovice, d) pohyb dle určeného vektoru, e) kuželový pohyb, f) sférický pohyb [20].

1.6.2 Materiály nástrojových elektrod

Dva nejvyžívanější materiály pro elektroerozivní hloubení jsou měď a grafit. Pro speciální operace se využívají materiály, jako je wolfram nebo kombinace měď – wolfram a měď – stříbro [4, 21].

Měď je prvním využívaným materiálem pro elektroerozivní obrábění. Oproti grafitu není tak náchylná na špatné podmínky proudění dielektrika a na vznik zápalů. Při využití pohybu planetování lze měděnou elektrodou získat zrcadlový povrch, což se využívá v malých dutinách, které je obtížné leštit. Při přidání wolframu získává elektroda vyšší odolnost vůči opotřebení. Tyto elektrody se složitě obrábí a jsou výrazně dražší. Měděné elektrody je obtížnější obrábět, protože mají tendenci k ulpívání na nástroj, při broušení často zanesou brousicí kotouč a vznikají tak velké otřepty, které je nutné následně odstranit. Lze je ale vyrábět i alternativními způsoby, například leptáním kyselinou, tvářením, či kování. Pro hluboké díry se využívají duté měděné elektrody s jedním nebo více kanály pro přívod dielektrika, které zároveň rotují ve směru osy c (obr. 1.23) [1, 21, 22].

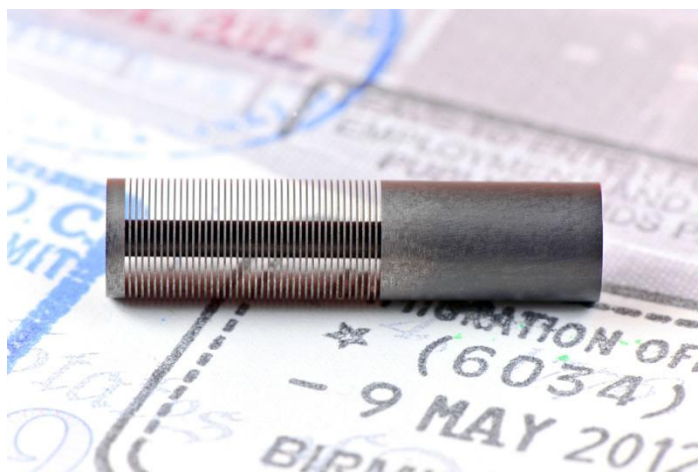


Obr. 1.23 Multi-kanálová měděná elektroda [23].

Do popředí se v posledních letech dostávají elektrody z grafitu, které se výborně obrábí na HSC frézách nebo pomocí elektroerozivního řezání, méně se opotřebovávají, rychlost obrábění je vyšší a jsou vhodné pro výrobu tvarově složitých elektrod (obr. 1.24), jako jsou například žebrové elektrody (obr. 1.25) [1, 18, 19, 21].



Obr. 1.24 Ukázka tvarové elektrody z grafitu [18].



Obr. 1.25 Žebrová elektroda z grafitu [19].

1.6.3 Elektroerozivní hloubicí stroje

V současnosti je na trhu možné najít hloubicí stroje různých značek a parametrů, které lze vhodně zvolit pro požadované využití ve výrobě. Je možné si vybrat od špičkových strojů, jako jsou hloubičky pod značkou GF nebo například EXERON. Tyto stroje jsou velmi drahé, a pokud není naplno využít jejich potenciál, je vhodnější volit značky méně nákladné, mezi které patří například hloubička české značky PENTA EDM.

1.6.3.1 GE

Jedná se o švýcarskou společnost, jejíž kořeny sahají až do roku 1802. V roce 1983 tato společnost získala nadpoloviční většinu akcií jiné švýcarské společnosti zabývající se elektroerozivním obráběním značky Charmilles a v roce 1996 společnost získala také značku AGIE, která byla založena v roce 1954 a patřila k prvním zástupcům výrobců EDM strojů na světě. V roce 2007 došlo ke sloučení značek pod název GF AgieCharmilles a později v roce 2014 pod název GE Machining Solutions. Nyní nabízí hloubicí stroje s názvem AgieCharmilles rozdělené do 4 sérií. FORM E série nabízí nejlepší poměr ceny a výkonu ve dvou velikostech pracovního prostoru (obr. 1.26). Je využívána pro hloubení forem, děr a specifických aplikací v automobilovém, leteckém nebo elektrotechnickém průmyslu. FORM P série je primárně určena pro hloubení úzkých žebér s vysokou rychlostí úběru při zachování kvality. FORM S série se zabývá oblastí mikro obrábění s velkým důrazem na přesnost polohování. FORM X série zaručuje vysokou přesnost výroby pro velmi přesné aplikace, která kontroluje kolísání teploty v procesu [25].



Obr. 1.26 AgieCharmilles FORM E 600 [25].

1.6.3.2 ONA

Nejstarší společností zabývající se výrobou EDM strojů je španělská značka ONA. Založena byla v roce 1952 a už v roce 1955 vyvinula první hloubičku model ONA WSM-4.5. V roce 1981 vyvinula jako první CNC řízení pro elektroerozivní hloubení: CNC ONA POLISPARK. Díky těmto dlouholetým zkušenostem patří ke světové špičce, která se zabývá vývojem nových řešení v oblasti elektroeroze. Její stroje se rozdělují do tří sérií. QX standard pro vysokou efektivitu obrábění při zachování nízkého opotřebení nástrojové elektrody (obr. 1.27), QX modular s velkým pracovním prostorem a modulární konstrukcí, která umožňuje různé konfigurace dle přání zákazníka, a QXF/NXF standart pro vysokou přesnost obrábění [29].



Obr. 1.27 ONA QX6 [29].

1.6.3.3 Exeron

Jedná se o německou společnost, která byla založena v roce 1966. Zabývá se výrobou vysokorychlostních soustruhů a právě elektroerozivních hloubiček (obr. 1.28). Vyniká vysokou efektivitou výroby a nízkým opotřebením elektrody. Používá řídicí technologii MF30 určenou pro práci s dotykovou obrazovkou. Českým dealerem této značky je firma PENTA EDM [14, 28].



Obr. 1.28 Exeron EDM 310 MF 30 [14].

1.6.3.4 Sodick

Japonská společnost je na trhu od roku 1976 a v současné době je populární hlavně v USA. Nabízí celou řadu variant strojů pro hloubení s různou velikostí pracovní plochy, přesností obrábění, efektivitou a dalších parametrů, které se odráží na výsledné ceně stroje. Pro posuv pracovní plochy jsou používány lineární pohony (obr. 1.29) [26].



Obr. 1.29 Sodick AG200L [26].

1.6.3.5 Mitsubishi

Další velká japonská společnost, založena v roce 1954. Zajišťuje zázemí velké globální korporace a mnoho inovací. Nabízí mimo jiné také velké portálové hloubičky typu gantry (obr. 1.30) a další typy hloubiček, které jsou určeny pro vysoce přesné obrábění, mikro obrábění, vysokorychlostní obrábění nebo obrábění velmi malých děr [27].



Obr. 1.30 Gantry Eagle 1400 [27].

1.6.4 Využití elektroerozivního hloubení

Elektroerozivní hloubení patří k nekonvenčním technologiím, a proto i jeho využití je specifické. V posledních letech právě těchto specifických těžko vyrobitelných součástí přibývá vzhledem k vysokým nárokům na vlastnosti materiálů, na přesnost, a také snaze o zmenšování součástí a tím vznik velmi malých tvarových prvků při zachování jejich funkce zejména v elektrotechnickém průmyslu. Další výhodou je možnost obrábět materiál, který byl už tepelně zpracován, protože pro elektroerozi není tvrdost či pevnost ovlivňujícím faktorem procesu. V případě elektroeroze musí obráběný materiál vždy splňovat jedno nejdůležitější pravidlo, a to je jeho elektrická vodivost a s klesající vodivostí obráběného materiálu zároveň klesá efektivita elektroeroze. Přesto všechno se stále jedná o metodu, v porovnání s třískovým obráběním, nákladnou a časově náročnou, která je výhodná v případech velké složitosti součástí nebo nemožnosti použití jiné metody, a pro velké série není zcela vhodná [1, 2].

Nejrozšířenější využití elektroerozivního hloubení je ve výrobě forem pro kovové nebo plastové odlitky. Materiál těchto forem má vysoké nároky na tepelnou odolnost, pevnost i chemickou stálost a svým tvarem jsou tyto formy často vysoce složité. Takové formy se můžou skládat i z několika stovek jednotlivých částí a některé tyto části, či pouze určité prvky tvaru formy, je možné v požadované kvalitě vyrobit pouze pomocí elektroeroze. Jedná se hlavně o výrobu drážek, žeber či hlubokých dutin [28, 29].



Obr. 1.31 Forma pro výrobu pneumatik [25].

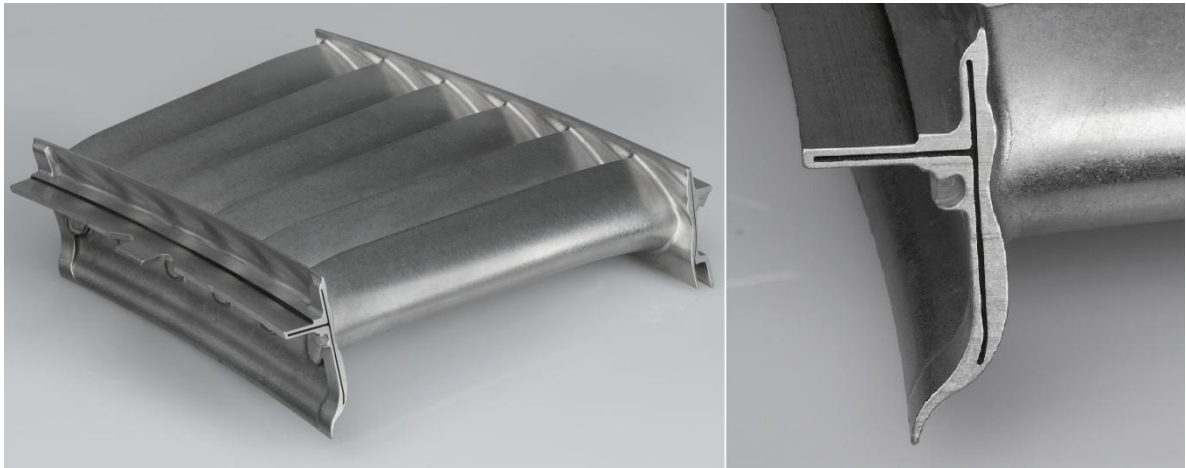
Další nástrahou výroby forem jsou rohová zaoblení, která se pohybují pod 0,5 mm. Třískovým obráběním je jejich zhotovení téměř nemožné a je nutná pomoc elektroeroze. Příkladem jsou formy pro zimní pneumatiky, pneumatiky pro nákladní auta nebo autobusy, které takovéto prvky obsahují a jsou většinou vyrobeny ze slitin oceli, které pro třískové obrábění představují výzvu (obr. 1.31). Používá se tedy kombinace hrubého frézování s následným tvarovým dokončením pomocí elektroerozivního hloubení. Tímto využitím v automobilovém průmyslu nekončí. Mnoho komponentů interiéru a exteriéru, jako jsou madla, mřížky, disky kol, ale také mechanických hliníkových prvků, jako jsou převodovky nebo spojky, se vyrábí ve formách a jejich složitost roste. Právě obrábění kovacích zápustek, které jsou povrchově nitridovány pro získání vyšší tvrdosti, odolnosti proti opotřebení a rozměrové stabilitě, je náročný úkon a vyžaduje elektroerozivní obrábění, protože je potřeba tyto povrchově nitridované formy kvůli častému opotřebení upravovat na daný rozměr a tvar. Výrobou exteriérových a interiérových dílů se zabývá například španělská firma MAIER (obr. 1.32), která uvádí, že přibližně 20 % formy je obráběno pomocí EDM a zbylých 80 % vysokorychlostním frézováním [25, 29].



Obr. 1.32 Přední mřížka vozu značky Mercedes vyrobena firmou MAIER s pomocí hloubičky ONA QX6 [29].

Vedle využití v automobilovém průmyslu se elektroeroze využívá také ve farmaceutickém průmyslu, kde jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu, přesnost a zdravotní nezávadnost materiálů. I zde je využito toho, že elektroeroze dokáže tyto speciální materiály dle požadavků obrobit. Využívá se toho například ve výrobě kloubních náhrad nebo chirurgických nástrojů. Konkrétně hlavně při výrobě slepých hlubokých děr s malým průměrem a zakřivených nebo tvarově složitých forem [25, 28, 30].

Stěžejní je pro elektroerozivní obrábění letecký průmysl, který speciální materiály využívá nejdéle a nejvíce a zároveň nároky na přesnost a kvalitu jsou nejvyšší. Všechny již zmíněné nástrahy konvenčního obrábění se zde promítají, jako jsou hluboké slepé díry malých průměrů, složité tvary, ostré rohy nebo úzká hluboká žebra, a elektroeroze je proto nepostradatelnou součástí výroby prvků turbín a dalších částí motoru (obr. 1.33). Elektroerozivního obrábění využívají největší světové společnosti zabývající se leteckým průmyslem, například Rolls Royce, General Electric, Honeywell, Eurojet, Pratt & Whitney a další [25, 28, 30].



Obr. 1.33 Jeden segment vodicích lopatek trysky a detail drážky, vyrobené pomocí EDM, pro vložení těsnění mezi jednotlivé segmenty tvořící celou turbínu [29].

2 EXPERIMENTÁLNÍ ELEKTROEROZIVNÍ HLOUBENÍ

Ve velkém se elektroerozivního obrábění, jak bylo řečeno v předchozích kapitolách, využívá v leteckém průmyslu. Jednou z nástrah je nárůst využití monolitických součástí, které představují výhodu díky zvýšení efektivnosti motorů a snížení náchylnosti ke vzniku trhlin, ale jsou tvarově velmi složité. Nejpoužívanější jsou titanové, niklové, či kobaltové superslitiny, které mají velkou tepelnou odolnost, odolnosti vůči oxidaci a korozi a vysokou tvrdost. Při procesu elektroeroze nedochází ke kontaktu mezi obrobkem a nástrojem, proto je možné tyto těžkoobrobitelné, velmi tvrdé materiály s její pomocí obrábět. Díky tomuto bezkontaktnímu obrábění nedochází ke vzniku řezných sil, což navíc pomáhá zlepšovat přesnost obrábění. Pro letecký průmysl je také důležité, aby nedocházelo ke kontaminaci povrchu obrobku materiálem elektrody nebo dielektrika, a tak ke změnám vlastností jeho povrchové vrstvy a vzniku možných trhlin, což přestavuje pro elektroerozivní obrábění výzvu, ale díky správným nastavením obrábění a novým typům generátorů jsou tyto problémy eliminovány. Právě vlastnosti povrchové vrstvy pro letecký materiál Nimonic 263 po elektroerozivním hloubení bylo cílem prozkoumat a najít tak vhodné parametry nastavení stroje [13, 31].

2.1 Použité vybavení pro elektroerozivní hloubení

Zázemí pro výrobu vzorků poskytla firma Penta Trading, spol. s.r.o., která zajistila letecký materiál, elektrody, dielektrikum a hlavně poskytla firemní elektroerozivní hloubičku PENTA 433GS CNC a odborný dohled.

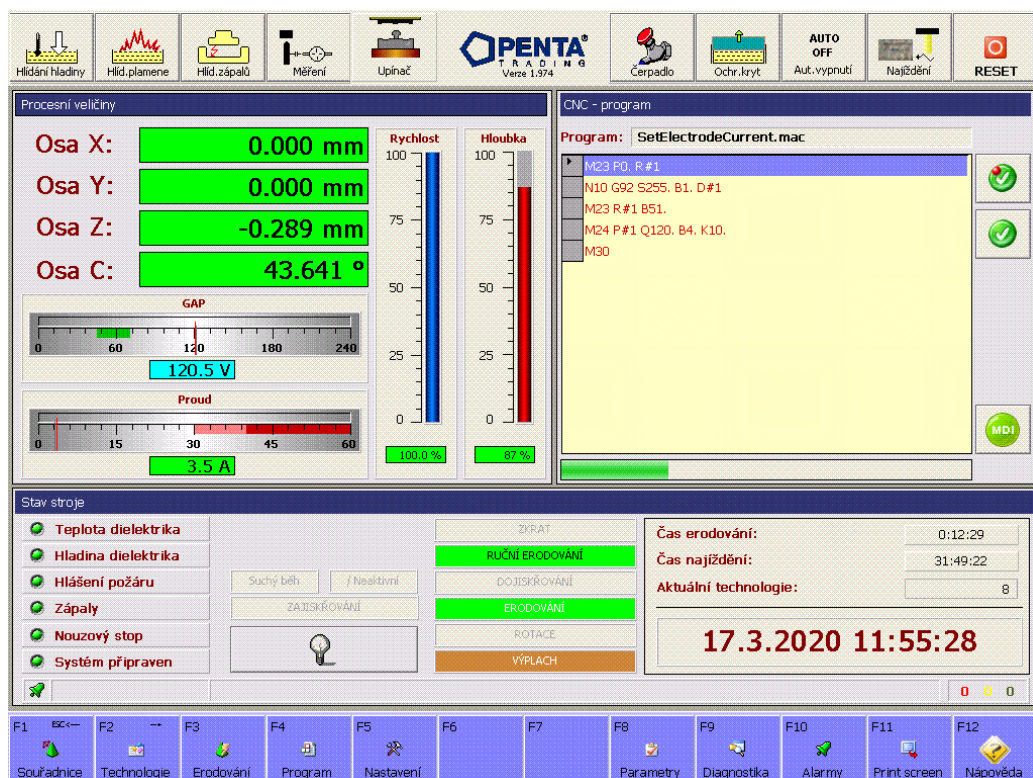
Hloubička PENTA 433GS CNC (tab. 2.1, obr. 2.1, obr. 2.2, obr. 2.3, obr. 2.4) je českým výrobkem s německým řídicím systémem BECKHOFF a digitálními střídavými servomotory. Stroj má konstrukci pevného stolu a pohyblivého ramene s přesným lineárním vedením a kuličkovými šrouby. Používá výkonný generátor PGM2, který poskytuje proudové stupně od 0,5 A do 300 A. Zajišťuje několikastupňovou ochranu proti zápalu a zkratu. Proudění dielektrika mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem je zajištěno pulzním pohybem nástrojové elektrody a čerpadlem, které zajišťuje cirkulaci dielektrika v pracovní vaně [14].

Tab. 2.1 Technická data hloubičky PENTA 433GS CNC [14].

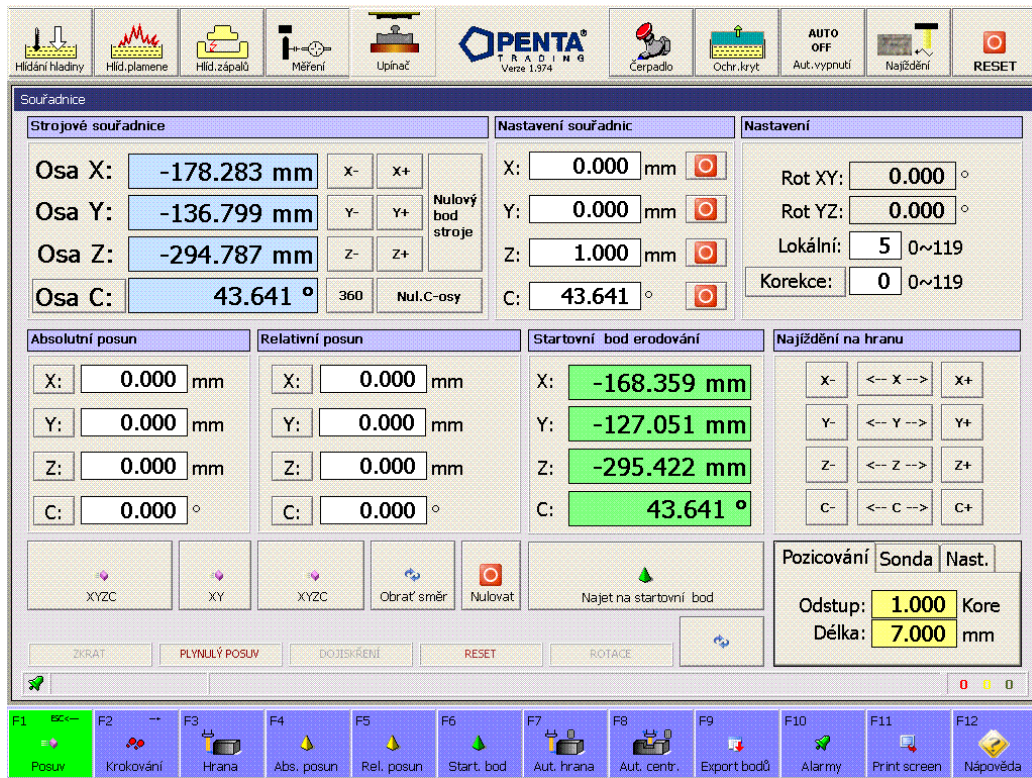
| | |
|--|--------------------|
| Pojezdy os X x Y x Z [mm] | 400 x 300 x 300 |
| Pracovní vana X x Y x Z [mm] | 1000 x 550 x 320 |
| Upínací stůl [mm] | 700 x 350 |
| Max. hmotnost obrobku [kg] | 700 |
| Max. hmotnost elektrody na pinole [kg] | 100 |
| Rozměry stroje [mm] | 2050 x 1760 x 2380 |
| Hmotnost stroje [kg] | 2210 |
| Náplň dielektrika [l] | 300 |



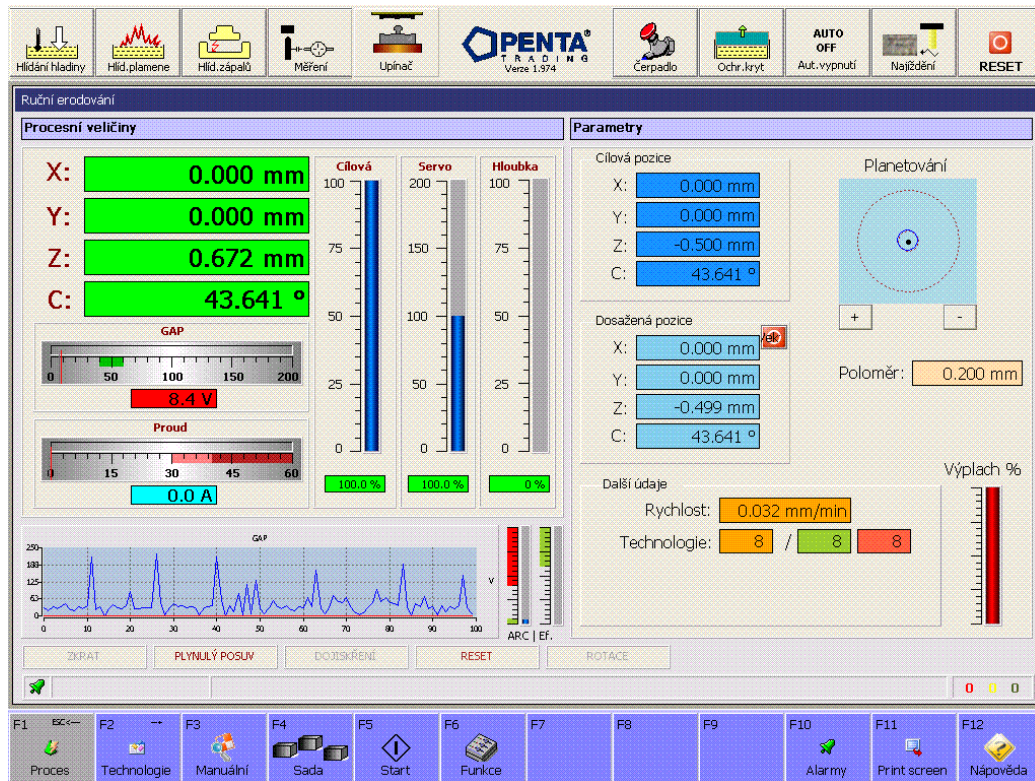
Obr. 2.1 Hloubička PENTA 433GS CNC.



Obr. 2.2 Základní obrazovka stroje.



Obr. 2.3 Nastavení souřadnic.



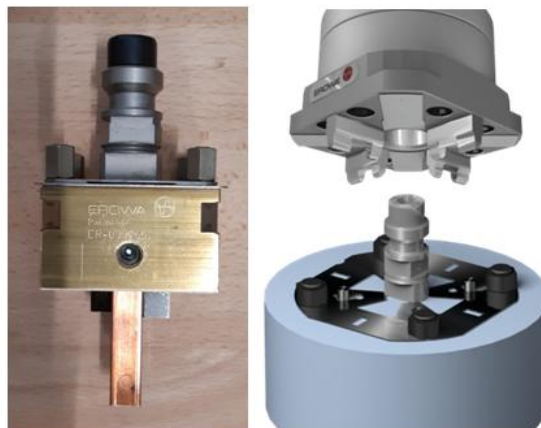
Obr. 2.4 Sledování procesu erodování.

Pro experiment bylo použito dielektrikum Iono Plus IME-MH od firmy Oelheld. Jedná se o parafínový olej, který má univerzální použití, jak pro hrubovací, tak pro dokončovací operace (tab. 2.2). Toto dielektrikum zkracuje čas nutný pro vznik ionizovaného kanálu, snižuje opotřebení elektrody a zabraňuje vzniku zápalů. Při procesu elektroeroze dochází ke vzniku dielektrických par a kovových výparů. Zejména kovové výpary karbidu wolframu, karbidu titanu, chromu, niklu či molybdenu jsou pro lidský organizmus nebezpečné. Je proto důležité dodržovat správnou výšku hladiny dielektrika nad místem elektroeroze, aby docházelo ke kondenzaci kovových výparů. Doporučená je výška hladiny 50 mm nad jiskrovou mezerou [6].

Tab. 2.2 Technická data dielektrika Iono Plus IME-MH [6].

| | |
|--------------------|--------------------------------------|
| Barva | Fosforově zelená |
| Hustota při 15°C | 0,79 g·cm ⁻³ |
| Viskozita při 40°C | 2,5 mm ² ·s ⁻¹ |
| Bod tečení | -15°C |
| Bod vzplanutí | 107°C |

Nástrojovou elektrodu tvořil měděný kvádr o rozměrech čelní plochy 10x10 mm, který byl upnut v nástrojovém upínacím systému značky EROWA (obr. 2.5). Tepelná vodivost mědi je 385 W·m⁻¹·K⁻¹ [41].



Obr. 2.5 Měděná nástrojová elektroda (vlevo) v upínacím systému EROWA (vpravo) [32].

2.2 Obrábění materiál Nimonic 263

Nimonic jsou slitiny s vysokým obsahem niklu, dále chromu, kobaltu a dalších prvků. Vyznačují se vysokou odolností proti korozi a tvorbě okují při současném zachování mechanických vlastností, jako je pevnost nebo mez kluzu i za vysokých teplot, a jejich poměrná tvrdost vzhledem k hmotnosti je též vysoká. Typická je horší tepelná vodivost, která znamená hromadění tepla v místě řezu a vysoké namáhání špičky nástroje, což vede k jejímu rychlému opotřebení při konvenčním obrábění. Vznikající třísky mají hrany s abrazivními pilovými zuby (otřepy), které spolu s vysokou teplotou v místě řezu vedou ke vzniku adhezního otěru, kdy na čele nástroje dochází k tvorbě mikrosvarů a při následném tlakovém namáhání čela se tyto mikrosvary narušují a vytrhávají materiál nástroje. Při porovnání řezných sil působících na nástroj při obrábění oceli je namáhání nástroje při obrábění nimonicu 2x vyšší, čemuž přispívá i přítomnost tvrdých karbidů v materiálu. Z těchto důvodů se jedná o těžkoobrobitelný materiál, který je vhodné obrábět elektroerozí [42].

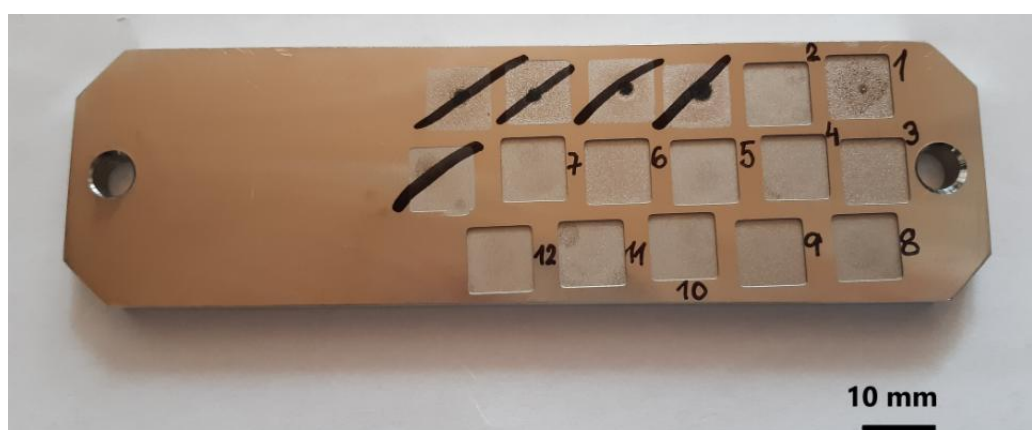
Letecký materiál Nimonic 263, který byl předmětem experimentu, je niklová superslitina, vyvinutá v roce 1971 společností Rolls-Royce jako náhrada slitiny Nimonic 80A. Dodává se v žíhaném stavu, má vylepšené tažné vlastnosti pro tváření za tepla i za studena a je dobře svařitelná. Odolává vysokým teplotám a používá se v horkých částech turbín (například lopatky) nejen u letadel. Mechanické a fyzikální vlastnosti při práci za studena jsou následující: tvrdost 195 HV, pevnost v tahu 788 MPa, pevnost ve stříhu 588 MPa, hustota okolo $8,36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, teplota likvidu $1355 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplota solidu $1350 \text{ }^\circ\text{C}$. Chemické složení této slitiny je uvedeno v tab. 2.3 [33, 34, 42].

Tab. 2.3 Chemické složení slitiny Nimonic 263 [33].

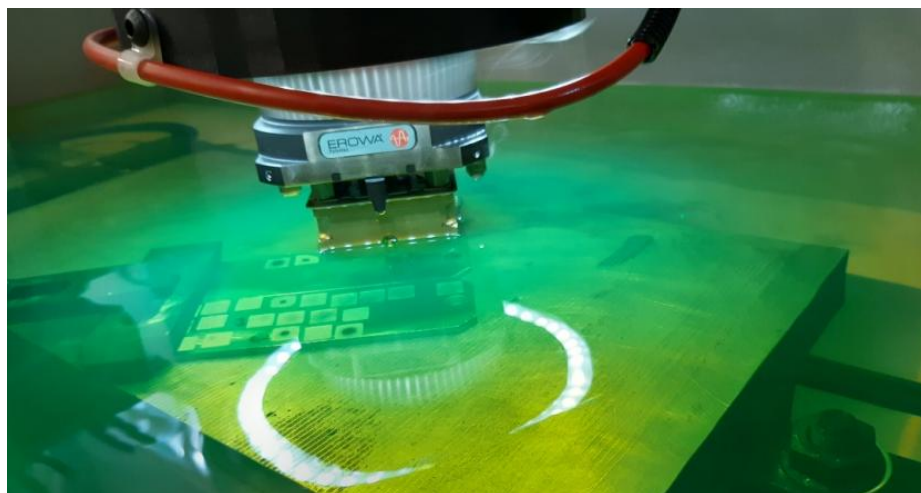
| C [%] | Si [%] | Mn [%] | S [%] | Ag [%] | Al [%] | B [%] | Bi [%] | Co [%] |
|-------------|----------|----------|-----------|------------|-----------|-------------|------------|-------------|
| 0,04 – 0,08 | 0,40 max | 0,60 max | 0,007 max | 0,0005 max | 0,60 max | 0,005 max | 0,0001 max | 19,0 – 21,0 |
| Cr [%] | Cu [%] | Fe [%] | Mo [%] | Pb [%] | Ti [%] | Al a Ti [%] | Ni | - |
| 19,0 – 21,0 | 0,20 max | 0,7 max | 5,6 – 6,1 | 0,0020 max | 1,9 – 2,4 | 2,4 – 2,8 | zůstatek | - |

2.3 Parametry obrábění

Bylo provedeno 12 experimentálních hloubení vzorků (obr. 2.6, obr. 2.7), kdy parametry nastavení stroje byly stanoveny dle rad kvalifikované obsluhy v souladu s doporučenými parametry stroje (tab. 2.4, obr. 2.8). Pro nastavení zápalného napětí U_z , pracovního proudu I a doby trvání jednoho pulzu T_{on} jsou do stroje zadávány zjednodušené hodnoty z přepočtových tabulek dodávaných výrobcem stroje. Nastavení hodnot pracovního proudu I , doby trvání jednoho pulzu T_{on} (zapnutý cyklus) a doby prodlevy T_{off} (vypnutý cyklus) byly měněny tak, aby bylo možné názorně zhodnotit, jak ovlivňují výsledek elektroerozivního hloubení. Hodnota zápalného napětí U_z se neměnila. Na obr. 2.6 je možné pozorovat i další dále nezkoumané vzorky, u kterých docházelo ke vzniku zápalů, tedy míst, kde nenastalo přerušení pracovního proudu na dobu prodlevy, a bylo tedy nutné změnit některé parametry hloubení pro jejich eliminaci. Každý vzorek byl erodován do hloubky 0,5 mm.



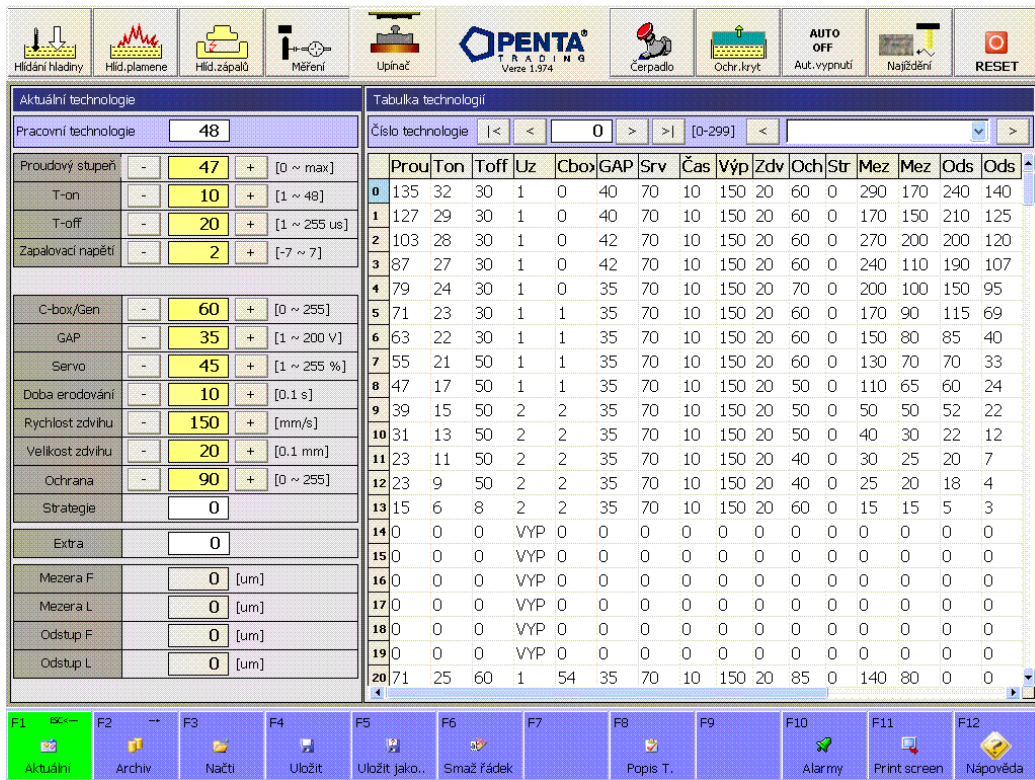
Obr. 2.6 12 vzorků experimentálního hloubení.



Obr. 2.7 Proces elektroerozivního hloubení vzorků v pracovní vaně pod hladinou dielektrika.

Tab. 2.4 Parametry experimentálního elektroerozivního hloubení.

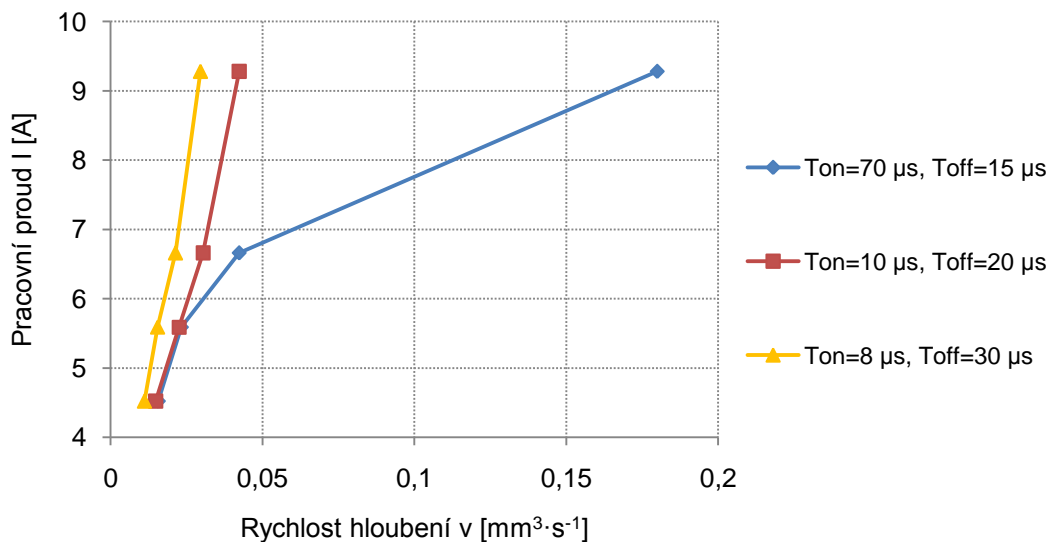
| vzorek | U_z [V] | I [A] | T_{on} [μs] | T_{off} [μs] | Rychlost hloubení v [$mm^3 \cdot s^{-1}$] |
|--------|-----------|---------|----------------------|-----------------------|---|
| 1 | 280 | 9,28 | 70 | 15 | 0,1799 |
| 2 | 280 | 9,28 | 10 | 20 | 0,0424 |
| 3 | 280 | 9,28 | 8 | 30 | 0,0296 |
| 4 | 280 | 6,66 | 70 | 15 | 0,0423 |
| 5 | 280 | 6,66 | 10 | 20 | 0,0304 |
| 6 | 280 | 6,66 | 8 | 30 | 0,0214 |
| 7 | 280 | 5,59 | 70 | 15 | 0,0233 |
| 8 | 280 | 5,59 | 10 | 20 | 0,0225 |
| 9 | 280 | 5,59 | 8 | 30 | 0,0155 |
| 10 | 280 | 4,52 | 70 | 15 | 0,0157 |
| 11 | 280 | 4,52 | 10 | 20 | 0,0149 |
| 12 | 280 | 4,52 | 8 | 30 | 0,0112 |



Obr. 2.8 Nastavení parametrů procesu elektroerozivního hloubení.

2.4 Vliv pracovních parametrů na rychlost hloubení

Vliv hodnot pracovních parametrů byl zpracován do grafu (obr. 2.9), ze kterého je patrný očekávaný nárůst rychlosti hloubení při zvyšování pracovního proudu. Zvýšení doby trvání jednotlivých pulzů za současného snížení doby prodlevy se taktéž na rychlosti hloubení podepisuje jejím vzestupem.



Obr. 2.9 Grafické zobrazení vlivu pracovních parametrů na rychlost hloubení.

3 VYHODNOCENÍ POVRCHOVÉ STRUKTURY PO EDM

Povrchová struktura materiálu po obrábění silně ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti obrobku. Při procesu elektroerozivního hloubení dochází k jejímu tepelnému ovlivnění, kontaminaci z okolí, nejen z nástrojové elektrody, a v některých případech také k vzniku mikrotrhlin, které mohou být zdrojem následné náchylnosti materiálu ke vzniku zlomů. Na obrobky z oblasti leteckého průmyslu jsou kladeny vysoké bezpečnostní nároky, a proto je nutné změny povrchové struktury sledovat a co nejvíce je eliminovat [1, 2, 35].

3.1 Topografie povrchu

Vyhodnocení topografie povrchu je základním ukazatelem vzniklé kvality povrchu obrobku a je pečlivě sledována díky jejím předem zadaným parametrům, které musí dle výrobní dokumentace splňovat. Byly vyhodnoceny 3 profilové a 3 plošné parametry, které dostatečně popisují vzniklý povrch. U profilových parametrů se jednalo o průměrnou aritmetickou úchylku profilu – R_a , průměrnou kvadratickou úchylku profilu – R_q a nejvyšší výšku profilu – R_z . Plošné parametry zahrnovaly aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu – S_a , základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu – S_q a maximální výška omezené stupnice povrchu – S_z . Všechny tyto parametry byly vyhodnoceny pomocí 3D kontaktního profilometru Dektak XT dodaného výrobcem Bruker (obr. 3.1) a následně byla naměřená data zpracována v softwaru Vision 64 a vložena do tab. 3.1 [36, 37, 38].

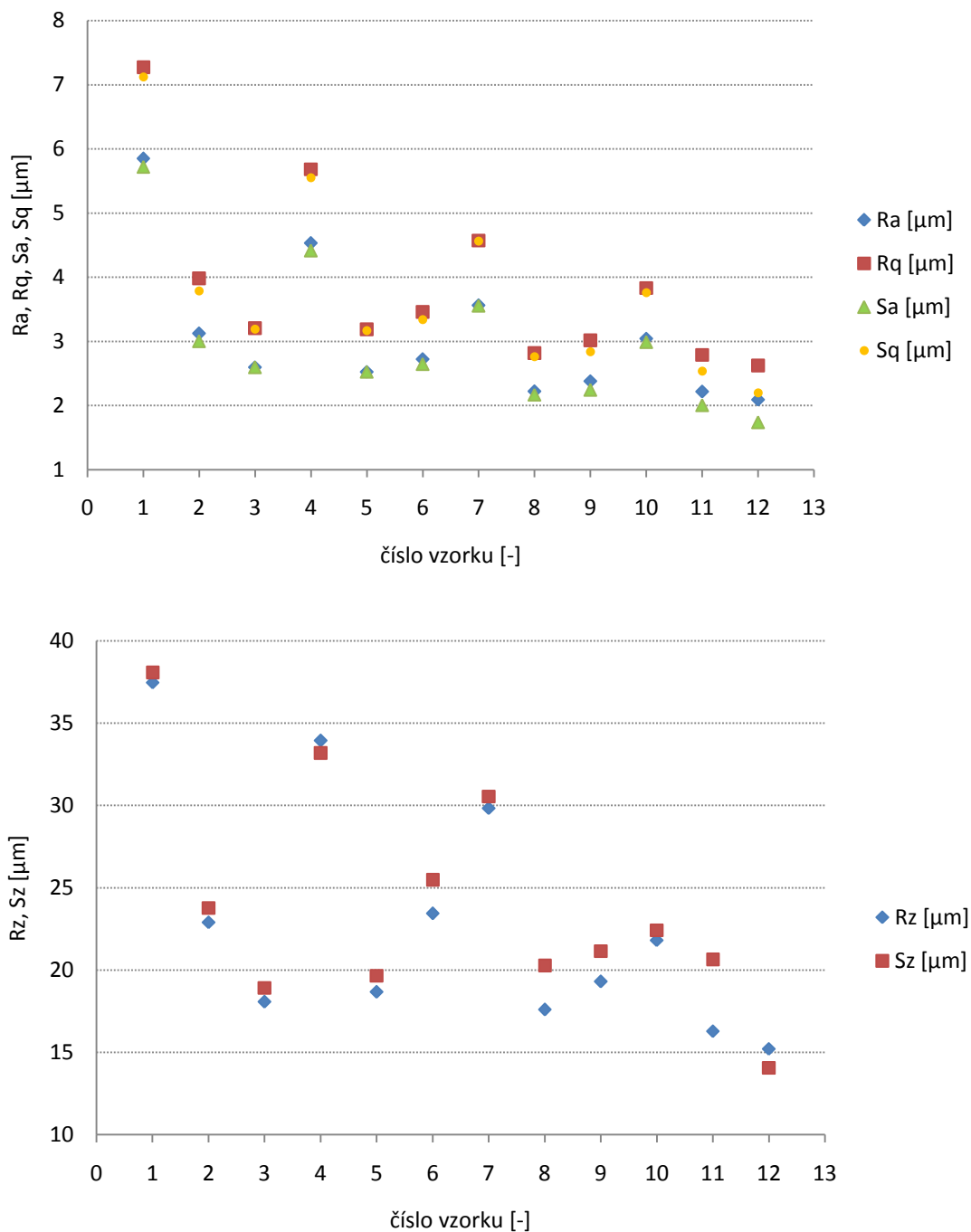


Obr. 3.1 3D kontaktní profilometr Dektak XT [38].

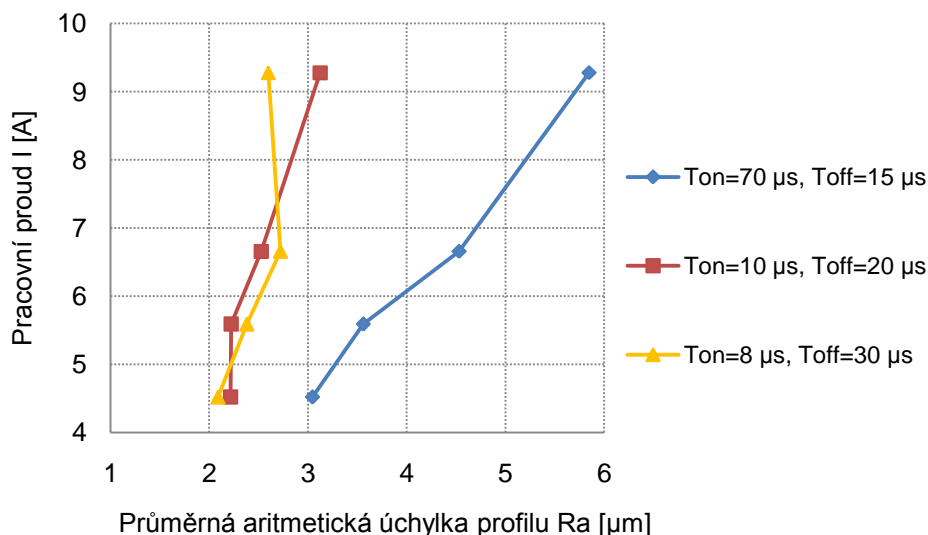
Tab. 3.1 Naměřené parametry topografie vzorků.

| vzorek | R_a [μm] | R_q [μm] | R_z [μm] | S_a [μm] | S_q [μm] | S_z [μm] |
|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 5,849 | 7,273 | 37,463 | 5,718 | 7,122 | 38,072 |
| 2 | 3,123 | 3,980 | 22,902 | 3,001 | 3,786 | 23,784 |
| 3 | 2,597 | 3,204 | 18,071 | 2,595 | 3,194 | 18,932 |
| 4 | 4,532 | 5,685 | 33,942 | 4,415 | 5,551 | 33,186 |
| 5 | 2,526 | 3,188 | 18,679 | 2,526 | 3,168 | 19,667 |
| 6 | 2,721 | 3,458 | 23,437 | 2,644 | 3,340 | 25,483 |
| 7 | 3,560 | 4,574 | 29,832 | 3,555 | 4,564 | 30,556 |
| 8 | 2,221 | 2,816 | 17,599 | 2,169 | 2,765 | 20,270 |
| 9 | 2,381 | 3,014 | 19,304 | 2,242 | 2,838 | 21,166 |
| 10 | 3,045 | 3,835 | 21,813 | 2,988 | 3,761 | 22,432 |
| 11 | 2,216 | 2,792 | 16,290 | 2,003 | 2,539 | 20,644 |
| 12 | 2,009 | 2,622 | 15,217 | 1,738 | 2,199 | 14,076 |

Byly sestrojeny grafy (obr. 3.2) znázorňující výsledky měření jednotlivých plošných a profilových parametrů a také graf (obr. 3.3) znázorňující vliv nastavení pracovních parametrů na jakost povrchu zastoupenou průměrnou aritmetickou úchylkou profilu.



Obr. 3.2 Grafy vyhodnocení profilových a plošných parametrů.



Obr. 3.3 Vliv pracovních parametrů na jakost povrchu.

Z vyhotovených grafů porovnávající jednotlivé parametry topografie profilu je patrné, že nejlepší jakost povrchu byla získána u vzorku č. 12, kdy parametry nastavení stroje byly: $U_z = 280 \text{ V}$, $I = 4,52 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 8 \mu\text{s}$ a $T_{\text{off}} = 30 \mu\text{s}$. Naopak nejhorší jakosti dosahoval vzorek číslo 1 s nastavením: $U_z = 280 \text{ V}$, $I = 9,28 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 70 \mu\text{s}$ a $T_{\text{off}} = 15 \mu\text{s}$. Obecně lze také pozorovat, že při snižování pracovního proudu a doby trvání jednoho pulzu za současného zvyšování doby prodlevy, jakost povrchu roste. Tento předpoklad neplatí v případě vzorků 6 a 9, kde naopak došlo k nárůstu naměřených profilových a plošných parametrů.

3.2 Morfologie povrchu

Všechny experimentálně vyrobené vzorky byly očištěny v ultrazvukové čističce a následně analyzovány pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu (SEM) LYRA3 od firmy Tescan (obr. 3.4). Toto zařízení je také vybaveno energiově-disperzním detektorem rentgenového záření (EDX).

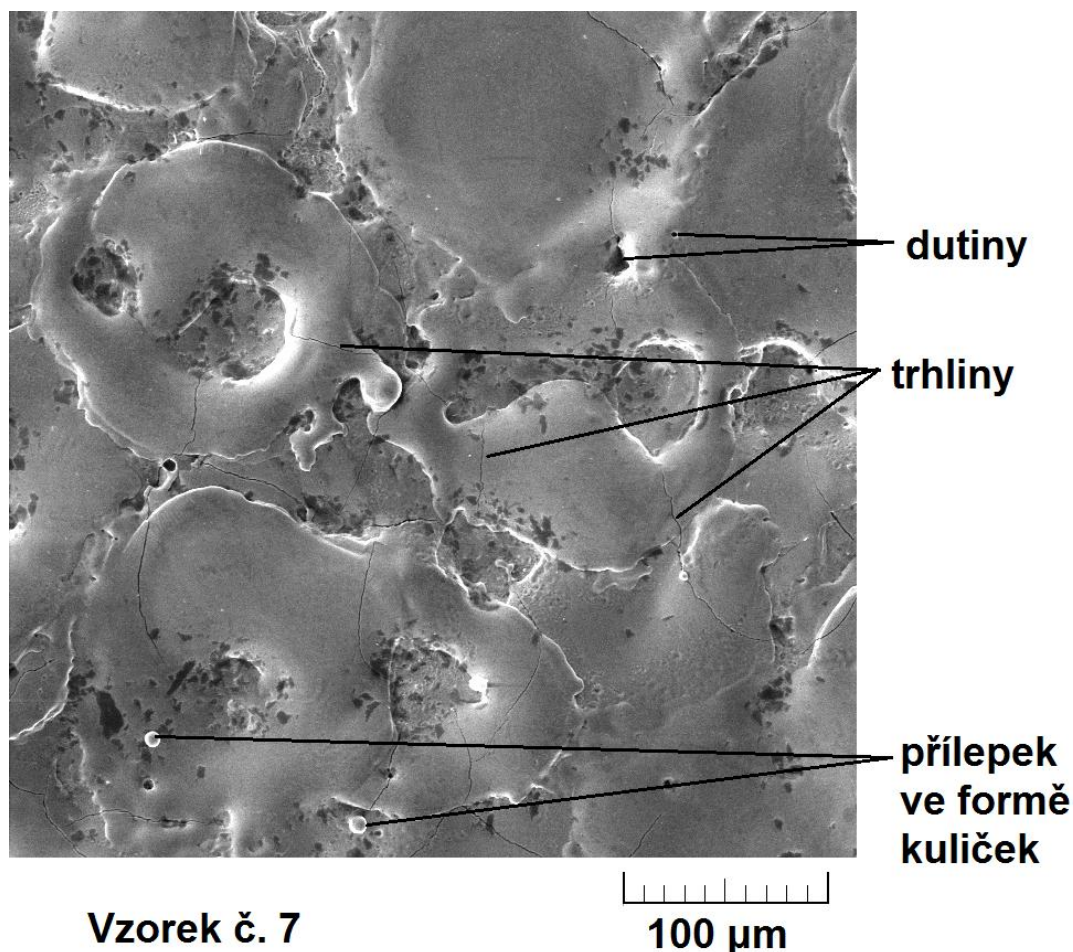


Obr. 3.4 Elektronový rastrovací mikroskop LYRA3 od firmy Tescan [40].

Proces elektroerozivního obrábění za sebou zanechává velmi specifický povrch, který se vyznačuje přítomností velkého množství kráterů po odtaveném materiálu vzniklých jednotlivými výboji. Výslednou morfologii ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu, jeho předešlé tepelné zpracování a v neposlední řadě nastavené pracovní parametry elektroerozivního obrábění. Vzniká tzv. bílá vrstva, což je natavená a znovu ztuhlá vrstva základního materiálu, vykazující znečištění okolním prostředím, které je tvořeno dielektrickou kapalinou a materiálem nástrojové elektrody. Teploty v jiskrové mezeře dosahují 10 000 °C až 20 000 °C. Rychlé ochlazení materiálu dielektrickou kapalinou vede ke vzniku zbytkových napětí v povrchové vrstvě, které mohou způsobovat vznik trhlin [12, 36].

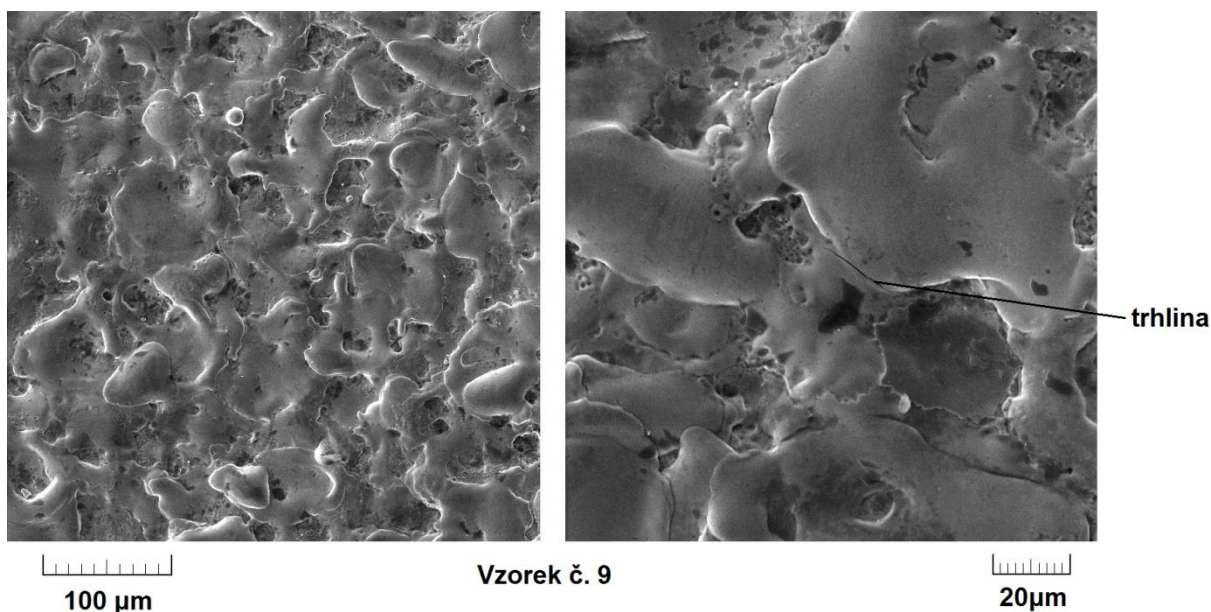
Všechny vzorky byly prozkoumány při 500x zvětšeném obrazu (příloha 1), pro některé z nich byl použit 1000x až 1500x zvětšený obraz pro detailnější zobrazení vzniklých trhlin. Všechny vzorky vykazovaly přítomnost malého množství přílepků ve formě drobných kuliček odtaveného a znovu ztuhlého materiálu. Stejně tak bylo možné u všech spatřit malé množství drobných dutin. Vznik trhlin byl pro každý vzorek specifický, ale lze je rozdělit do tří skupin.

První tvoří vzorky se značným množstvím velkých trhlin rovnoměrně rozmístěných po celém povrchu jednoznačně viditelných již při 500x zvětšeném obrazu (obr. 3.5). Mezi ně patří vzorky číslo 1, 4, 7 a 10. Všechny tyto vzorky měly společné nastavení $T_{on} = 70 \mu s$ a $T_{off} = 15 \mu s$. Delší doba trvání jednoho pulzu znamená i delší tepelné působení v jiskrové mezeře a následným teplotním skokem došlo ke vzniku velkého zbytkového napětí, které mělo za následek vznik právě těchto četných trhlin.



Obr. 3.5 Morfologie vzorku č. 7.

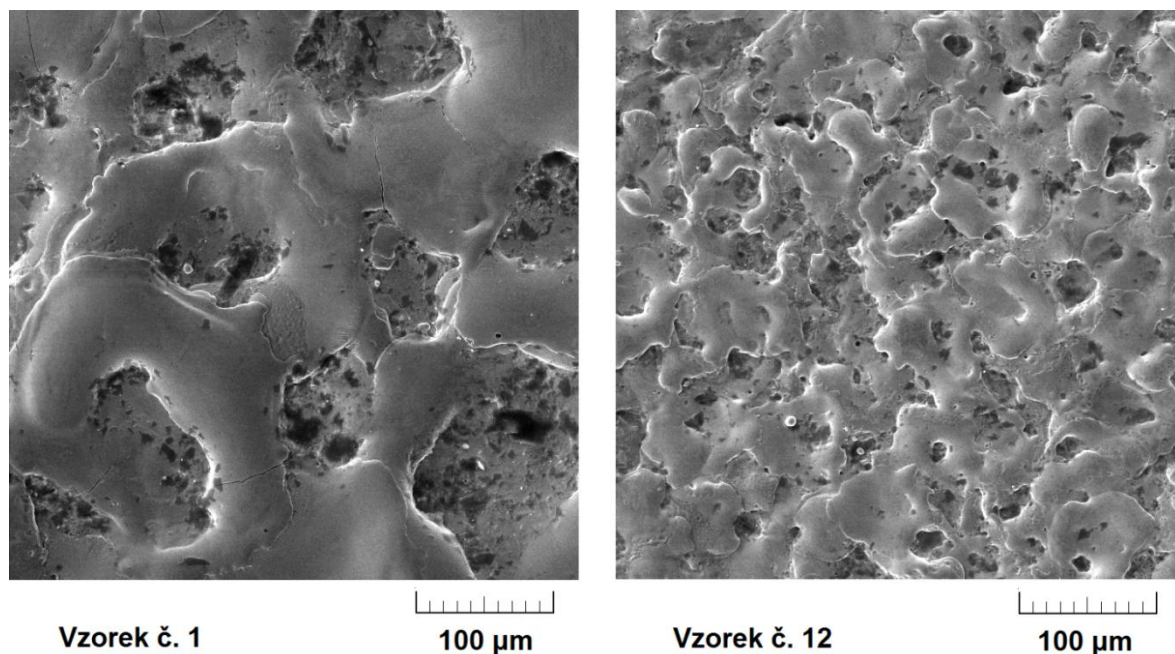
Další skupinu obsahují vzorky číslo 2, 3, 6, 8 a 11, u kterých lze trhliny pozorovat ojediněle, a jsou menší. Mezi vzorky téměř bez trhlin viditelných pouze při vyšším zvětšení patří vzorky číslo 5, 9 a 12. Obr. 3.6 vzorku č. 9 ($I = 5,59 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 8 \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 30 \mu\text{s}$) je ukázkou odhalení drobné trhliny až při vyšším zvětšení.



Obr. 3.6 Vzorek č. 9 vlevo zvetšení 500x, vpravo 1500x.

Srovnání snímků morfologie povrchu ukázalo velký vliv doby trvání jednoho pulzu na výslednou strukturu kráterů. Při $T_{\text{on}} = 70 \mu\text{s}$ byla velikost kráterů všech vzorků výrazně vyšší než při hodnotách $T_{\text{on}} = 10 \mu\text{s}$ a $T_{\text{on}} = 8 \mu\text{s}$. Naopak změna pracovního proudu se na morfologii povrchu výrazně nepodepsala.

Při porovnání vzorků s nejnižší jakostí povrchu (č. 1, $I = 9,28 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 70 \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 15 \mu\text{s}$) a nejvyšší jakostí (č. 12, $I = 4,52 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 8 \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 30 \mu\text{s}$) je zřejmý rozdíl ve velikosti kráterů po jednotlivých výbojích při stejném zvětšení (obr. 3.7). Zřetelně lze pozorovat jemnější strukturu povrchu u vzorku č. 12.

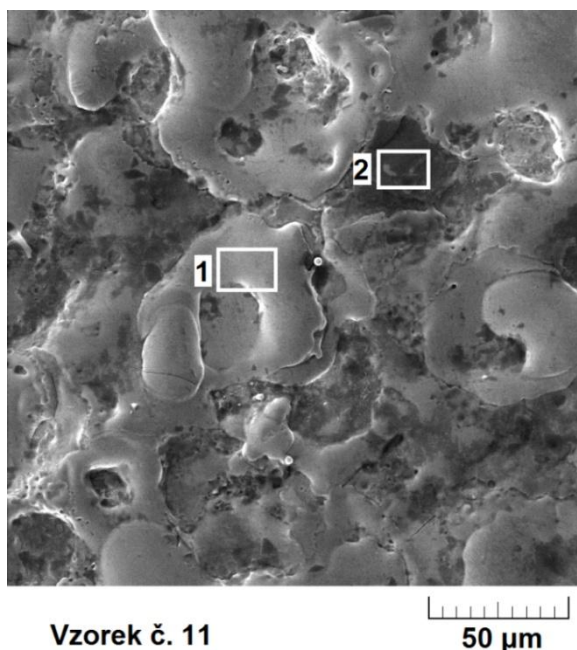


Obr. 3.7 Porovnání morfologie vzorků č. 1 a č. 12 se stejným zvětšením 500x.

3.3 EDX

Díky elektronovému rastrovacímu mikroskopu LYRA3 bylo možné zhotovit také EDX analýzu, která dokáže určit jednotlivá zastoupení prvků na povrchu vzorku. Při technologii EDX (Energy-Dispersive X-ray spectroscopy) je materiál ozářen elektronovým paprskem. Z vnitřních obalů atomů jsou vytrženy elektrony a ty jsou nahrazeny elektrony z vnějších vrstev. Dojde k emisi rentgenového záření, které má svou specifickou hodnotu energie pro každý prvek. Vzhledem k působení vysokých teplot v místě výboje dochází k difuzi mezi obráběným materiálem, nástrojovou elektrodou a okolním prostředím, které tvoří dielektrikum. Toto materiálové ovlivnění je pro letecký průmysl nežádoucí hlavně v případě mědi, která byla použita jako materiál nástrojové elektrody [36, 39].

Analýza zastoupení prvků byla provedena pro vzorek č. 11 ($I = 4,52 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 10 \text{ } \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 20 \text{ } \mu\text{s}$) ve dvou měření pro vrchol a dno kráteru (obr. 3.8, příloha 2). Bylo vyhodnoceno zastoupení jednotlivých prvků v hmotnostních procentech (tab. 3.2, obr 3.9).



Vzorek č. 11

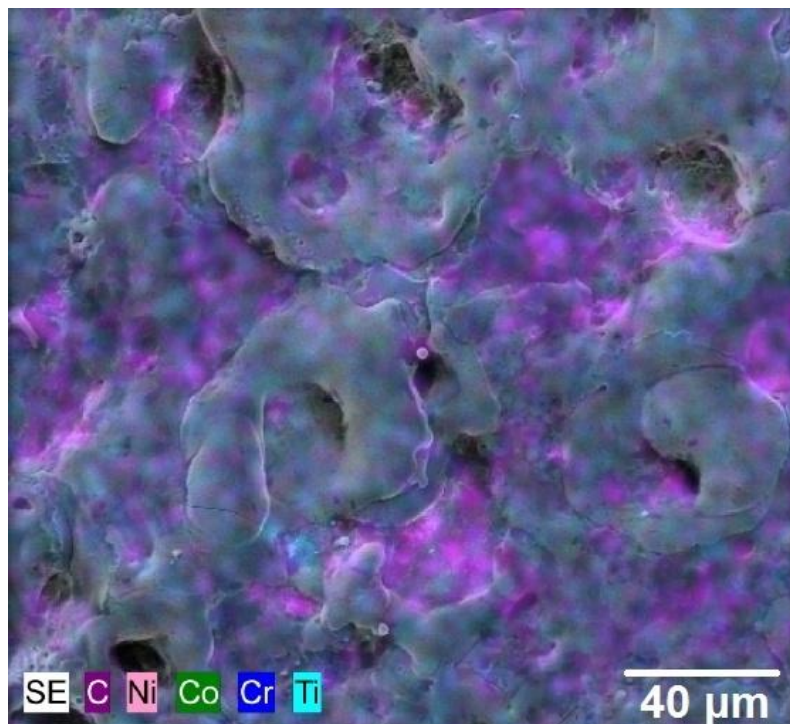
50 μm

Obr. 3.8 Vzorek č. 11 s vyznačenými místy měření.

Tab. 3.2 Zastoupení jednotlivých prvků v hm. procentech pro dvě měření vzorku č. 11.

| Číslo měření | Zastoupení prvku [hm. %] | | | | | | |
|--------------|--------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|
| | C | O | S | Ti | Cr | Co | Ni |
| 1 | 3,9 | - | 2,8 | 2,3 | 16,7 | 21,5 | 52,8 |
| 2 | 23,8 | 3,3 | 2,0 | 2,3 | 15,0 | 15,8 | 37,7 |

Z výsledků vyplývá, že k nejvyšší kontaminaci povrchu dochází v místech dna kráterů, tedy v bodech vzniku výbojového kanálu. Významná je kontaminace uhlíkem, který je přítomen v okolním prostředí. V místech dna kráteru dochází také k mírné oxidaci povrchu. Naopak k očekávané kontaminaci mědi, která tvořila materiál nástrojové elektrody, nedochází vůbec.



Obr. 3.9 Zastoupení jednotlivých prvků v barevném rozlišení.

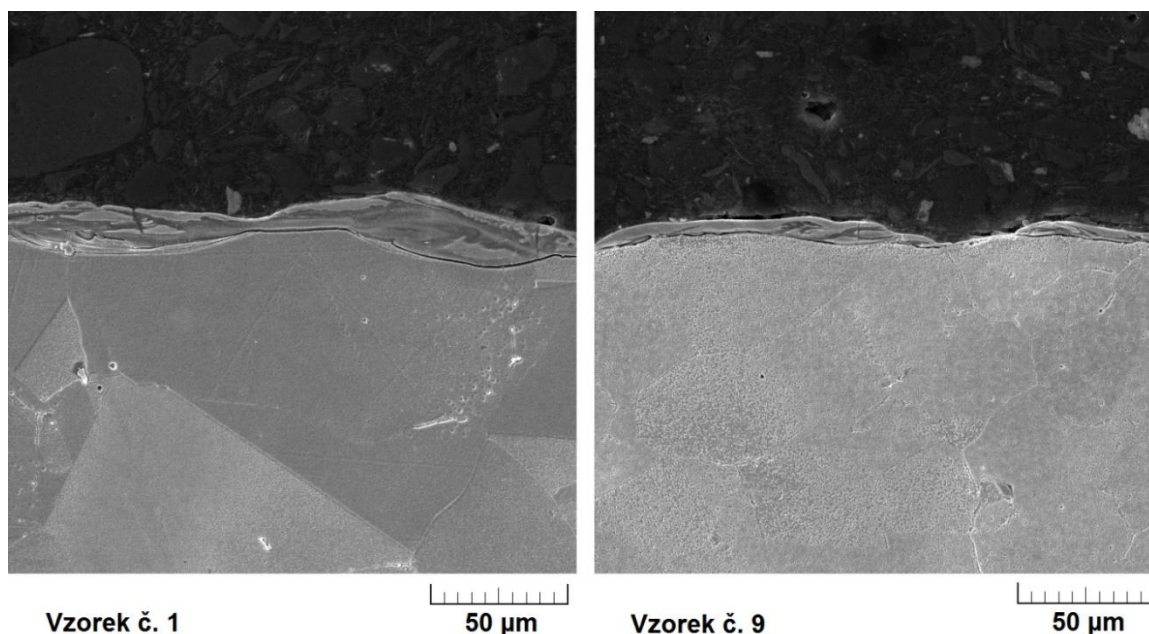
3.4 Vyhodnocení podpovrchové oblasti

Náhled do podpovrchové oblasti vzorků byl zpracován pomocí vyrobených metalografických preparátů znázorňujících příčné řezy jednotlivými vzorky. Metalografické preparáty byly připraveny broušením za mokra a leštěním diamantovými pastami pomocí automatického preparačního systému TEGRAMIN 30 od firmy Struers (obr. 3.10). Finální mechanicko-chemické doleštění bylo provedeno pomocí suspenze OP-Chem firmy Struers. Jako leptadlo byla použita směs 15 ml HCl + 10 ml CH₃COOH + 10 ml HNO₃, která se nechala působit po dobu 1 minuty. Toto leptadlo se ukázalo jako nevhodné, ale vzhledem k mimořádným okolnostem nebylo možné použít jiné. Proto byly zhotoveny pouze preparáty tří vzorků. Po naleptání byly vzorky zkoumány pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu LYRA3.



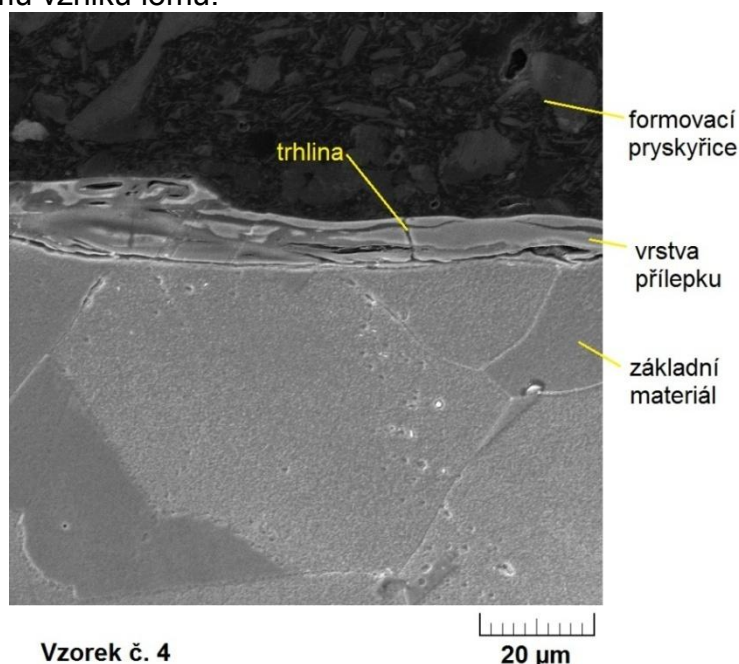
Obr. 3.10 Bruska/leštička TEGRAMIN 30 [38].

Metalografické preparáty byly zhotoveny pro vzorky č. 1, 4 a 9. U všech vzorků bylo zřetelné rozhraní vrstvy přílepku a základního materiálu. Vzorek č. 1 a 4 vykazoval tloušťku přílepku do 30 μm . U vzorku č. 9 pak do 10 μm (obr. 3.11). Silná vrstva přílepku může vést k předčasnému selhání součásti, hlavně pokud pracuje za vysokých tlaků. Z těchto důvodů je nežádoucí a někdy je nutné ji odstranit následnými procesy. Mimo klasické broušení a leštění je možné v místech, která jsou těžko dostupná například úzké dutiny a průchozí otvory, využít i méně časté metody obrábění tokem abraziva (AFM - Abrasive flow machining), které má konzistenci tmelu, používá se mimo jiné i pro odstranění otřepů [43].



Obr. 3.11 Příčné řezy vzorky č. 1 (vlevo) a č. 9 (vpravo).

Pod povrchovou vrstvou nebyly pozorovány žádné dutiny a ukázalo se, že trhliny nezasahují do základního materiálu, ale prochází pouze přílepkem (obr. 3.12). Tyto trhliny nejsou tak nebezpečné z hlediska náchylnosti k jejich rozšíření do spodních vrstev a možnému vzniku lomu.



Obr. 3.12 Příčný řez vzorkem č. 4.

3.5 Opotřebení nástrojové elektrody

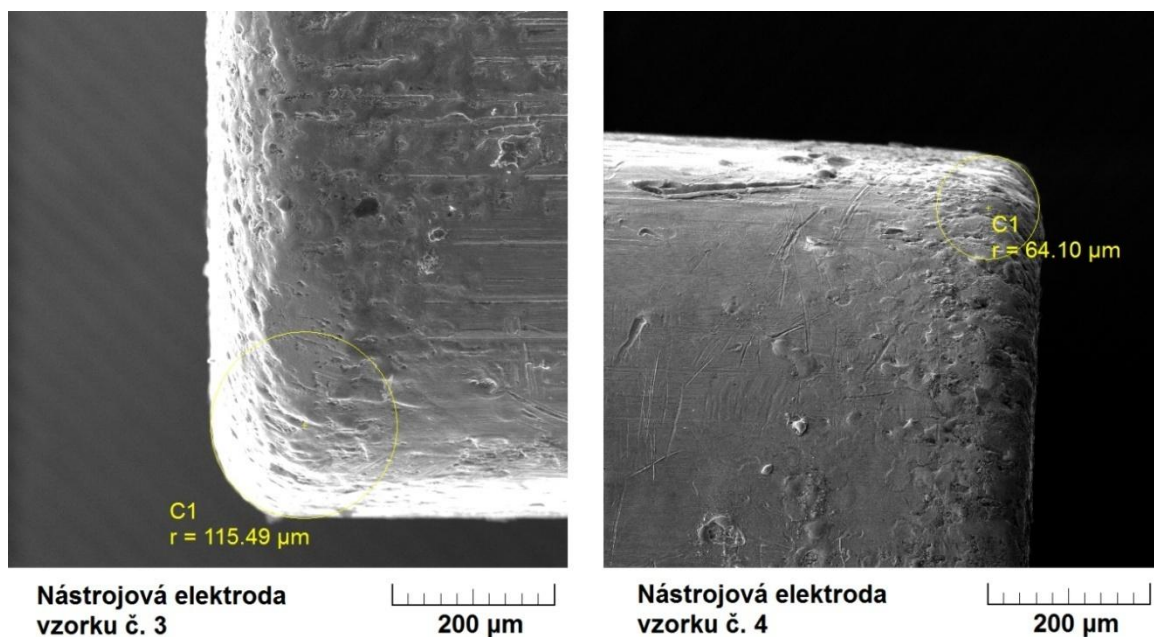
Při procesu elektoreroze dochází k úbytku materiálu i na straně nástrojové elektrody a k nejvyššímu opotřebení dochází na jejích hranách a rozích. Díky těmto rozměrovým a geometrickým změnám na nástrojové elektrodě je její opotřebení potřeba kontrolovat a kompenzovat, hlavně při přesných operacích, aby nedošlo k degradaci tvaru obrobku [1].

Díky koncentraci opotřebení nástrojové elektrody na jejích hranách, je možné vzniklá zaoblení pro jednotlivé parametry obrábění srovnat a vyhodnotit. Všechny elektrody byly před samotným elektroerozivním hloubením na čele srovnány pomocí elektroerozivní drátové řezačky FANUC ROBOCUT α -C600iB, aby byly zajištěny stejné výchozí parametry čela, hran a rohů. Zároveň hloubka erodování každého vzorku byla 0,5 mm. Nástrojové elektrody byly posouzeny opět pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu (SEM) LYRA3 od firmy Tescan. Měření opotřebení bylo provedeno pro každou nástrojovou elektrodu ve dvou hranách, kdy do každé z nich byla vložena aproximační kružnice. Opotřebení bylo měřeno porovnáním poloměrů kružnic pro všechny vzorky. Nástrojové elektrody byly zkoumány ve stejné vzdálenosti od objektivu se stejným zvětšením 300x a naměřené průměry byly zaznamenány do tab. 3.3.

Tab. 3.3 Naměřené hodnoty opotřebení jednotlivých vzorků.

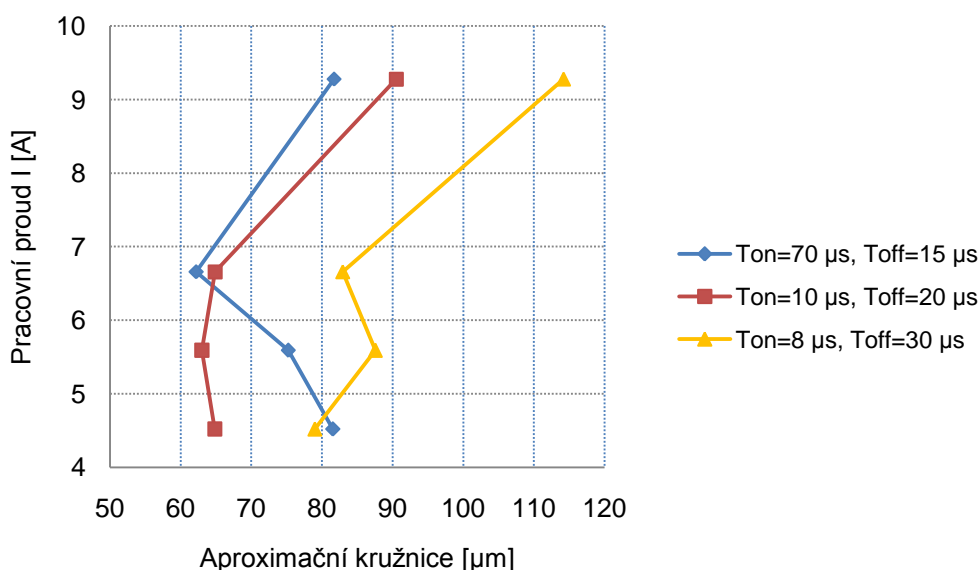
| vzorek | aproximační kružnice hrany 1 [μm] | aproximační kružnice hrany 2 [μm] |
|--------|---|---|
| 1 | 83,57 | 79,87 |
| 2 | 88,02 | 92,98 |
| 3 | 112,90 | 115,49 |
| 4 | 60,29 | 64,10 |
| 5 | 65,69 | 64,02 |
| 6 | 83,06 | 82,82 |
| 7 | 79,07 | 71,41 |
| 8 | 50,20 | 75,83 |
| 9 | 83,45 | 91,67 |
| 10 | 81,05 | 82,04 |
| 11 | 62,42 | 67,21 |
| 12 | 79,35 | 78,63 |

Rozdíl mezi měřením hran 1 a 2 byl maximálně 8 μm , ale v případě elektrody č. 8 došlo k rozdílu 26 μm . K nejvyššímu opotřebení došlo na nástrojové elektrodě vzorku č. 3 ($I = 9,28 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 8 \text{ }\mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 30 \text{ }\mu\text{s}$). Naopak nejnižší opotřebení vykazovala nástrojová elektroda vzorku č. 4 ($I = 6,66 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 70 \text{ }\mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 15 \text{ }\mu\text{s}$), (obr. 3.13).



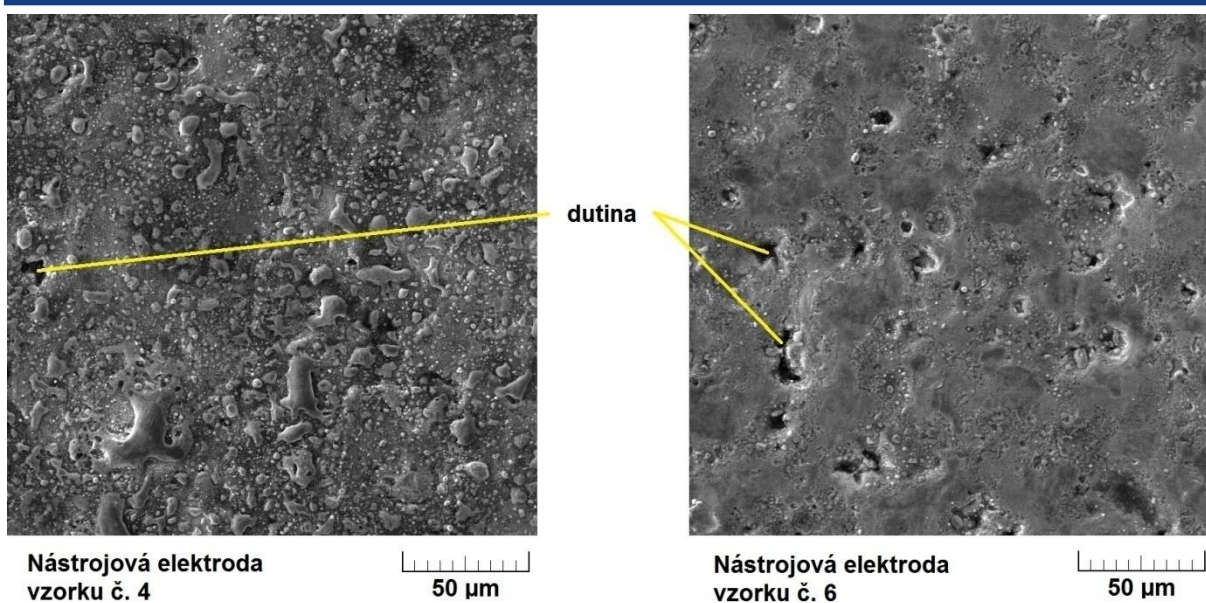
Obr. 3.13 Znárodnění aproximační kružnice u rohů nástrojových elektrod vzorků č. 3 a 4.

Vliv pracovních parametrů na aritmetický průměr dvou měření aproximačních kružnic pro každý vzorek byl zpracován do grafu (obr. 3.14).



Obr. 3.14 Grafické znázornění vlivu pracovních parametrů na opotřebení nástrojové elektrody.

Morfologie povrchu elektrod po elektroizivním hloubení má taktěž typický vzhled tvořený krátery a místy také hlubšími dutinami. Na obr. 3.15 je možné pozorovat srovnání dvou morfologií povrchu nástrojové elektrody pro vzorek č. 4 a 6.



Obr. 3.15 Morfologie povrchu nástrojových elektrod vzorků č. 4 a 6.

4 SHRnutí VÝSLEDKŮ A DALŠÍ DOPORUČENÍ

Proces hloubení se obvykle skládá z hrubování a dokončování, mezi kterými může být i mezistupeň. Hrubování se vyznačuje rychlejším úběrem materiálu, naopak dokončování dosahuje výrazně nižších rychlostí obrábění, ale důraz je kladen právě na kvalitu povrchu. Volba parametrů elektroerozivního hloubení proto závisí na dané operaci, ve které se proces nachází.

Z pracovních parametrů experimentu lze zvolit vhodné nastavení pro elektroerozivní hloubení následujícím způsobem. Protože vzniklé trhliny nezasahovaly v žádném z případů do základního materiálu, ale byly přítomny pouze v rámci přílepku, není nutné označit ani jeden vzorek za zcela nevhodný. Například v případě vzorku č. 1 ($I = 9,28 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 70 \text{ } \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 15 \text{ } \mu\text{s}$) je výsledná rychlost hloubení natolik vysoká, že i když má povrch s $R_a 5,849 \text{ } \mu\text{m}$ s četným výskytem trhlín v přílepku, pokud tato pracovní nastavení použijeme při hrubovací operaci, při následných dokončovacích procesech bude tento povrch oderodován a v některých případech může následovat broušení či jiné technologie. Podobná situace nastává i u vzorku č. 4 ($I = 6,66 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 70 \text{ } \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 15 \text{ } \mu\text{s}$), který taktéž vykazuje větší množství trhlín v přílepku a $R_a 4,532 \text{ } \mu\text{m}$. V tomto případě došlo k nejnižšímu opotřebení nástrojové elektrody. Je proto důležité si předem zvolit parametr, dle kterého bude zvoleno nastavení stroje, tedy pokud je určující rychlost hloubení nebo opotřebení nástrojové elektrody. Další vzorky s četným výskytem trhlín v přílepku jsou č. 7 a 10. I tyto je možné použít pro hrubování, ale při porovnání rychlosti hloubení a opotřebení nástrojové elektrody těchto případů s vzorkem č. 1, popřípadě 4, nejsou natolik výhodné. Pro dokončovací operace je možné využít nastavení pro vzorek č. 8 ($I = 5,59 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 10 \text{ } \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 20 \text{ } \mu\text{s}$), který měl malé opotřebení nástrojové elektrody a ojedinělý výskyt trhlín v přílepku. Vzorek č. 12 sice dosahoval $R_a 2,009 \text{ } \mu\text{m}$ a č. 8 $R_a 2,221 \text{ } \mu\text{m}$, ale rychlost hloubení byla pro č. 8 až 2x vyšší a opotřebení nástrojové elektrody nižší, proto je opět nutné zvážit, který parametr je určující pro konkrétní aplikaci. Další vzorky už při porovnání všech parametrů nevykazovaly tak atraktivní výsledky pro další použití.

Pro elektroerozivní obrábění materiálu Nimonic 263 existuje několik studií, které se však věnují hlavně jeho elektroerozivnímu řezání. Nastavení stroje však nelze srovnávat, protože při WEDM vstupuje do parametrů také rychlost odvíjení drátu a každý generátor pro daný stroj je jiný. Navíc žádná z nich se detailně nevěnuje sledování vlivů elektroerozivního obrábění na povrchovou a podpovrchovou vrstvu, ale spíše rychlosti obrábění a opotřebení nástrojové elektrody (spotřebě drátu).

Příkladem může být studie věnující se elektroerozivnímu řezání Nimonicu pomocí molybdenového drátu o průměru $180 \text{ } \mu\text{m}$ v deionizované vodě. I zde je potvrzeno, že nižší nastavení pracovního proudu vede obecně k lepší kvalitě povrchu a menší vrstvě přílepku. Došlo však ke kontaminaci materiálu nejenom uhlíkem a kyslíkem z dielektrika, ale také molybdenem z nástrojové elektrody, k čemuž dle výsledků této diplomové práce v případě hloubení měděnou elektrodou nedocházelo [44].

Další studie uvádí elektroerozivní hloubení wolframovou a měděnou elektrodou. Jsou použity výrazně vyšší doby trvání jednoho pulzu a na to navazuje výsledné R_a pohybující se kolem $15 \text{ } \mu\text{m}$. Při porovnání měděné a wolframové nástrojové elektrody měděná vykazovala rychlejší obráběcí časy ale nižší kvalitu povrchu než wolframová. Zde je potvrzeno využití drahého wolframu pouze pro stěžejní operace náročné na výsledný povrch. Mikrostruktura povrchové vrstvy není zkoumána [45].

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se ve svých prvních kapitolách zabývá teorií k technologii elektroerozivního hloubení, detailněji poté elektroerozivním hloubením. Je podrobně popsán proces vzniku jiskry, který je mechanismem úběru materiálu, ve zkratce představení stěžejní výrobci hloubicích strojů a možnosti využití elektroerozivního hloubení.

Následuje hlavní praktická část, která se věnuje experimentálnímu elektroerozivnímu hloubení leteckého materiálu Nimonic 263. Postupnou systematickou změnou parametrů nastavení stroje PENTA 433GS CNC bylo možné sledovat jejich vliv na výsledný povrch. Bylo vytvořeno 12 testovacích vzorků, kdy každý z nich byl vyhlouben stejnou nástrojovou elektrodou z mědi o rozměrech 10x10 mm do hloubky 0,5 mm. U nástrojových elektrod bylo sledováno jejich opotřebení, dále rychlost hloubení a následně vzorky pokračovaly na topografické vyhodnocení povrchu. Poté byl povrch vzorků zkoumán pod elektronovým mikroskopem a byl pozorován výskyt trhlin, přílepků nebo dutin. Pro vzorek č. 11 byla vytvořena EDX analýza, která dokáže určit zastoupení jednotlivých prvků na povrchu materiálu, a ukázat tak, k jaké kontaminaci povrchu vzorku okolním prostředím nebo materiálem nástrojové elektrody při procesu elektroerozivního hloubení došlo. Výsledkem bylo zjištění kontaminace kyslíkem (oxidace) a uhlíkem, ale ke kontaminaci mědí z nástrojové elektrody nedošlo. Pro posouzení rozsahu trhlin a velikosti vrstvy přílepku byly vytvořeny metalografické výbrusy pro vzorky č. 1, 4 a 9. Dle nich nedošlo k zasažení trhlin do základního materiálu, ale byly pozorovány pouze v rámci přílepku.

Na základě všech pozorování bylo vytvořeno shrnutí a výsledná doporučení pro použití jednotlivých parametrů nastavení stroje PENTA 433GS CNC pro obrábění leteckého materiálu Nimonic 263. Pro hrubovací operace se jako nejvhodnější zdají parametry nastavení hloubení vzorku č. 1 ($I = 9,28 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 70 \text{ } \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 15 \text{ } \mu\text{s}$) s výsledným $R_a 5,849 \text{ } \mu\text{m}$ a rychlostí hloubení $0,1799 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, nebo vzorku č. 4 ($I = 6,66 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 70 \text{ } \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 15 \text{ } \mu\text{s}$) s $R_a 4,532 \text{ } \mu\text{m}$, rychlostí hloubení $0,0423 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a nejnižším opotřebením nástrojové elektrody. Pro dokončování byly zvoleny jako vhodné parametry hloubení vzorku č. 8 ($I = 5,59 \text{ A}$, $T_{\text{on}} = 10 \text{ } \mu\text{s}$, $T_{\text{off}} = 20 \text{ } \mu\text{s}$) s $R_a 2,221 \text{ } \mu\text{m}$ a rychlostí hloubení $0,0225 \text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ve stručnosti je zmíněno srovnání s obdobnými studii.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- (1) MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- (2) BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- (3) DESCOEUDRES, Antoine. *Characterization of electrical discharge machining plasma*. [online], Lausanne: EPFL, 2006 [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://infoscience.epfl.ch/record/84931>.
- (4) KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- (5) MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. Učební texty vysokých škol.
- (6) STORR, Manfred. *Important facts about spark erosion* [online]. oelheld, 2006. Copyright ©H [cit. 25.02.2020]. Dostupné z: https://www.oelheld.com/fileadmin/content/Broschueren/EN/Important_facts_about_spark_erosion_-BR-__EN__01.pdf.
- (7) SAHA, Sourabh Kumar. *Experimental Investigation of the Dry Electric Discharge Machining (Dry EDM) Process* [online]. Kanpur (INDIA), 2008. Disertační práce. Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology Kanpur. [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Sourabh_Saha/publication/201146222_Experimental_Investigation_of_the_Dry_Electric_Discharge_Machining_Dry_EDM_Process/links/55ae9c5908ae98e661a6ed7e/Experimental-Investigation-of-the-Dry-Electric-Discharge-Machining-Dry-EDM-Process.pdf.
- (8) KOHOUT, Jaroslav. *Elektroerozivní CNC hloubicí stroj PENTA CNC, Pokyny pro obsluhu a údržbu*. Praha: PENTA TRADING, spol. s.r.o., 2019.
- (9) MOURALOVÁ, K. *Moderní technologie drátového elektroerozivního řezání kovových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 98 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc..
- (10) ZHAO, Wei. Discussion on the Polarity Effect of EDM. *Advanced Materials Research* [online]. Trans Tech Publications, 2011, **154**, 429-432 [cit. 2020-02-29]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.154-155.429. ISBN 9780878492046. ISSN 1022-6680. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/AMR.154-155.429.pdf>.
- (11) BLEYS, P., J. -P. KRUTH, B. LAUWERS, B. SCHACHT, V. BALASUBRAMANIAN, L. FROYEN a J. VAN HUMBEECK. Surface and Sub-Surface Quality of Steel after EDM. *Advanced Engineering Materials* [online]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2006, **8**(1-2), 15-25 [cit. 2020-02-29]. DOI: 10.1002/adem.200500211. ISSN 1438-1656. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adem.200500211>.

-
- (12) MOURALOVA, K, T PROKES a L BENES. Surface and Subsurface Layers Defects Analysis After WEDM Affecting the Subsequent Lifetime of Produced Components. *The Arabian Journal for Science and Engineering. Section B, Engineering* [online]. Heidelberg: Springer Nature B.V, 2019, **44**(9), 7723-7735 [cit. 2020-02-29]. DOI: 10.1007/s13369-019-03887-7. ISSN 13198025. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/2266404751/>.
- (13) AYESTA, I, B IZQUIERDO, J.A SANCHEZ, J.M RAMOS, S PLAZA, I POMBO a N ORTEGA. Optimum electrode path generation for EDM manufacturing of aerospace components. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* [online]. Elsevier, 2016, **37**, 273-281 [cit. 2020-03-06]. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.04.003. ISSN 0736-5845. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0736584515000587>
- (14) PENTA TRADING s.r.o [online]. 2016 © PENTA TRADING, spol. s r.o. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z : <https://www.penta-edm.cz/>.
- (15) CZELUSNIAK, Tiago, Fred AMORIM, Camila HIGA a Armin LOHRENGEL. Development and application of new composite materials as EDM electrodes manufactured via selective laser sintering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer London, 2014, **72**(9-12), 1503-1512 [cit. 2020-03-06]. DOI: 10.1007/s00170-014-5765-z. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-014-5765-z>
- (16) DI, Shi Chun, Xu Yang CHU, Dong Bo WEI a Hong ZHANG. Experimental Study of Kerf Machined by Micro-WEDM. *Materials Science Forum* [online]. Trans Tech Publications, 2009, **626**, 261-266 [cit. 2020-03-07]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.626-627.261. ISBN 0878493115. ISSN 0255-5476. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/MSF.626-627.261>
- (17) Application of wire cut EDM machining - Kingred Electrical And Mechanical Technology Co., Ltd.. Wire EDM | Sinker EDM | Small Hole EDM | Tire Mold EDM | KINGRED EDM Machine [online]. Copyright © 2011 Kingred Electrical And Mechanical Technology Co., Ltd.. [cit. 07.03.2020]. Dostupné z: <http://www.kingedms.com/blog/index.php/2011/11/application-of-wire-cut-edm-machining/>
- (18) MATOUŠEK, Jan. Efektivní hloubení a výroba elektrod. [online]. MM spektrum, 2013, **12**, 46-47. Copyright © 2020 www.mmspektrum.com [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/efektivni-hloubeni-a-vyroba-elektrod.html>
- (19) Použití na elektrody | TEDOK, spol. s r.o.. TEDOK, spol. s r.o. | Grafitové materiály EDM [online]. Copyright © [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: <http://www.tedok.cz/edm-grafity/proc-si-vybrat-poco-grafit/>
- (20) When to EDM July 08 [online]. Copyright © GF Machining Solutions Management SA. All rights reserved [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: http://www.gfms.com/content/dam/gfac_country_US/PDF/When_to_EDM_JULY_08.pdf.
-

-
- (21) Using Copper and Graphite Electrodes: The Big Picture : MoldMaking Technology . MoldMaking Technology [online]. Copyright © Gardner Business Media, Inc. 2020 [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/using-copper-and-graphite-electrodes-look-at-the-big-picture>
- (22) YILMAZ, Oguzhan a M. OKKA. Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer-Verlag, 2010, **51**(1), 185-194 [cit. 2020-03-08]. DOI: 10.1007/s00170-010-2625-3. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-010-2625-3>
- (23) Copper EDM Drilling Electrodes, Rs 10 /piece, Tech CNC Solutions | ID: 17966854091. IndiaMART - Indian Manufacturers Suppliers Exporters Directory, India Exporter Manufacturer [online]. Copyright © 1996 [cit. 08.03.2020]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/edm-drilling-electrodes-17966854091.html>
- (24) FANUC GLOBAL. FANUC GLOBAL [online]. Copyright © 2017 [cit. 25.03.2020]. Dostupné z: <https://www.fanuc.com/>
- (25) Wire edm | die sinker edm | milling | laser texturing | GF Machining Solutions. [online]. Copyright © GF Machining Solutions Management SA. All rights reserved. [cit. 15.04.2020]. Dostupné z: <https://www.gfms.com/com/en.html>
- (26) Home - Sodick Europe Ltd.. Home - Sodick Europe Ltd. [online]. Copyright © 2020 Sodick Europe Ltd. [cit. 15.04.2020]. Dostupné z: <https://www.sodick.org/>
- (27) Metalworking, Metal Fabrication Machines | MC Machinery Systems. Metalworking, Metal Fabrication Machines | MC Machinery Systems [online]. Copyright © 2020 [cit. 15.04.2020]. Dostupné z: <https://www.mcmachinery.com/>
- (28) Home | exeron - EDM + HSC Werkzeugmaschinen. [online]. Copyright © 2020 [cit. 15.04.2020]. Dostupné z: <https://www.exeron.de/en/Home>
- (29) ONA \ We are EDM. ONA \ We are EDM [online]. Copyright © ONA Electroerosi [cit. 15.04.2020]. Dostupné z: <http://www.onaedm.com/en/ona-edm>
- (30) Aerospace Techniques Precision Machining & Grinding. Aerospace Techniques Precision Machining & Grinding [online]. Copyright © 2009 - 2020 [cit. 06.05.2020]. Dostupné z: <https://www.aerospacetechniques.com/>
- (31) AYESTA, I, B IZQUIERDO, J.A SANCHEZ, J.M RAMOS, S PLAZA, I POMBO a N ORTEGA. Optimum electrode path generation for EDM manufacturing of aerospace components. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* [online]. Elsevier, 2016, 37, 273-281 [cit. 2020-05-20]. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.04.003. ISSN 0736-5845.
- (32) EROWA LTD. Redirecting to <https://www.erowa.com/en> [online]. Copyright © 2020 [cit. 20.05.2020]. Dostupné z: <https://www.erowa.com/en>
- (33) Nickel Nimonic 263 | Tech Steel & Materials. Tech Steel & Materials Our Mission - Tech Steel & Materials [online]. Copyright © 2020 Tech Steel [cit. 20.05.2020]. Dostupné z: <https://www.techsteel.net/alloy/nickel/nimonic-263>
-

-
- (34) Nimonic 263 nickel based alloy supplier | HARALD PIHL | Harald Pihl. Largest stock in Europe of special alloys and titanium | Harald Pihl [online]. Copyright © 2020 Harald Pihl AB. All rights reserved. [cit. 20.05.2020]. Dostupné z: <https://www.haraldpihl.com/en/products/nickel-alloys/nimonic-263/>
- (35) MANUPATI, V. K. et al. A study of copper and zinc contamination on the work piece surface based on wedm. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics [online]. 2018, no. 4, s. 255-262. [cit. 20.05.2020]. ISSN 25594397. Dostupné z: https://search.proquest.com/docview/2305777111?rfr_id=info%3Axri%2Fsid%3Aprimo
- (36) MOURALOVA, Katerina, Tomas PROKES, Libor BENES a Josef BEDNAR. The Influence of WEDM Parameters Setup on the Occurrence of Defects When Machining Hardox 400 Steel. Materials [online]. 2019, roč. 12, č. 22, s. 3758. [cit. 20.05.2020]. DOI:10.3390/ma12223758. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/22/3758>
- (37) METELKOVÁ, Jitka. Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 77 s. 4 příloh. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/33003>
- (38) CEITEC Nano – Research Infrastructure. CEITEC Nano – Research Infrastructure [online]. Copyright © Copyright 2020 [cit. 22.05.2020]. Dostupné z: <http://nano.ceitec.cz/>
- (39) EDS – principle [online]. Copyright © 2020 Yale University [cit. 22.05.2020]. Dostupné z: <https://ywcmatsci.yale.edu/edx-principle>
- (40) SEM, FIB-SEM and micro-CT solutions for science | TESCAN. SEM, FIB-SEM and micro-CT solutions for science | TESCAN [online]. Copyright © 2020 TESCAN ORSAY HOLDING, a.s. [cit. 22.05.2020]. Dostupné z: <https://www.tescan.com/>
- (41) SHASTRI, Renu K. a Chinmaya P. MOHANTY. Machinability investigation on Nimonic C263 alloy in electric discharge machine. Materials Today: Proceedings [online]. 2020 [cit. 2020-05-28]. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.133. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S2214785319341446>
- (42) PANT, Piyush a Pushpendra S. BHARTI. Electrical Discharge Machining (EDM) of nickel-based nimonic alloys: A review. Materials Today: Proceedings [online]. 2020, 25, 765-772 [cit. 2020-06-20]. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.09.007. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221478531933250X>
- (43) MANDAL, Amitava, Amit DIXIT, S. CHATTOPADHYAYA, A. PARAMANIK, Sergej HLOCH a Grzegorz KRÓLCZYK. Improvement of surface integrity of Nimonic C 263 super alloy produced by WEDM through various post-processing techniques. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. London: Springer London, 2017, 93(1), 433-443 [cit. 2020-06-20]. DOI: 10.1007/s00170-017-9993-x. ISSN 0268-3768. Dostupné z: https://search.proquest.com/docview/1950837958?rfr_id=info%3Axri%2Fsid%3Aprimo
-

-
- (44) BISARIA, Himanshu a Pragma SHANDILYA. Experimental investigation on wire electric discharge machining (WEDM) of Nimonic C-263 superalloy. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. Taylor & Francis, 2019, 34(1), 83-92 [cit. 2020-06-22]. DOI: 10.1080/10426914.2018.1532589. ISSN 1042-6914. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426914.2018.1532589>
- (45) SHASTRI, Renu K. a Chinmaya P. MOHANTY. Machinability investigation on Nimonic C263 alloy in electric discharge machine. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020 [cit. 2020-06-22]. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.133. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S2214785319341446>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A ZNAČEK

| Zkratka | Popis |
|----------------------------------|--|
| AFM | Obrábění tokem abrasiva (<i>“Abrasive Flow Machining”</i>) |
| Ag | Stříbro |
| Al | Hliník |
| B | Bor |
| Bi | Bismut |
| C | Uhlík |
| CH ₃ COOH | Kyselina octová |
| CNC | Číslicové řízení počítačem (<i>“Computer Numeric Control”</i>) |
| Co | Kobalt |
| Cr | Chrom |
| Cu | Měď |
| EDG | Elektroerozivní broušení (<i>“Electric Discharge Grinding”</i>) |
| EDM | Elektroerozivní obrábění (<i>“Electric Discharge Machining”</i>) |
| EDX | Energiově-disperzní detektor rentgenového záření (<i>“Energy-Dispersive X-ray spectroscopy”</i>) |
| Fe | Železo |
| HCl | Kyselina chlorovodíková |
| HSC | Vysokorychlostní obrábění (<i>“High Speed Cutting”</i>) |
| Mo | Molybden |
| Mn | Mangan |
| Na ₂ SiO ₃ | Křemičitan sodný |
| Ni | Nikl |

| | |
|------------------|---|
| HNO ₃ | Kyselina dusičná |
| O | Kyslík |
| Pb | Olovo |
| Ra | Průměrná aritmetická úchylka profilu |
| Rq | Průměrná kvadratická úchylka profilu |
| Rz | Nejvyšší výška profilu |
| S | Síra |
| Sa | Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu |
| Sq | Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu |
| Si | Křemík |
| SLS | Selektivní spékání kovového prášku laserem („ <i>Selective Laser Sintering</i> “) |
| Sz | Maximální výška omezené stupnice povrchu |
| Ti | Titan |
| WEDM | Elektroerozivní drátové řezání („ <i>Wire Electric Discharge Machining</i> “) |

| Označení | Jednotka | Popis |
|----------------|-------------------------------------|---|
| a _p | [mm] | Hloubka řezu |
| f | [s ⁻¹] | Frekvence výbojů |
| i | [A] | Proud |
| I | [A] | Pracovní proud |
| K | [mm ³ ·J ⁻¹] | Součinitel úměrnosti pro anodu a katodu |
| Lh | [mm] | Opotřebení hrany |
| Lp | [mm] | Opotřebení boční strany |
| Lv | [mm] | Opotřebení hrotu |
| m _v | [%] | Relativní opotřebení nástrojové elektrody |
| Q _v | [mm ³ ·s ⁻¹] | Objem odebraného materiálu |

| | | |
|------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| T_{off} | [μs] | Doba prodlevy |
| T_{on} | [μs] | Doba trvání jednoho pulzu |
| t | [μs] | Doba trvání výboje |
| u | [V] | Napětí |
| U_z | [V] | Zápalné napětí |
| v | [$\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] | Rychlost hloubení |
| V_E | [m^3] | Objemový úbytek nástrojové elektrody |
| V_i | [mm^3] | Objem odebraného materiálu |
| V_M | [m^3] | Objemový úbytek materiálu obrobku |
| W | [J] | Energie výboje |
| η | [-] | Účinnost elektrického výboje |

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 1.1 Nákres kráterů pozorovaných Josephem Priestleyem [3]. | 10 |
| Obr. 1.2 Lazarenkovo zapojení [2]. | 11 |
| Obr. 1.3 Princip stroje pro elektroerozivní obrábění [1, 4]. | 13 |
| Obr. 1.4 Časový průběh jediného impulzu [1, 4]. | 13 |
| Obr. 1.5 Přípravná fáze [6]. | 14 |
| Obr. 1.6 Fáze výboje [6]. | 14 |
| Obr. 1.7 Fáze vypnutí [6]. | 15 |
| Obr. 1.8 Závislý generátor [5]. | 16 |
| Obr. 1.9 Rotační nezávislý generátor [5]. | 17 |
| Obr. 1.10 Polovodičový nezávislý generátor [5]. | 17 |
| Obr. 1.11 Proudění dielektrika mezi obrobkem a nástrojovou elektrodou [1, 5, 8]. | 19 |
| Obr. 1.12 Textura povrchu tvořená krátery po elektroerozivním hloubení [11]. | 20 |
| Obr. 1.13 Odpad elektroeroze tvořený ztuhými kuličkami roztaveného materiálu nástrojové elektrody a obrobku [6]. | 20 |
| Obr. 1.14 Trhliny v příčném řezu slitiny titanu Ti-6Al-4V po elektroerozivním drátovém řezání [12]. | 21 |
| Obr. 1.15 Charakteristické vrstvy povrchu materiálu po EDM [1, 2]. | 21 |
| Obr. 1.16 Princip elektroerozivního drátového řezání [1]. | 22 |
| Obr. 1.17 32 μm široká drážka obráběná drátem o průměru 30 μm [16]. | 23 |
| Obr. 1.18 Ukázka výrobků elektroerozivního drátového řezání [17]. | 23 |
| Obr. 1.19 Elektroerozivní drátová řezačka FANUC ROBOCUT α -C600iB [24]. | 23 |
| Obr. 1.20 Princip elektroerozivního broušení [1]. | 24 |
| Obr. 1.21 Opotřebenění nástrojové elektrody [1]. | 25 |
| Obr. 1.22 Možnosti pohybu nástrojové elektrody [20]. | 26 |
| Obr. 1.23 Multi-kanálová měděná elektroda [23]. | 27 |
| Obr. 1.24 Ukázka tvarové elektrody z grafitu [18]. | 27 |
| Obr. 1.25 Žebrová elektroda z grafitu [19]. | 27 |
| Obr. 1.26 AgieCharmilles FORM E 600 [25]. | 28 |
| Obr. 1.27 ONA QX6 [29]. | 29 |
| Obr. 1.28 Exeron EDM 310 MF 30 [14]. | 30 |
| Obr. 1.29 Sodick AG200L [26]. | 30 |
| Obr. 1.30 Gantry Eagle 1400 [27]. | 31 |
| Obr. 1.31 Forma pro výrobu pneumatik [25]. | 32 |
| Obr. 1.32 Přední mřížka vozu značky Mercedes vyrobena firmou MAIER s pomocí hloubičky ONA QX6 [29]. | 32 |
| Obr. 1.33 Jeden segment vodicích lopatek trysky a detail drážky, vyrobené pomocí EDM, pro vložení těsnění mezi jednotlivé segmenty tvořící celou turbínu [29]. | 33 |
| Obr. 2.1 Hloubička PENTA 433GS CNC. | 35 |
| Obr. 2.2 Základní obrazovka stroje. | 35 |
| Obr. 2.3 Nastavení souřadnic. | 36 |

| | |
|--|----|
| Obr. 2.4 Sledování procesu erodování. | 36 |
| Obr. 2.5 Měděná nástrojová elektroda (vlevo) v upínacím systému EROWA (vpravo) [32]. | 37 |
| Obr. 2.6 12 vzorků experimentálního hloubení. | 38 |
| Obr. 2.7 Proces elektroerozivního hloubení vzorků v pracovní vaně pod hladinou dielektrika. | 39 |
| Obr. 2.8 Nastavení parametrů procesu elektroerozivního hloubení. | 40 |
| Obr. 2.9 Grafické zobrazení vlivu pracovních parametrů na rychlost hloubení. | 40 |
| Obr. 3.1 3D kontaktní profilometr Dektak XT [38]. | 41 |
| Obr. 3.2 Grafy vyhodnocení profilových a plošných parametrů. | 42 |
| Obr. 3.3 Vliv pracovních parametrů na jakost povrchu. | 43 |
| Obr. 3.4 Elektronový rastrovací mikroskop LYRA3 od firmy Tescan [40]. | 43 |
| Obr. 3.5 Morfologie vzorku č. 7. | 44 |
| Obr. 3.6 Vzorek č. 9 vlevo zvětšení 500x, vpravo 1500x. | 45 |
| Obr. 3.7 Porovnání morfologie vzorků č. 1 a č. 12 se stejným zvětšením 500x. | 45 |
| Obr. 3.8 Vzorek č. 11 s vyznačenými místy měření. | 46 |
| Obr. 3.9 Zastoupení jednotlivých prvků v barevném rozlišení. | 47 |
| Obr. 3.10 Bruska/leštička TEGRAMIN 30 [38]. | 47 |
| Obr. 3.11 Příčné řezy vzorky č. 1 (vlevo) a č. 9 (vpravo). | 48 |
| Obr. 3.12 Příčný řez vzorkem č. 4. | 48 |
| Obr. 3.13 Znázornění aproximační kružnice u rohů nástrojových elektrod vzorků č. 3 a 4. | 50 |
| Obr. 3.14 Grafické znázornění vlivu pracovních parametrů na opotřebení nástrojové elektrody. | 50 |
| Obr. 3.15 Morfologie povrchu nástrojových elektrod vzorků č. 4 a 6. | 51 |

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

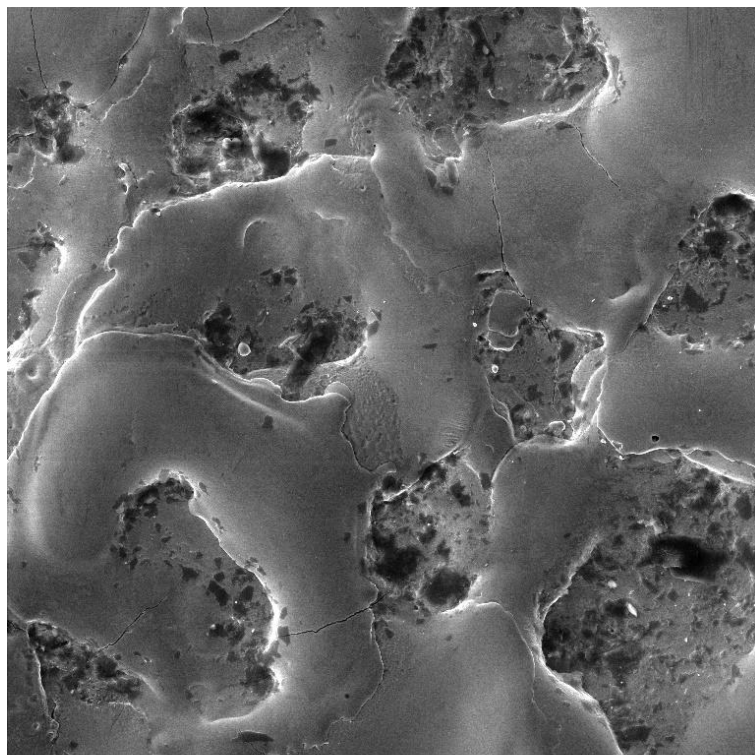
| | |
|--|----|
| Tab. 1.1 Výstupní technologické parametry elektroerozivního obrábění [4, 14]. | 12 |
| Tab. 2.1 Technická data hloubičky PENTA 433GS CNC [14]. | 34 |
| Tab. 2.2 Technická data dielektrika Iono Plus IME-MH [6]. | 37 |
| Tab. 2.3 Chemické složení slitiny Nimonic 263 [33]. | 38 |
| Tab. 2.4 Parametry experimentálního elektroerozivního hloubení. | 39 |
| Tab. 3.1 Naměřené parametry topografie vzorků. | 41 |
| Tab. 3.2 Zastoupení jednotlivých prvků v hm. procentech pro dvě měření vzorku č. 11. | 46 |
| Tab. 3.3 Naměřené hodnoty opotřebení jednotlivých vzorků. | 49 |

SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|-----------|---|
| Příloha 1 | Snímky povrchu jednotlivých vzorků po erodování |
| Příloha 2 | Protokol z EDX pro vzorek č. 11 |

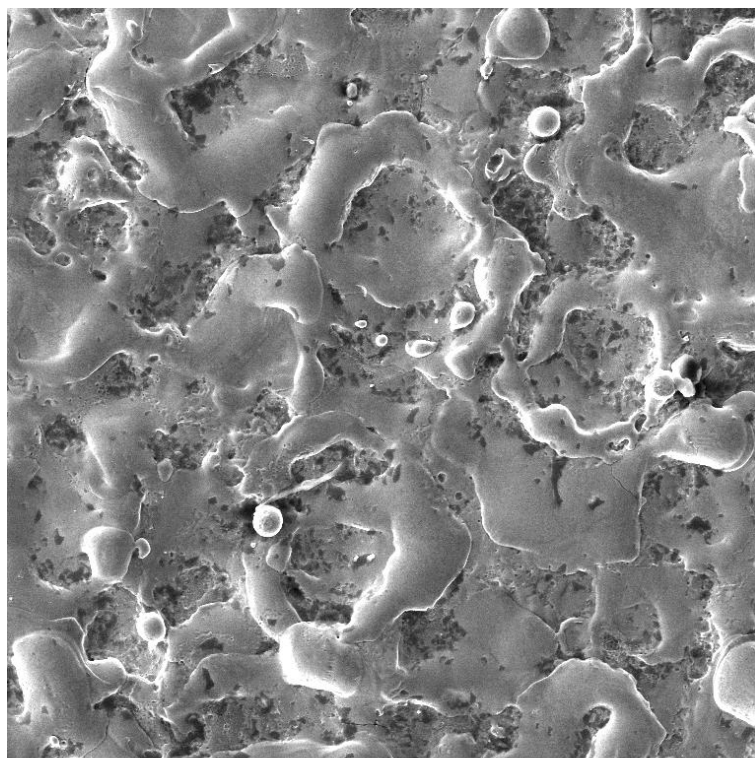
PŘÍLOHA 1 1/6

Snímky povrchu jednotlivých vzorků po erodování



Vzorek č. 1

100 μm

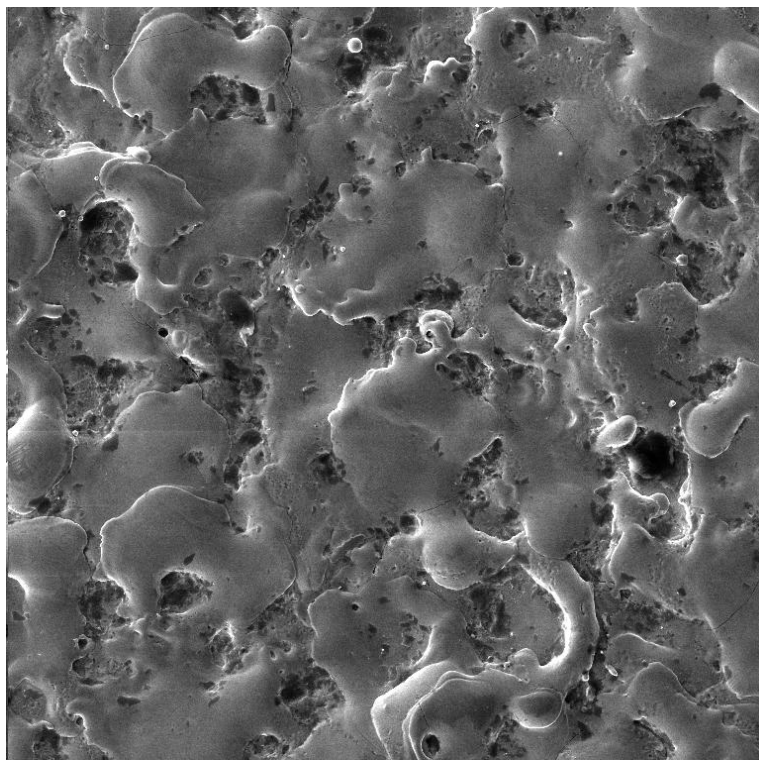


Vzorek č. 2

100 μm

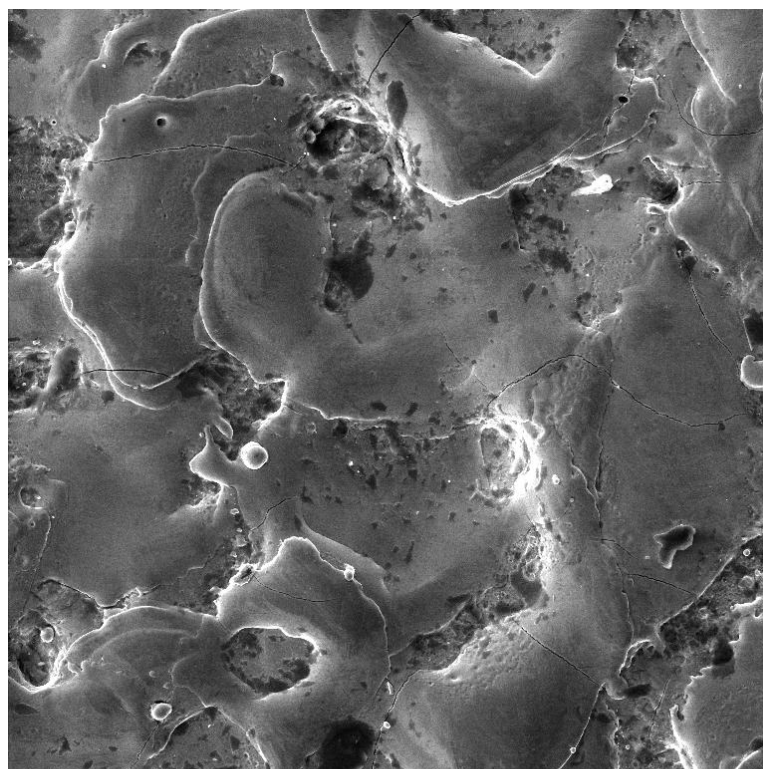
PŘÍLOHA 1 2/6

Snímky povrchu jednotlivých vzorků po erodování



Vzorek č. 3

100 μm

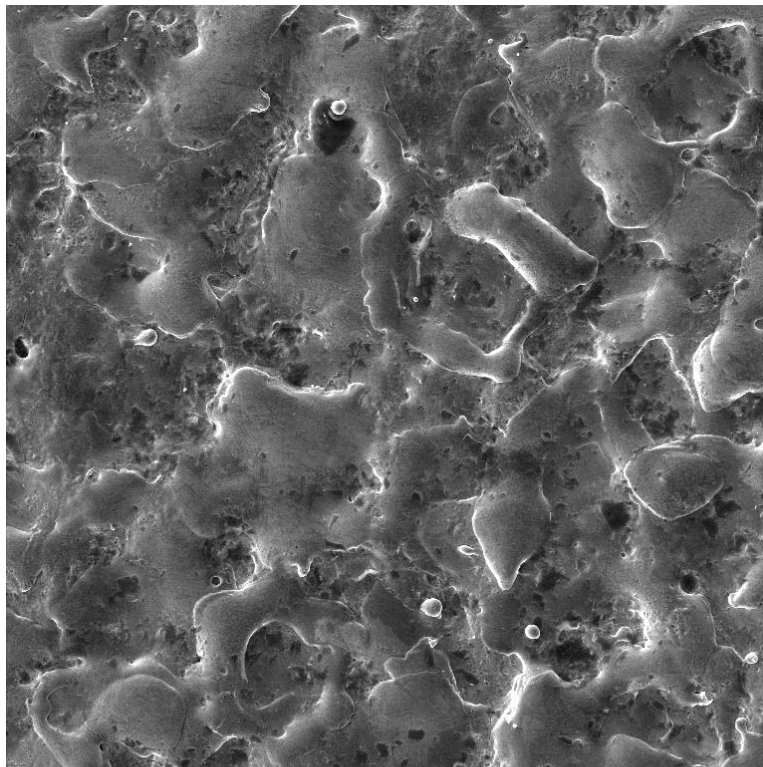


Vzorek č. 4

100 μm

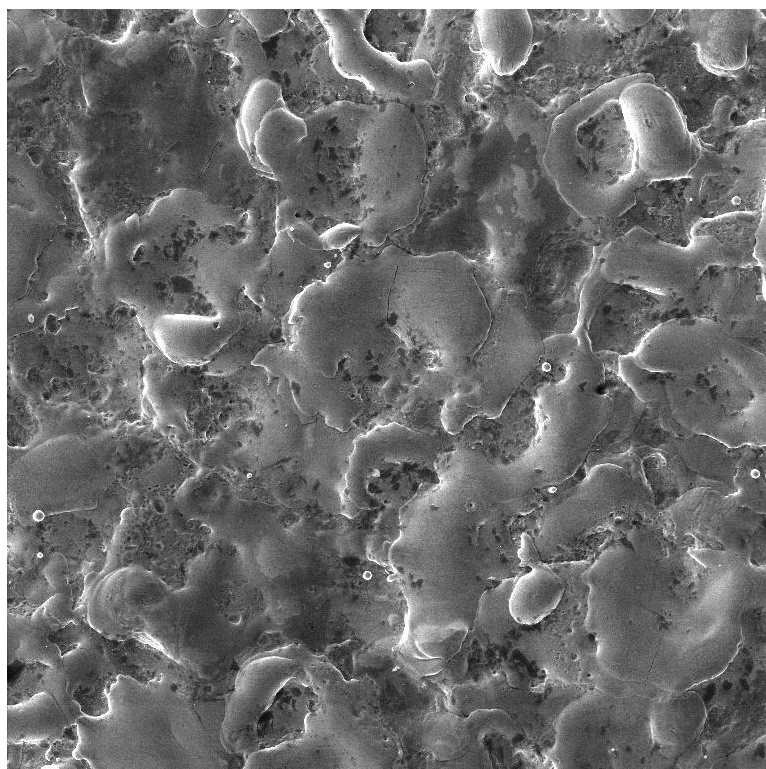
PŘÍLOHA 1 3/6

Snímky povrchu jednotlivých vzorků po erodování



Vzorek č. 5

100 μm

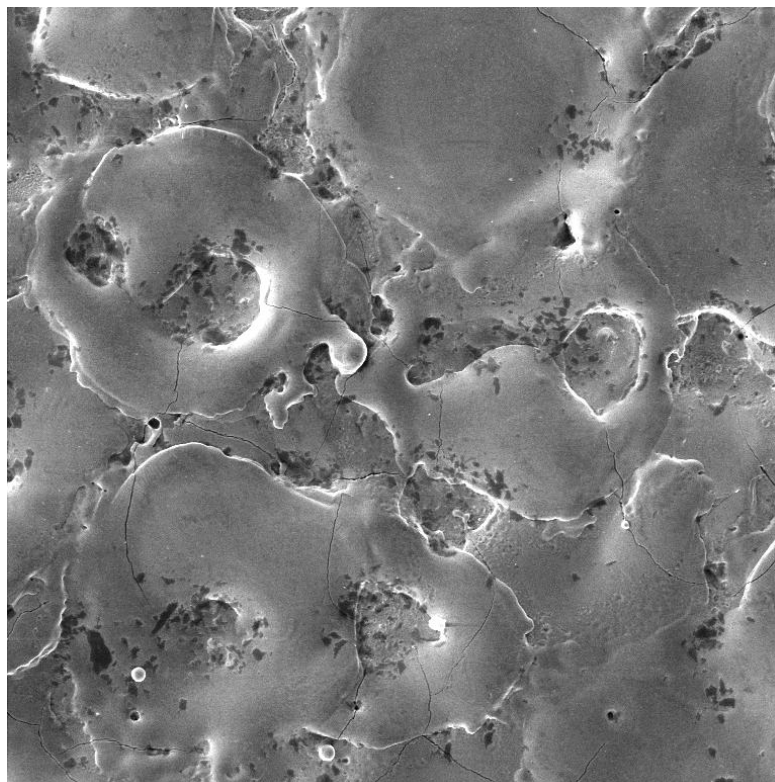


Vzorek č. 6

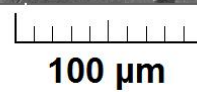
100 μm

PŘÍLOHA 1 4/6

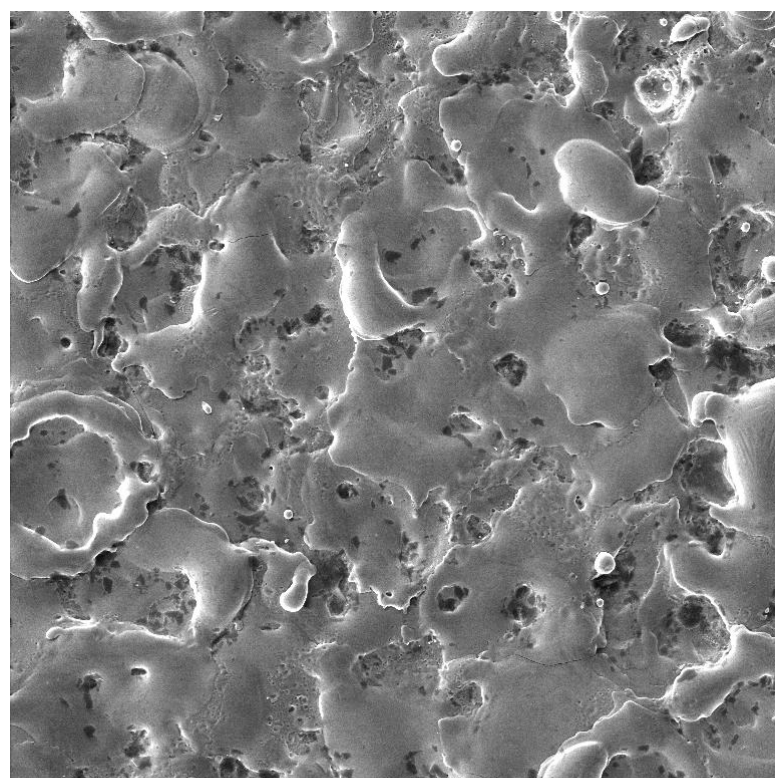
Snímky povrchu jednotlivých vzorků po erodování



Vzorek č. 7



100 µm



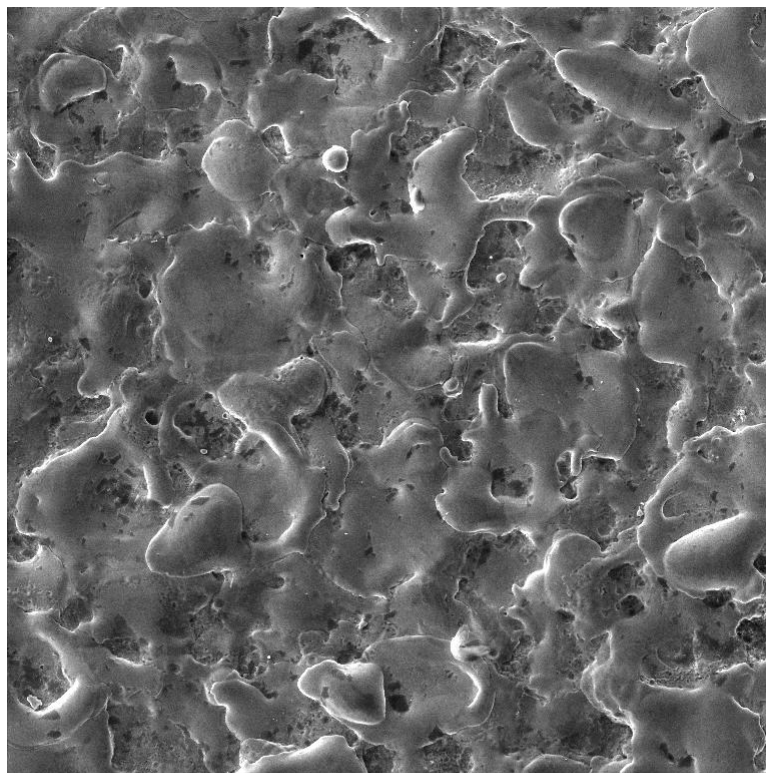
Vzorek č. 8



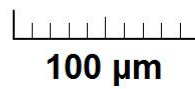
100 µm

PŘÍLOHA 1 5/6

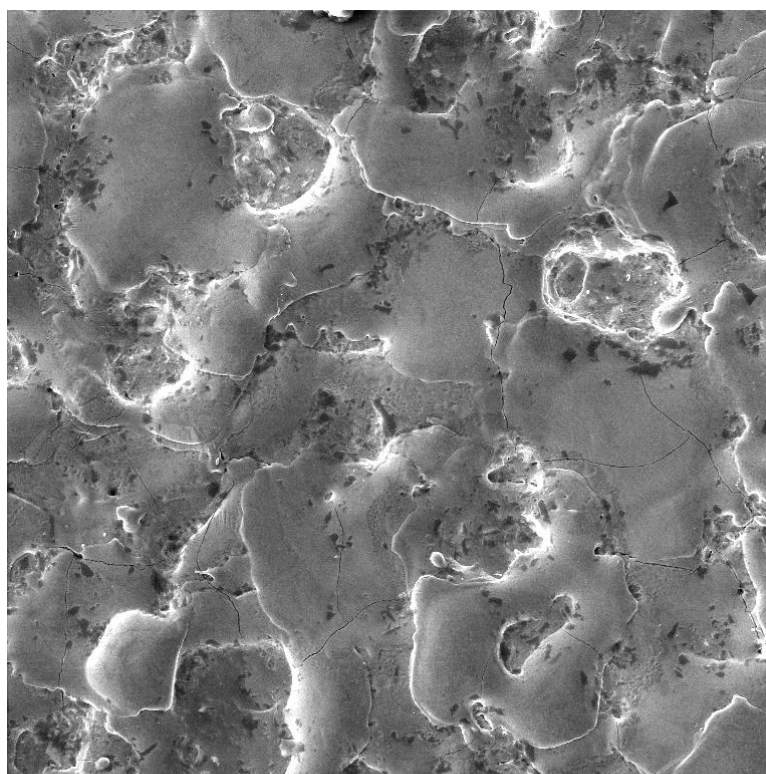
Snímky povrchu jednotlivých vzorků po erodování



Vzorek č. 9



100 µm



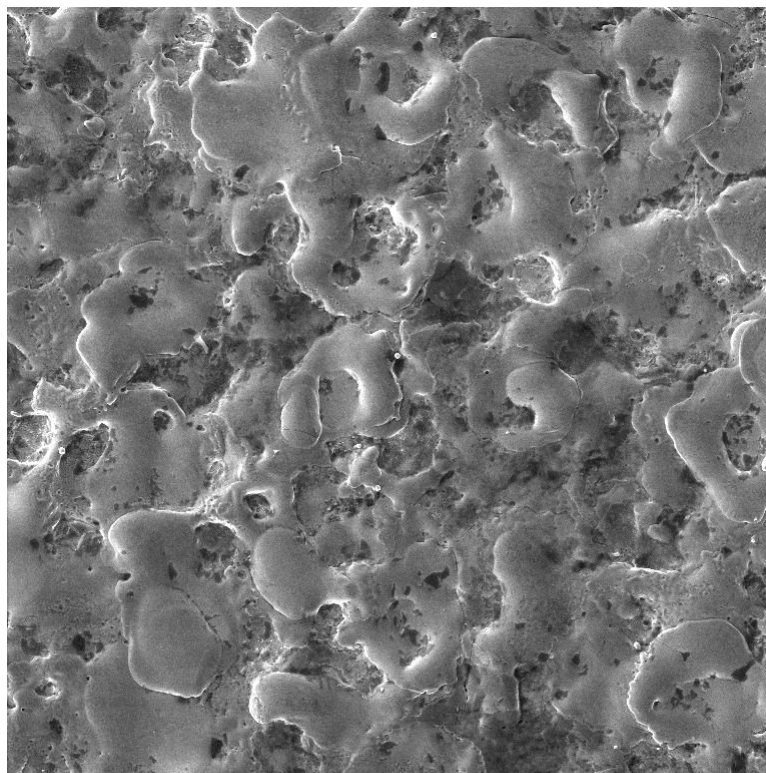
Vzorek č. 10



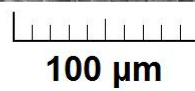
100 µm

PŘÍLOHA 1 6/6

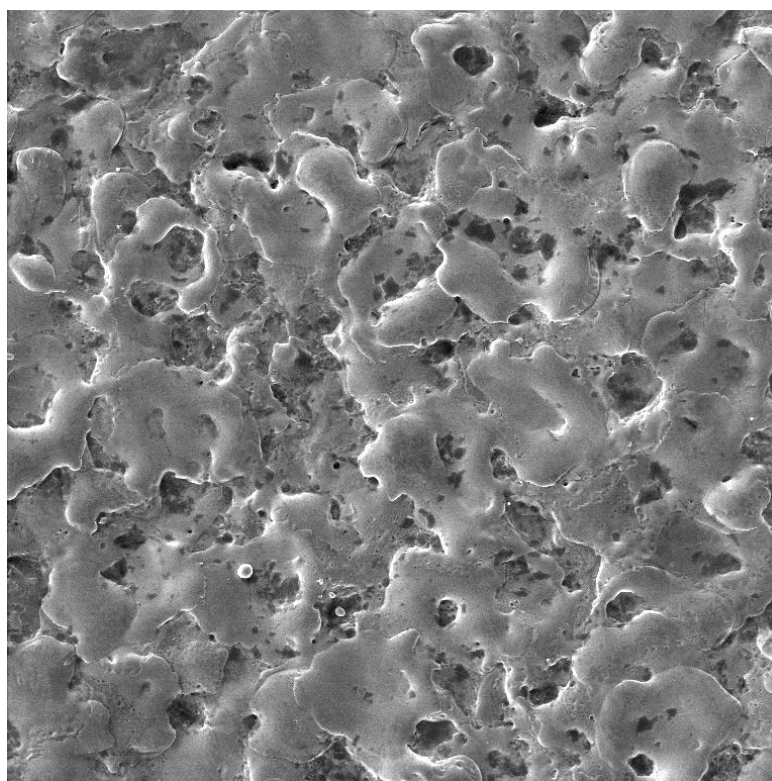
Snímky povrchu jednotlivých vzorků po erodování



Vzorek č. 11



100 μm



Vzorek č. 12



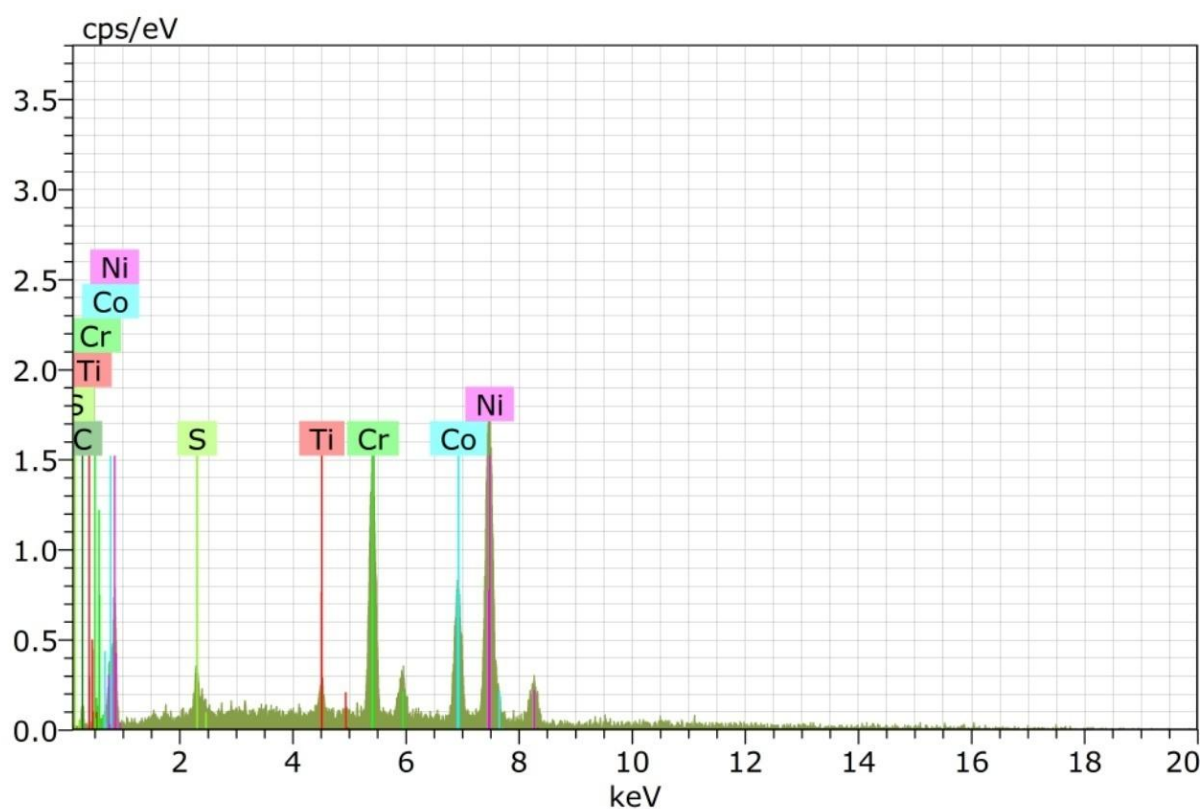
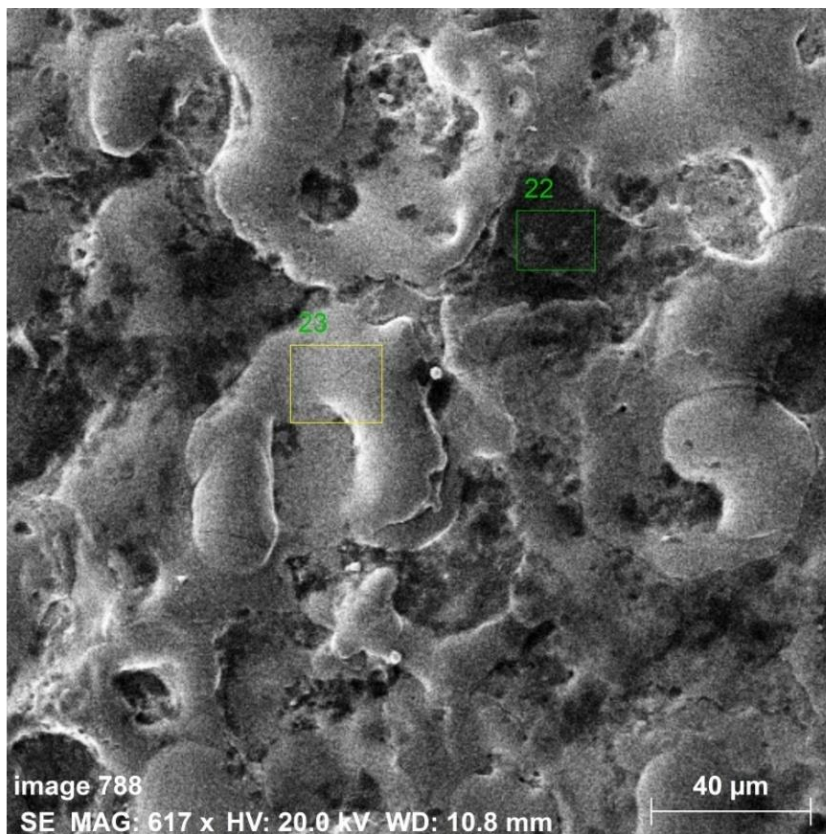
100 μm

PŘÍLOHA 2 1/7

Protokol z EDX pro vzorek č. 11

Application Note

Company / Department



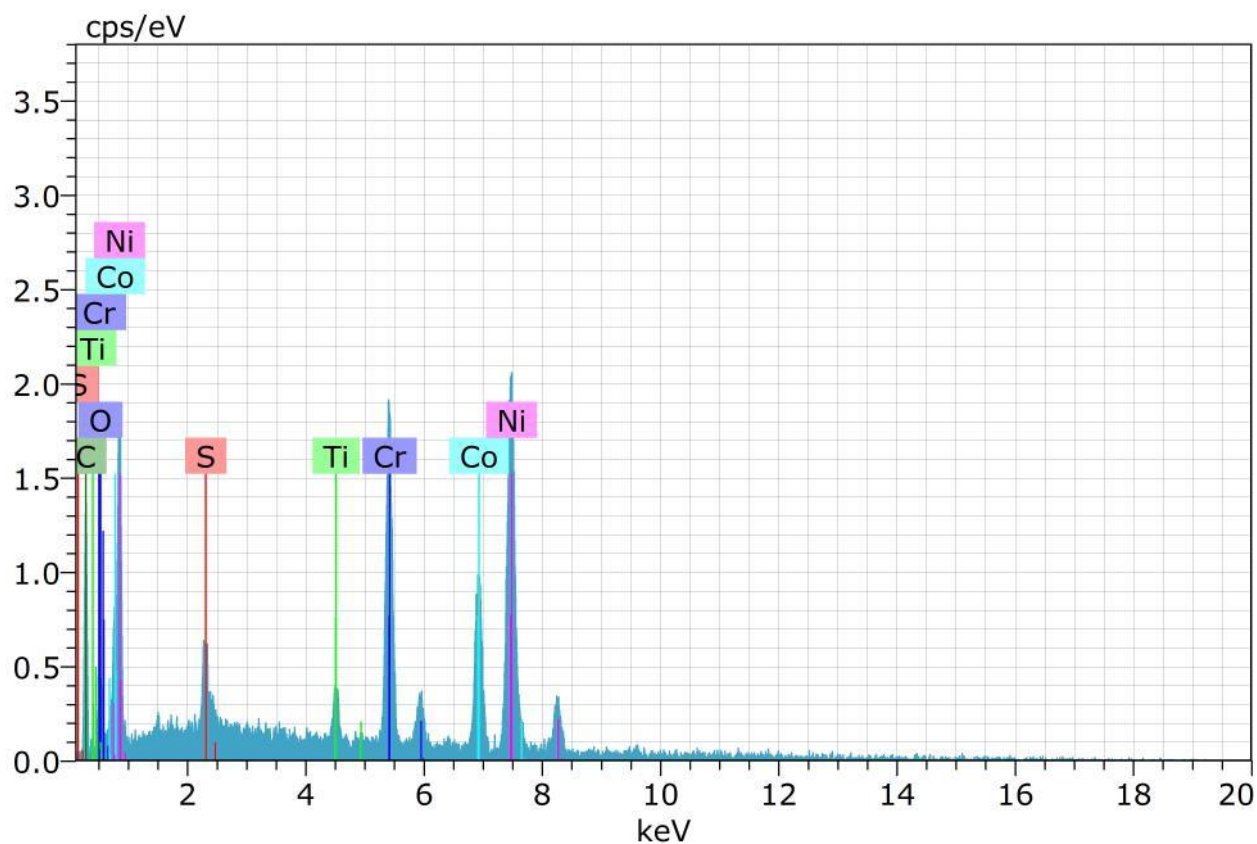
PŘÍLOHA 2 2/7

Protokol z EDX pro vzorek č. 11



Spectrum:23

| El | AN | Series | unn. C [wt.%] | norm. C [wt.%] | Atom. C [at.%] | Error | (1 Sigma) [wt.%] |
|--------|----|----------|------------------|-------------------|-------------------|-------|---------------------|
| C | 6 | K-series | 3.27 | 3.94 | 16.00 | | 1.78 |
| S | 16 | K-series | 2.29 | 2.76 | 4.20 | | 0.19 |
| Ti | 22 | K-series | 1.95 | 2.34 | 2.39 | | 0.15 |
| Cr | 24 | K-series | 13.90 | 16.72 | 15.70 | | 0.49 |
| Co | 27 | K-series | 17.88 | 21.50 | 17.81 | | 0.69 |
| Ni | 28 | K-series | 43.86 | 52.75 | 43.89 | | 1.42 |
| Total: | | | 83.15 | 100.00 | 100.00 | | |



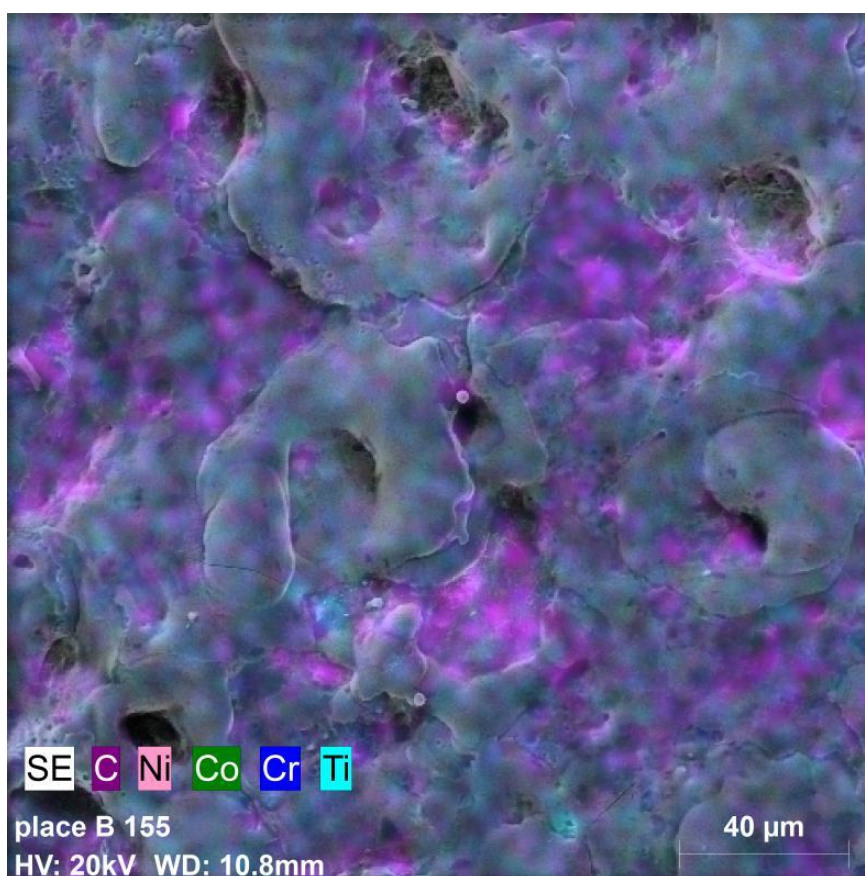
PŘÍLOHA 2 3/7

Protokol z EDX pro vzorek č. 11



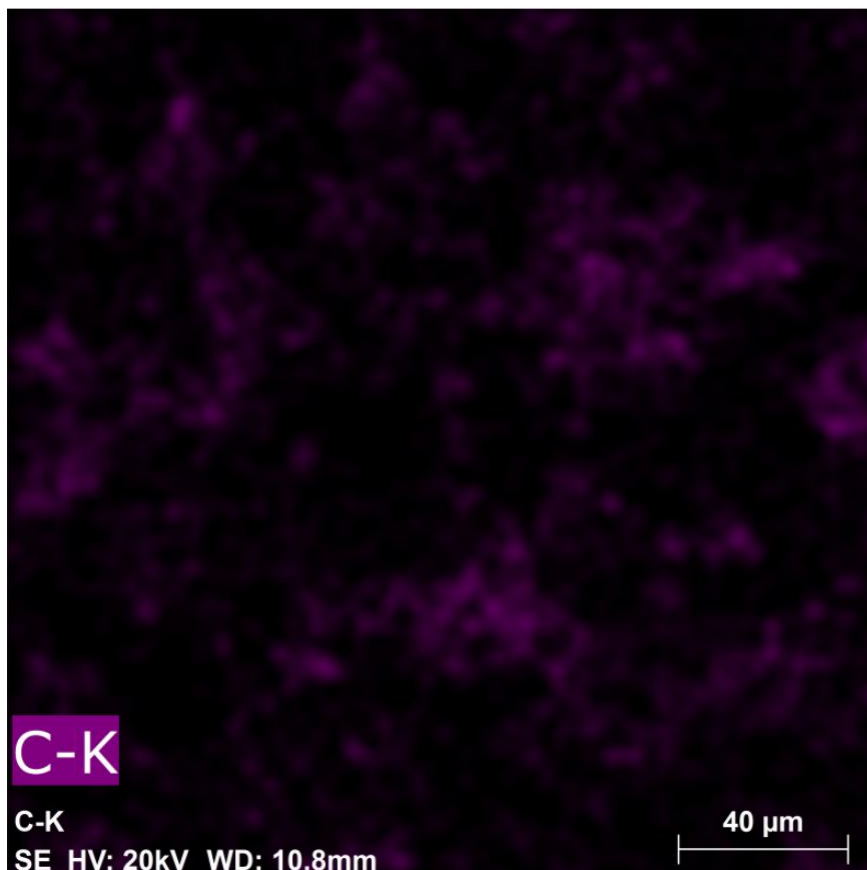
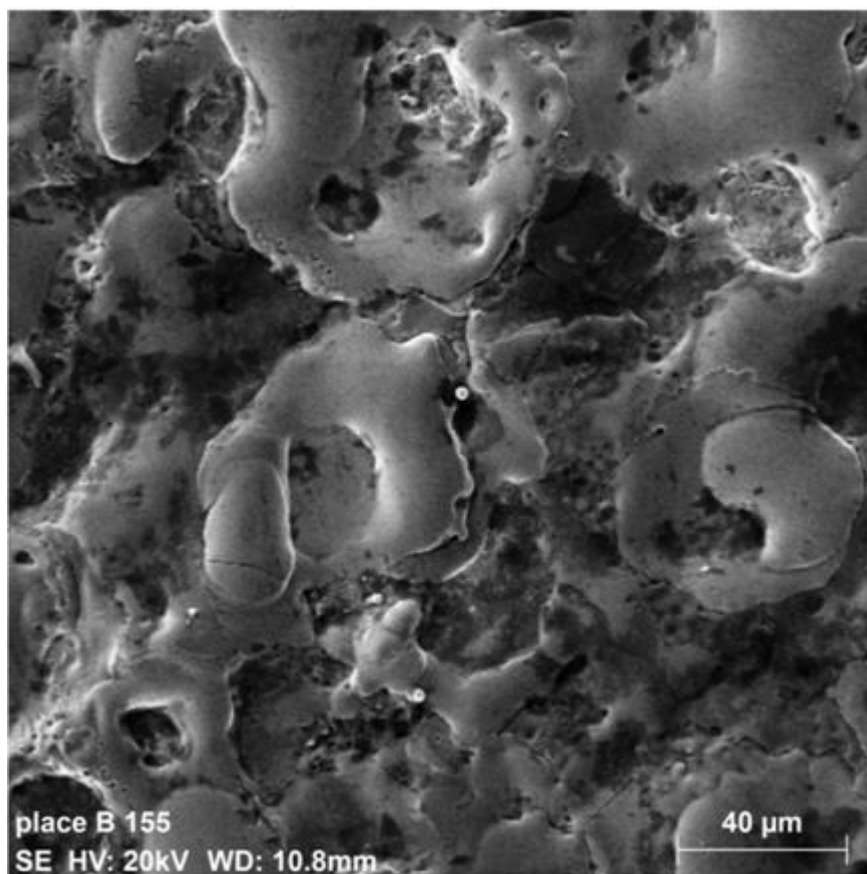
Spectrum:22

| El | AN | Series | unn. C [wt.%] | norm. C [wt.%] | Atom. C [at.%] | Error | (1 Sigma) [wt.%] |
|--------|----|----------|------------------|-------------------|-------------------|-------|---------------------|
| C | 6 | K-series | 19.74 | 23.83 | 56.70 | | 4.38 |
| O | 8 | K-series | 2.70 | 3.26 | 5.83 | | 0.92 |
| S | 16 | K-series | 1.66 | 2.00 | 1.78 | | 0.12 |
| Ti | 22 | K-series | 1.94 | 2.34 | 1.40 | | 0.13 |
| Cr | 24 | K-series | 12.44 | 15.02 | 8.25 | | 0.42 |
| Co | 27 | K-series | 13.11 | 15.83 | 7.68 | | 0.48 |
| Ni | 28 | K-series | 31.24 | 37.71 | 18.36 | | 0.98 |
| Total: | | | 82.82 | 100.00 | 100.00 | | |



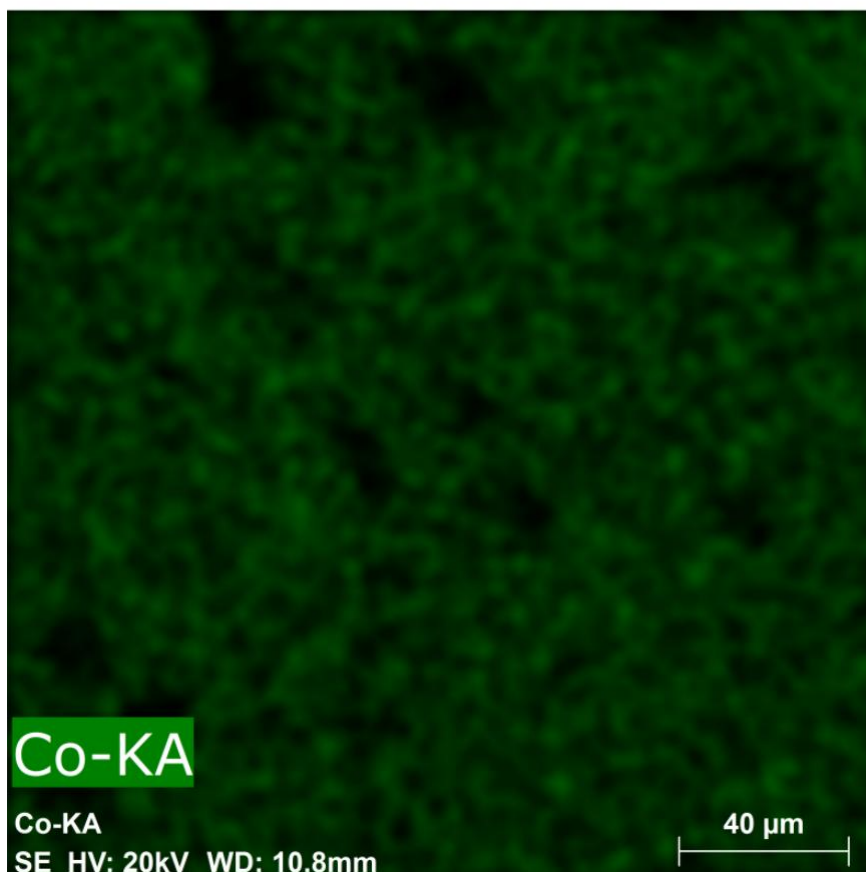
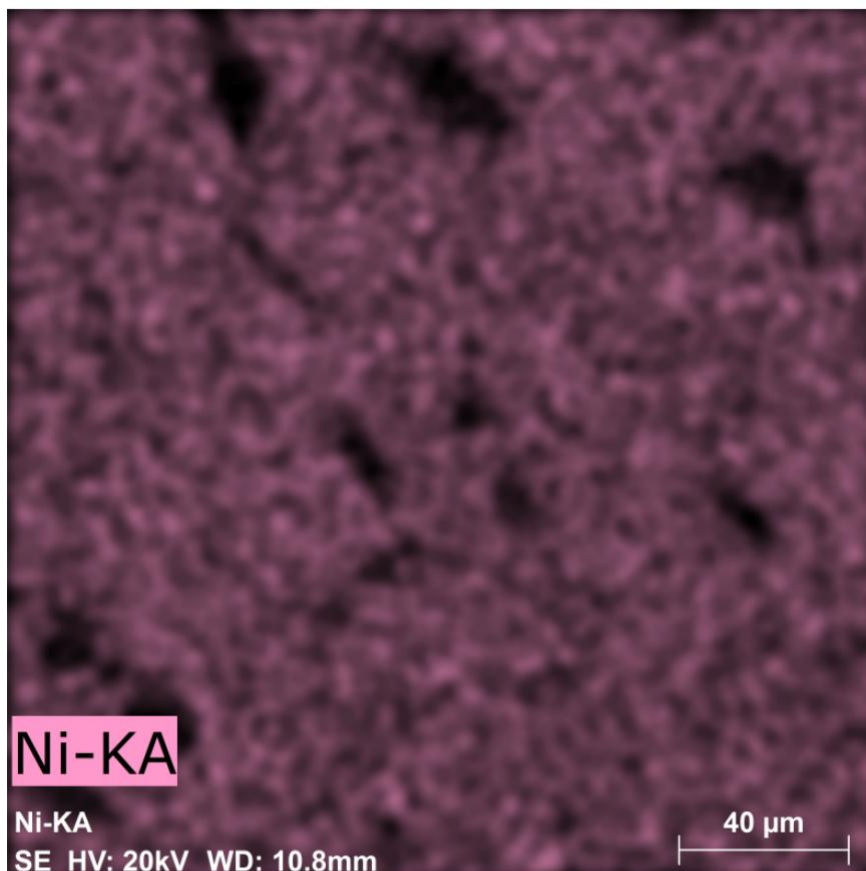
PŘÍLOHA 2 4/7

Protokol z EDX pro vzorek č. 11



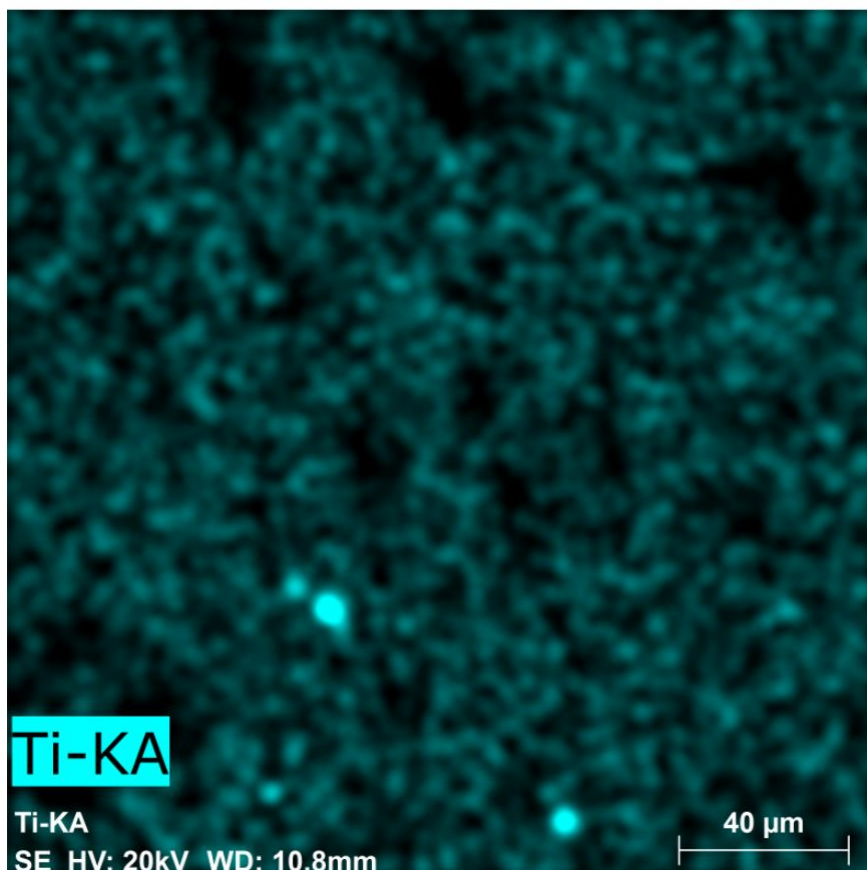
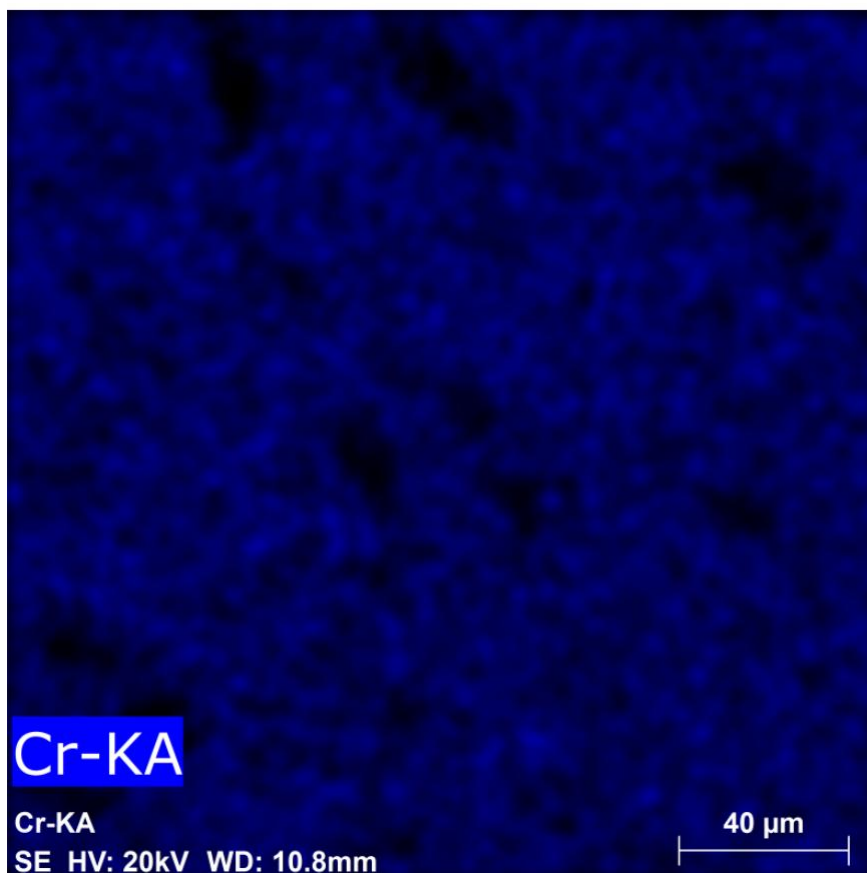
PŘÍLOHA 2 5/7

Protokol z EDX pro vzorek č. 11



PŘÍLOHA 2 6/7

Protokol z EDX pro vzorek č. 11



PŘÍLOHA 2 7/7

Protokol z EDX pro vzorek č. 11

