



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ MATERIÁLŮ VYUŽÍVANÝCH V LETECKÉM PRŮMYSLU

ELECTROEROSION MACHINING OF MATERIALS USED IN THE AEROSPACE INDUSTRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Alexandra Zubáková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--------------------------------|
| Ústav: | Ústav strojírenské technologie |
| Studentka: | Bc. Alexandra Zubáková |
| 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:

Elektroerozivní obrábění materiálů využívaných v leteckém průmyslu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V podmínkách firmy otestovat a doporučit vhodné parametry pro seřízení elektroerozivního procesu pro daný materiál. Na vyrobené letecké součásti jsou kladeny přísné požadavky. Jeden z problémů je kontaminace povrchové vrstvy mědí.

Cíle diplomové práce:

- Přehled materiálů využívaných v leteckém průmyslu
- Rozbor technologie elektroerozivního obrábění
- Příprava vzorků materiálů pro experiment
- Příprava stroje pro experiment
- Seřízení stroje a měření dat v konkrétním procesu
- Vyhodnocení získaných dat
- Posouzení výsledků z hlediska využití pro zákazníka

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: Vienala, 2000. 276 s. ISBN 80-7099-430-4.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

ZUBÁKOVÁ Alexandra: Elektroerozivní obrábění materiálů využívaných v leteckém průmyslu

Tato diplomová práce se zabývá problematikou elektroerozivního obrábění materiálů využívaných v leteckém průmyslu. V úvodní části je uvedeno rozdělení leteckých materiálů a metody, kterými je lze obrábět. Další kapitola popisuje základní principy elektroerozivního obrábění. Experimentální část je zaměřena na elektroerozivní řezání materiálu NIMONIC 263. Největší důraz byl kladen na zjištění vlivu materiálu řezacího drátu na míru kontaminace povrchové vrstvy obrobku. Dále byla posuzována kvalita obrobeného povrchu v závislosti na použitém drátu a zvolených parametrech obrábění.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektroerozivní obrábění, elektroerozivní drátové řezání, WEDM, NIMONIC 263, letecké materiály

ABSTRACT

ZUBÁKOVÁ Alexandra: Electroerosion machining of materials used in the aerospace industry

This diploma thesis deals with the issue of electroerosion machining of materials used in the aerospace industry. The introductory part presents the layout of aerospace materials and the methods by which they can be machined. The next chapter describes the basic principles of EDM. The experimental part is focused on electroerosive cutting of NIMONIC 263 alloy. The greatest emphasis was placed on determining the influence of the cutting wire material on the rate of contamination of the surface layer of the workpiece. The quality of the machined surface was assessed depending on the used wire and the selected machining parameters.

KEYWORDS

electrical discharge machining, wire electrical discharge machining, WEDM, NIMONIC 263, aerospace materials

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZUBÁKOVÁ, Alexandra. *Elektroerozivní obrábění materiálů využívaných v leteckém průmyslu* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124364>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 62 s. 7 příloh. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci na téma *Elektroerozivní obrábění materiálů využívaných v leteckém průmyslu* jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 25. 6. 2020

.....
Alexandra Zubáková

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu Ing. Milanovi Kalivodovi a paní Ing. Kateřině Mouralové Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce.

Moje poděkování patří taktéž panu Tomášovi Sperlichovi a firmě PENTA TRADING, spol. s.r.o. za spolupráci při získávání údajů pro experiment.

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

OBSAH

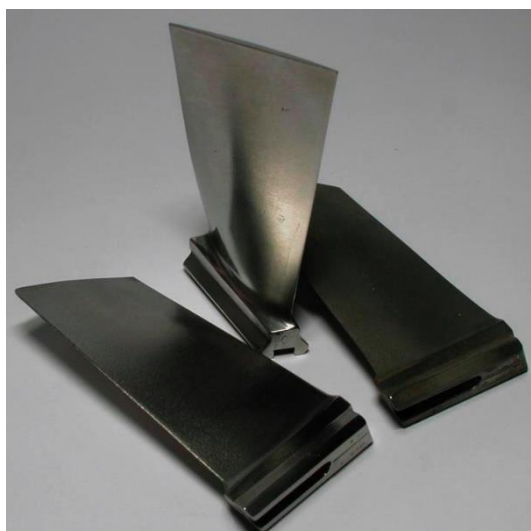
| | |
|--|------|
| Zadání | |
| Abstrakt | |
| Bibliografická citace | |
| Čestné prohlášení | |
| Poděkování | |
| Obsah | Str. |
| ÚVOD..... | 10 |
| 1 ROZBOR ZADÁNÍ..... | 11 |
| 1.1 Letecké materiály..... | 11 |
| 1.2 Obrábění leteckých materiálů..... | 14 |
| 1.2.1 Konvenční metody obrábění..... | 14 |
| 1.2.2 Vysokorychlostní obrábění..... | 15 |
| 1.2.3 Nekonvenční metody obrábění..... | 15 |
| 1.3. Volba obráběcí metody..... | 16 |
| 2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ..... | 17 |
| 2.1 Princip..... | 17 |
| 2.1.1 Fáze výboje..... | 18 |
| 2.1.2 Charakteristika výboje..... | 21 |
| 2.2 Generátory..... | 23 |
| 2.2.1 Závislé generátory..... | 23 |
| 2.2.2 Nezávislé generátory..... | 24 |
| 2.3 Nástrojové elektrody..... | 25 |
| 2.3.1 Hloubicí elektrody..... | 25 |
| 2.3.2 Dráty..... | 28 |
| 2.3.3 Opotřeбенí elektrod..... | 30 |
| 2.4 Dielektrikum..... | 32 |
| 2.4.1 Znečištění dielektrika..... | 33 |
| 2.4.2 Suché elektroerozivní obrábění..... | 34 |
| 2.4.3 Vyplachování dielektrika..... | 34 |
| 2.5 Charakteristika obrobených součástí..... | 36 |
| 2.5.1 Struktura povrchu..... | 37 |
| 2.5.2 Geometrická přesnost..... | 37 |
| 2.6 Metody elektroerozivního obrábění..... | 38 |
| 2.6.1 Elektroerozivní hloubení..... | 38 |
| 2.6.2 Elektroerozivní drátové řezání..... | 39 |
| 2.6.3 Elektroerozivní broušení..... | 41 |

| | |
|---|----|
| 2.6.4 Elektroerozivní vrtání děr..... | 41 |
| 2.6.5 Anodomechanické obrábění | 42 |
| 2.7 Bezpečnost..... | 42 |
| 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST..... | 43 |
| 3.1 Materiál | 43 |
| 3.1.1 Určení chemického složení vzorku | 44 |
| 3.2 Použitý stroj..... | 46 |
| 3.3 Příprava vzorků pro experiment | 47 |
| 3.3.1 Volba technologie | 48 |
| 3.3.2 Volba řezacího drátu | 49 |
| 3.3.3 Příprava stroje | 50 |
| 3.4 Zpracování vzorků | 51 |
| 3.5 Vyhodnocení naměřených dat | 52 |
| 3.5.1 Celkové posouzení jednotlivých technologií..... | 52 |
| 3.5.2 Posouzení vlivu vstupních faktorů na kvalitu povrchu | 55 |
| 3.5.3 Posouzení kontaminace povrchové vrstvy základního materiálu | 59 |
| 4 ZÁVĚRY | 62 |
| Seznam použitých zdrojů | |
| Seznam použitých symbolů a zkratk | |
| Seznam obrázků | |
| Seznam tabulek | |
| Seznam příloh | |

ÚVOD

Letecký průmysl patří mezi jednu z nejprogresivnějších oblastí strojírenství. Komfort, a hlavně rychlost tohoto druhu dopravy nelze s jinými vůbec srovnávat. Všechny letadla, ať už se jedná o dopravní, nákladní, vojenské nebo soukromé stroje, musí splňovat podobné základní požadavky. K nim patří především spolehlivost a životnost, které závisí na kvalitě vyrobených součástí. Dalším důležitým faktorem při návrhu letadel je materiál, ze kterého budou vyrobena. Využití zde najdou takové konstrukční materiály, které se vyznačují vysokou pevností a odolností vůči proměnlivému zatížení. Konstrukce součástí z takovýchto materiálů může být odlehčena, přičemž snesou stejné zatížení jako kdyby byly vyrobeny z běžných typů ocelí. Tímto lze docílit snížení celkové hmotnosti stroje. Některé části letadel jsou rovněž vystaveny extrémním podmínkám jako jsou například vysoké teploty, pro které nejsou běžné materiály použitelné. Na obr. 1 je příklad turbínových lopatek vyrobených ze slitiny na bázi niklu, které jsou schopny snést teplotu až 1 400 °C. Nevýhodou těchto speciálních materiálů je většinou jejich špatná obrobitelnost. Z tohoto důvodu se pro jejich obrábění často používají různé nekonvenční metody, kde se materiál odstraňuje jiným než mechanickým způsobem. Výrobní metoda zároveň nesmí nepříznivě ovlivňovat vlastnosti obráběného materiálu. [1]

Elektroerozivní obrábění patří v současnosti mezi běžně používané technologie. Každá větší strojírenská firma už většinou disponuje vlastním elektroerozivním strojem, na kterém provádí potřebné operace. Tato metoda nachází své uplatnění hlavně v provozech, kde se pracuje s těžko obrobitelnými materiály. Příkladem mohou být podniky vyrábějící lisovací a stříhací nástroje nebo ty, které se pohybují v oblasti kosmického a leteckého průmyslu. Tato technologie je nezastupitelná při výrobě tvarově složitých součástí. Příklady takovýchto součástí jsou uvedeny na obr. 2. Elektroerozivním obráběním lze dosáhnout vysokou kvalitu povrchu i na těžko přístupných místech. Z důvodu, že tato metoda využívá pro odstraňování materiálu účinky elektrické energie, je nutnou podmínkou, aby byl obráběný materiál elektricky vodivý. [2]



Obr. 1 Turbínové lopatky. [3]



Obr. 2 Tvarově složité součásti vyrobené metodou elektroerozivního drátového řezání. [4]

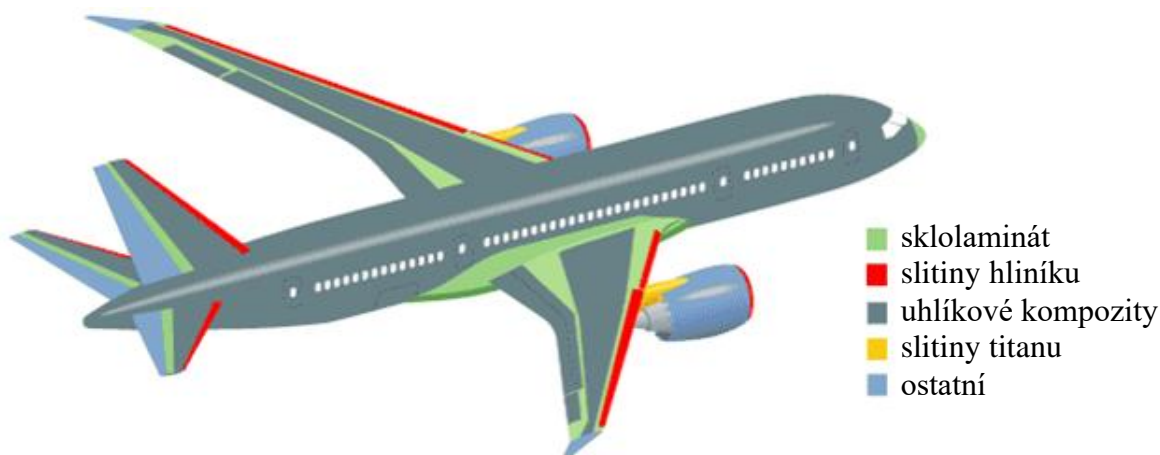
1 ROZBOR ZADÁNÍ

Při výběru materiálu pro konstrukci letecké součásti je nutno komplexně zohlednit její funkci. Kromě statického a dynamického zatížení je nutno počítat se specifickým prostředím, ve kterém se bude komponent nacházet. V letadlech se vyskytují místa, kde dochází k působení velmi vysokých (motor) nebo naopak nízkých teplot (plášť letadla). Dále jsou tyto stroje téměř neustále vystaveny působení vnějšího prostředí v podobě slunečního záření, deště, větru a podobně. Všechny uvedené podmínky je nutno při návrhu konstrukce a materiálu součástí zohlednit. Z celkové hmotnosti zatíženého letadla připadá 40 % na samotný stroj. Dalších 20 % lze zatížit nákladem a zbylých 40 % je určeno pro nesení hmotnosti paliva. Použitím vhodného materiálu nebo úpravou konstrukce lze docílit snížení hmotnosti stroje. Ve výsledku tak letadlo bude schopno přepravit více nákladu nebo snížit spotřebované množství paliva. [1, 5]

Významnou roli hraje i cena zvoleného materiálu a náročnost jeho zpracování. Na vyrobené součásti jsou v oblasti leteckého průmyslu kladeny vysoké požadavky z hlediska kvality. Je důležité vyvarovat se defektů již na polotovarech. Volba vhodné obráběcí metody závisí především od požadované kvality povrchu a rozměrové přesnosti součásti. Dalším důležitým parametrem je obrobitelnost materiálu, která může rozsah použitelných obráběcích metod značně zredukovat. Letadla musí v pravidelných intervalech procházet bezpečnostními kontrolami, kde se kontroluje stav určitých součástí. Je to z důvodu minimalizace možnosti vzniku poruchy, která má za provozu letadla většinou fatální následky. [5]

1.1 Letecké materiály

Letecké materiály lze rozdělit na dvě základní skupiny z hlediska jejich určení. První skupina zahrnuje materiály pro výrobu konstrukce letadla. Ta se skládá z trupu nesoucího zatížení, křídel, které jsou nejvíce namáhanou částí stroje, řídicích prvků a podvozku, který je vystaven vysokému statickému zatížení a cyklickému namáhání. Plášť letadla musí mít dobrou odolnost proti korozi z důvodu jeho vystavení povětrnostním vlivům okolního prostředí. Jeho materiál musí být schopen odolat vysoké škále teplot od minusových, které na letadlo působí ve velkých výškách až po 300 °C, které může dosahovat povrchová teplota letadla při vysokých rychlostech. Opět záleží na typu a způsobu využívání letadla, provozní teplota pláště běžně používaných strojů se pohybuje kolem 100 °C. Pro výrobu těchto částí letadla se používají nejčastěji slitiny hliníku, titanu, ocel a kompozity. Poměr zastoupení jednotlivých materiálů závisí na zaměření letadla. Malé civilní letouny se skládají většinou ze slitin hliníku, zatímco u velkých a vojenských letadel výrazně roste zastoupení kompozitů. Obr. 1.1 zobrazuje letadlo Boeing 787 Dreamliner, kterého celková hmotnost je z poloviny tvořena kompozity. [1, 6]



Obr. 1.1 Materiály, ze kterých je vyrobeno letadlo Boeing 787 Dreamliner. [6]

Do druhé skupiny se zařazují materiály, ze kterých se vyrábí komponenty leteckých motorů. Tyto materiály musí splňovat vyšší nároky, protože jsou často vystaveny vysokým teplotám a dynamickému zatížení. Kvůli vyšším požadavkům, které jsou na ně kladeny, je výběr použitelných materiálů omezený. Pro výrobu nejvíc tepelně namáhaných součástí se používají slitiny niklu a keramické materiály. Jedná se například o turbínové nebo kompresorové lopatky. Do teploty 240 °C lze také použít titanové slitiny nebo určité typy oceli. Porovnání základních vlastností nejpoužívanějších materiálů v rámci leteckého průmyslu je uvedeno v tab. 1.1. Orientační zastoupení materiálů v motorech současných letadel je následovné: [1]

- 10 % slitiny hliníku,
- 20 % oceli,
- 25 % slitiny titanu,
- 45 % slitiny niklu.

Tab. 1.1 Vlastnosti vybraných leteckých materiálů. [7, 8, 9]

| Materiál | Hustota | Teplota tání | Pevnost v tahu | Tepelná vodivost | Koeficient teplotní délkové roztažnosti |
|-----------------|-----------------------|--------------|----------------|---------------------------------------|---|
| | [g.cm ⁻³] | [°C] | [MPa] | [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | [.10 ⁻⁶ .K ⁻¹] |
| slitiny hliníku | 2,7 | 660 | 165–570 | 247 | 24 |
| slitiny titanu | 4,5 | 1668 | 460–1340 | 21,9 | 9 |
| slitiny hořčíku | 1,8 | 650 | 160–250 | 156 | 26 |
| slitiny niklu | 8,9 | 1455 | 500–1400 | 90,9 | 13 |

- **Slitiny hliníku** – jedná se o druhý nejrozšířenější kovový prvek na světě. Více než 60 % celosvětové produkce hliníku slouží pro výrobu součástí v oblasti dopravy (letecké, lodní a automobilové). V leteckém průmyslu se využívá hlavně kvůli jeho vynikajícímu poměru mechanických vlastností k hmotnosti. Hliníkové slitiny si zachovávají dobré mechanické vlastnosti i při nízkých teplotách. Vyznačuje se rovněž výbornou korozní odolností. Teplota tavení hliníku je nízká (660 °C), co omezuje jeho použití z hlediska maximální provozní teploty. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších materiálů v oblasti leteckého průmyslu. Z hliníku se vyrábí například trup, řídicí prvky, plášť nebo křídla letadel. Slitiny hliníku se používají jak pro lití, tak pro tvářeni. Mezi nejpoužívanější lze zařadit: [1, 7]
 - Al-Cu-Mg – duraly,
 - Al-Zn-Mg-Cu – slitiny vyznačující se vysokými mechanickými vlastnostmi,
 - Al-Mg-Si – slitiny s vysokou korozní odolností,
 - Al-Li – slitiny vyznačující se nízkou hmotností,
 - Al-Si.
- **Slitiny titanu** – součásti z titanových slitin se vyznačují vysokou pevností při jejich nízké měrné hmotnosti, co je předurčuje k použití v leteckém, kosmickém a vojenském průmyslu. Slitiny titanu mají dobrou odolnost proti korozi a vysokým teplotám. Maximální provozní teplota součástí je 600 °C, při vyšších teplotách nastává oxidace a creep. Mezi nevýhody lze zařadit hlavně jejich špatnou obrobiteľnosť a vysokou cenu. Titanové slitiny se rozděľujú dle vlivu přísadových prvků na stabilizaci fáze α (Al, Sn) nebo β (V, Mo, Cr). Ti-6Al-4V je nejběžnější dvoufázová slitina vyznačující se dobrou pevností, tažností a creepovými vlastnostmi. V leteckém průmyslu se ze slitin titanu vyrábí například lopatky kompresorů, plášť letadel, ochranné štíty kosmických objektů, protipožární přepážky, komponenty motoru a podvozku, nebo různé vysoko namáhané součásti. [1, 7, 10]

- **Slitiny hořčíku** – v porovnání s hliníkem mají hořčíkové slitiny nižší hmotnost, ale zároveň horší mechanické vlastnosti. Používají se většinou pro odlévání součástí metodou tlakového lití. Slitiny určené pro odlévání mohou pracovat dlouhodobě za teplot až 350 °C, zatímco tvářené jen do 250 °C. Pro legování se používá nejčastěji hliník, lithium, zinek, zirkon nebo kovy vzácných zemin. Výhodou je možnost odlévání velice tenkých odlitků a dobrá obrobitelnost těchto slitin. K nevýhodám patří horší korozní odolnost, a hlavně jejich vysoká cena. Hořčíkové slitiny lze také použít jako matrici pro kompozitní materiály. Uhlíkové kompozity s hořčíkovou matricí mohou dosahovat pevnosti až 3 200 MPa. Nejpoužívanější hořčíkové slitiny jsou: [1, 7]
 - Mg-Al-Zn,
 - Mg-Zn-Zr,
 - Mg-RE-Zn-Zr, (RE = Rare Earth – kovy vzácných zemin).
- **Slitiny niklu** – tyto materiály se označují také pojmem superslitiny. Vyznačují se dobrými mechanickými vlastnostmi, odolností proti oxidaci a creepu. Tyto vlastnosti si zachovávají i za vysokých teplot. Z tohoto důvodu jsou to ideální materiály pro výrobu tepelně namáhaných součástí do motorů letadel, jako jsou například turbínové a kompresorové lopatky, spalovací komory a podobně. Niklové slitiny se v praxi označují svými obchodními názvy. Několik příkladů včetně jejich chemického složení je uvedeno v tab. 1.2. [1, 2]

Tab. 1.2 Chemické složení vybraných niklových slitin. [1]

| Označení | Obsah prvku [%] | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------------|------|------|-----|----|------|------|-----|-----|----|-----|-----|------|
| | Ni | C | Cr | Mo | Fe | Co | Cu | Al | Ti | Nb | Mn | Si | Zr |
| Monel 400 | 66,5 | 0,2 | – | 1,2 | – | – | 31,5 | – | – | – | 1 | 0,2 | – |
| Hasteloy X | 47 | 0,1 | 22 | 9 | 18 | 1,5 | – | – | – | – | 1 | 0,6 | – |
| Inconel 718 | 52,5 | 0,04 | 19 | 3 | 18 | – | 0,3 | 0,5 | 0,9 | 5 | 0,2 | 0,3 | – |
| Incoloy 800 | 32,5 | 0,05 | 21 | – | 46 | – | – | 0,4 | 0,4 | – | 0,8 | 0,5 | – |
| Nimonic 90 | 59 | 0,07 | 19,5 | – | – | 16,5 | – | 1,5 | 3 | – | 0,3 | 0,3 | 0,06 |

- **Kompozity a ostatní materiály** – kompozitní materiály se skládají ze dvou nebo více samostatných fází, které se od sebe liší fyzikálními vlastnostmi a jsou rozlišitelné na makroskopické úrovni. Základní materiál, který se nazývá matrice, slouží jako pojivo pro vyztužující materiál. Jedná se nejčastěji o kov, keramiku nebo polymer. V ní se nachází zpevňující fáze ve formě vláken nebo částic. Tento vyztužující materiál se vyznačuje lepšími mechanickými vlastnostmi. Částicové kompozity mají v matrici náhodně rozmístěné částice, kterými mohou být například kuličky, tyčinky nebo zrna. Z materiálového hlediska jsou to většinou kovy, karbidy, nitridy nebo boridy. Více rozšířené jsou vláknové kompozity. Nejčastěji se používají vlákna skelné, minerální, keramické (uhlíkové) a kovové (korozivzdorné oceli, W, Mo, slitiny Ni). Lze také použít vlákna polymerní, a to jak přírodní (len, bavlna), tak i syntetické (celulóza, polyetylen). Cílem je, aby kombinace těchto dvou fází měla ve výsledku lepší vlastnosti než fáze samotné. Úkolem matrice je přenášet zatížení a chránit zpevňující fázi proti nežádoucím vlivům prostředí. Oproti vláknům by se měla vyznačovat lepší tažností, nižší teplotou tání a nesmí s nimi reagovat. Tepelná roztažnost matrice a vláken by se neměla výrazně lišit. Rozšíření kompozitů v leteckém průmyslu neustále roste a postupně se nimi nahrazují hlavně hliníkové slitiny. [1, 2]

Součásti vyráběné z ocelí se v oblasti leteckého průmyslu využívají, ale jejich množství postupně klesá. Využívají se pro výrobu komponentů, kde by bylo použití jiných speciálních materiálů nevhodné nebo neekonomické. Většinou jde o vysokopevnostní nebo žárupevné oceli. Největší nevýhodou ocelových součástí je jejich vysoká hmotnost, kvůli čemu je postupně nahrazují materiály ze speciálních slitin a kompozity. [1]

Plasty se vyznačují dobrou odolností vůči vnějšímu prostředí, mají dobrý poměr pevnosti a hmotnosti. Určité typy lze použít až do teplot 300 °C. Používají se samostatně nebo také jako součást kompozitů. Většinou jsou z nich vyrobeny lehce namáhané součástky v interiéru nebo součásti oken. Polyuretanové pěnové hmoty lze použít jako výplň v sandwichových konstrukcích, kde plní tlumící a izolační funkci. [1]

1.2 Obrábění leteckých materiálů

Obrobitelnost materiálu lze charakterizovat jako jeho schopnost být zpracován některou z metod obrábění. Tato vlastnost závisí především na jeho chemickém složení, mikrostrukturu a tepelném zpracování. Dále se musí brát v úvahu zvolená metoda obrábění, materiál a tvar použitého nástroje, řezné podmínky a pracovní prostředí. [2]

Většina speciálních slitin využívaných v leteckém průmyslu se kvůli jejich vysokým hodnotám mechanických vlastností zařazuje mezi těžko obrobitelné materiály. Tyto slitiny jsou většinou velmi drahé, a proto se z nich vyrábí jenom součásti, na které jsou kladeny vysoké požadavky. Z tohoto důvodu by mělo obrábění probíhat na strojích s vysokou tuhostí, které umožňují dosažení vysoké rozměrové přesnosti a kvality povrchu. Špatná obrobitelnost rovněž klade vyšší nároky na volbu nástroje a podmínek obráběcího procesu. [2]

1.2.1 Konvenční metody obrábění

Slitiny hliníku jsou poměrně dobře obrobitelné běžnými metodami. Ze všech leteckých materiálů mají nejvyšší tepelnou vodivost (tab. 1.1), v důsledku čeho je většina tepla z místa řezu odváděna prostřednictvím třísek. Obrábí se vysokými řeznými rychlostmi, za použití nástrojů z karbidů nebo nástrojových ocelí. Tyto slitiny se zároveň vyznačují vysokým koeficientem teplotní roztažnosti, kvůli čemu je nutno v průběhu obrábění dbát na chlazení, aby nedocházelo k rozměrovým změnám v důsledku zahřívání obrobku. [11]

Důvodem vzniku problémů při obrábění titanových a niklových slitin jsou jejich mechanické vlastnosti, které si zachovávají i za vysokých teplot. Dalším faktorem, který způsobuje špatnou obrobitelnost těchto materiálů je jejich tepelná vodivost (tab. 1.1), která je v porovnání s hliníkem mnohem nižší. Teplo vznikající v místě řezu není efektivně odváděno prostřednictvím třísek, v důsledku čeho v tomto místě stoupají teploty. Nástroj je výrazně tepelně a mechanicky namáhán, což má za následek snížení jeho trvanlivosti. Teplota nástroje může v takovýchto případech dosahovat až 1 000 °C. Jeho trvanlivost lze zvýšit volbou vhodné metody chlazení. Velmi dobré výsledky byly pozorovány při použití netradičních metod, jako je například kryogenní chlazení nebo přívod procesní kapaliny přímo do místa řezu. [10, 11]

Speciální slitiny mohou v průběhu obrábění vykazovat zpevnění povrchové vrstvy. Pro obrábění se používají nízké řezné rychlosti, vysoké posuvy a nízké hodnoty šířky záběru ostří, která však musí být větší, než je tloušťka zpevněné vrstvy z předchozího řezu. Titan je velice reaktivní kov a v průběhu jeho obrábění může nastat vzplanutí třísek. Nad teplotou 500 °C může reagovat s materiálem řezného nástroje, což je způsobeno jeho vysokou chemickou afinitou k nástrojovým materiálům. Pro obrábění titanových slitin se volí nejčastěji nástroje z nepovlakovaných karbidů, slinuté karbidy s PVD povlaky nebo polykrystalický diamant. Nástroje z řezné keramiky a s povlaky, které obsahují titan se nedoporučují. [2, 11]

1.2.2 Vysokorychlostní obrábění

Jedná se o metodu obrábění s využitím vysokých rezných rychlostí. Označuje se taky zkratkou HSM – High Speed Machining. Nástroj se rovněž pohybuje velkými posuvovými rychlostmi a velikost šířky záběru ostří je oproti běžnému obrábění menší. Nutnou podmínkou je použití stroje, který je uzpůsoben na tento typ obrábění. Vyžaduje se především vysoká tuhost, aby nevznikaly vibrace zhoršující přesnost výroby. Nároky na bezpečnost jsou obecně vyšší, stroj musí být adekvátně zakrytován. Uvolnění nástroje nebo obrobku v průběhu obrábění může mít fatální následky. Tato metoda je vhodná například pro obrábění hliníku. Lze ní vytvořit velmi tenké stěny, které by se při konvenčním obrábění zhortily. Hlavní výhodou této metody je možnost snížení počtu operací a s tím souvisejících upnutí, co vede ke zvýšení produktivity a přesnosti výroby. S tím je samozřejmě spojeno taky snížení nákladů. [10, 11, 12]

1.2.3 Nekonvenční metody obrábění

Mezi nekonvenční technologie obrábění se zařazují metody, u kterých se pro odstraňování materiálu nevyužívá mechanická práce jako u běžného třískového obrábění. Místo toho se využívá účinků fyzikálních jevů (tepelné, chemické, elektrické). V průběhu obrábění většinou nedochází ke styku obráběného materiálu a nástroje, nevzniká tříska a na obrobek nepůsobí rezné síly. Zda je materiál obrobitelný danou metodou, závisí od jeho fyzikálních vlastností, ze kterých jsou nejvýznamnější tepelná a elektrická vodivost, chemické složení a teplota tání. Pro tyto metody je charakteristická možnost obrábění velmi tvrdých a pevných materiálů mnohem měkčími nástroji. U některých metod dochází v průběhu obrábění k ovlivnění povrchové vrstvy obrobku. Ve výsledku se může jednat o zlepšení povrchových vlastností, nebo naopak o vznik mikrotrhlin, nežádoucího tepelného ovlivnění nebo jiných defektů. Tyto metody se volí rovněž v případech, kdy nelze konvenční metody použít například z důvodu komplikovaného tvaru součásti, který má být vyroben. Nekonvenční metody jsou finančně nákladným, často však jediným možným řešením, kterým lze zabezpečit požadovaný tvar, vlastnosti a kvalitu vyrobené součásti. [13, 14]

Nekonvenční metody lze rozdělit podle druhu energie, která je využívána pro odstraňování materiálu obrobku následovně: [2]

- obrábění založené na působení tepla,
 - elektroerozivní obrábění,
 - plazmový paprsek,
 - laserový paprsek,
 - elektronový paprsek,
- obrábění založené na působení chemického nebo elektrochemického účinku,
 - chemické obrábění,
 - elektrochemické obrábění,
- obrábění založené na mechanickém oddělování materiálu,
 - vodní paprsek,
 - ultrazvukové obrábění.

U niklových slitin bylo pozorováno zlepšení jejich obrobitelnosti při ohřevu obrobku pomocí laserového paprsku, který je soustředěn do místa těsně před nástrojem. Důsledkem lokálního ohřevu je snížení pevnosti a tvrdosti obráběného materiálu. Nastává pokles sil působících na nástroj, co vede ke zvýšení jeho trvanlivosti. Jedná se o takzvané hybridní obrábění, které v sobě kombinuje konvenční a nekonvenční obráběcí metody. Porovnání vybraných nekonvenčních metod obrábění z hlediska dosahované kvality je uvedeno v tab. 1.3. [15]

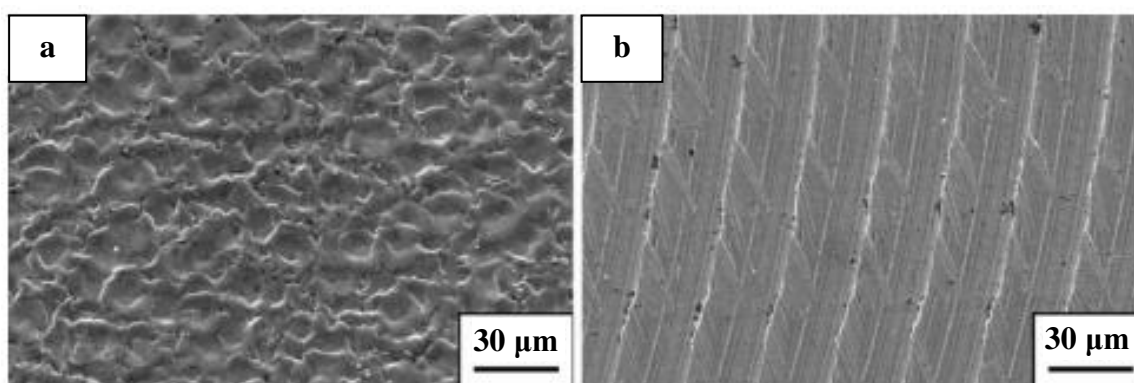
Tab. 1.3 Porovnání vybraných nekonvenčních metod obrábění. [13]

| Metoda | Ra | Stupeň přesnosti IT | Hloubka ovlivněné vrstvy | Úběr materiálu |
|--------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|---|
| | [μm] | [–] | [μm] | [$\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$] |
| elektroerozivní obrábění | 50 až 0,2 | 6 až 12 | 10 až 300 | 10^{-4} až 0,6 |
| plazmový paprsek | – | – | 500 až 800 | 100 |
| laserový paprsek | 50 až 6,3 | – | 100 | 10^{-4} |
| elektronový paprsek | 50 až 6,3 | – | beze změn | 10^{-2} až 0,4 |
| elektrochemické obrábění | 2,5 až 1,6 | 9 až 12 | beze změn | 0,05 až 0,5 |
| ultrazvukové obrábění | 6,3 až 0,4 | 7 až 9 | beze změn | 10^{-2} až 10 |

1.3. Volba obráběcí metody

Experimentální část této diplomové práce se zabývá obráběním niklové slitiny NIMONIC 263. Jedná se o těžkoobrobitelný materiál vyznačující se vysokou pevností a teplotou tání. Využívá se například pro výrobu tepelně namáhaných součástí v oblasti leteckého průmyslu. Obrábění této slitiny má být provedeno s cílem dosažení zadané kvality povrchu.

Z výše zmíněných důvodů byla pro experimentální část zvolena metoda elektroerozivního obrábění, kterou lze efektivně obrábět těžkoobrobitelné materiály. Tato metoda umožňuje dosažení vysoké kvality obrobeného povrchu bez nutnosti použití dalších dokončovacích metod. Nevyskytují se na něm pravidelné rýhy po obráběcích nástroji jako například u frézování. Porovnání povrchu dosaženého elektroerozivním obráběním a frézováním je uvedeno na obr. 1.2. Dalším důvodem pro volbu této metody je možnost jejího uplatnění při výrobě součástí komplikovaného tvaru nebo při hloubení hlubokých děr.



a – elektroerozivní obrábění, b – frézování

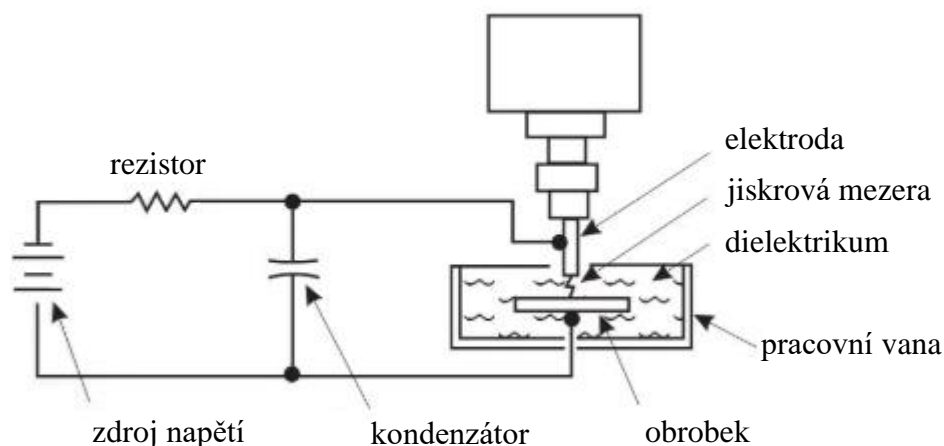
Obr. 1.2 Povrch součásti vytvořený elektroerozivním obráběním a frézováním. [16]

2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

V současné době patří elektroerozivní obrábění mezi běžně používané způsoby nekonvenčního obrábění. Tato technologie se zařazuje mezi metody, které odebírají materiál s využitím elektrotepelných principů. Jde o fyzikální proces, při kterém dochází k řízenému odtavování materiálu obrobku. Často se lze setkat i se zkratkou EDM, která pochází z anglického názvu metody – Electrical Discharge Machining. [14, 17]

Účinky elektrické eroze na kovové materiály byly známy ještě před začátkem jejího cíleného využívání. V době, kdy se Sovětský svaz zapojil do druhé světové války se wolfram používal jako materiál pro elektrické kontakty v motorech vozidel. Na těchto kontaktech se objevovalo erozivní opotřebení, které mělo za důsledek vysokou poruchovost vozidel. Problém nevyřešila ani úprava zařízení nebo výměna kontaktů. Vláda proto pověřila manžely Borise R. a Natalyu I. Lazarenkovi aby našli způsob, jak prodloužit životnost wolframových kontaktů. [18]

Jejich experiment spočíval v tom, že zkusili kontakty ponořit do oleje. Pozorovali, že jiskření mezi kontakty nezmizelo, avšak stalo se mnohem stálejším a předvídatelnějším. I když se jim nakonec nepodařilo životnost kontaktů prodloužit, rozhodli se tento jev dále zkoumat s vidinou možnosti řízeného odtavování kovu použitím jisker. Výsledkem jejich experimentů byla skutečnost, že všechny elektricky vodivé materiály podléhají elektroerozi. Tento jev nastává v kapalném i plynném prostředí. Dále zjistili, že stacionární výboj vznikající mezi elektrodami lze vhodnými parametry obvodu upravit na nestacionární opakované výboje, kterými lze docílit mnohem přesnější odstraňování materiálu. V roce 1943 vyvinuli obráběcí stroj, který se tehdy stal standardem používaným po celém světě. Na obr. 2.1 je zobrazeno jednoduché schéma takového zařízení. [17, 18]



Obr. 2.1 Lazarenkovo zapojení. [18]

2.1 Princip

Aby bylo možné materiál obrábět použitím elektroeroze, musí být elektricky vodivý. Úběr materiálu se realizuje uměle vytvořeným výbojem mezi dvěma elektrodami. Obě elektrody jsou ponořeny do dielektrika, kterým je nejčastěji kapalina s vysokým elektrickým odporem. Jsou napojeny na zdroj napětí a při jejich přiblížení mezi nimi vzniká elektrický výboj. Velikost napětí přivedeného na elektrody závisí na jejich vzdálenosti, vodivosti dielektrika a jeho znečištění. V místě výboje se vytvoří plazma o teplotě 3 000–12 000 °C. Materiál elektrod se vlivem vysoké teploty taví a na jejich povrchu vznikají krátery, které vytvářejí charakteristický povrch vzniklý po elektroerozivním obrábění. [2, 14, 17]

Zapojení elektrod může být realizováno dvěma způsoby. První možností je zapojení nástroje jako katody (záporný pól) a obrobku jako anody (kladný pól). Toto zapojení se využívá, pokud jsou impulsy tvořené generátorem krátké. Důvodem je převládající elektronová vodivost, která se projevuje na počátku výboje. Výsledkem bude uvolňování většího množství materiálu v oblasti anody, tedy na obrobku. Druhou možností je opačné zapojení, kdy se nástroj zapojí jako anoda (kladný pól) a obrobek je katodou (záporný pól). Používá se při dlouhých impulsích s převládající iontovou vodivostí, v důsledku které se více materiálu uvolňuje na katodě. [19]

Snahou je docílit, aby nastával výrazný úběr materiálu na obrobku při současné nízké ztrátě materiálu nástrojové elektrody. Úbytek těchto dvou materiálů lze popsat vztahem 2.1. [19]

$$\gamma = \frac{V_n}{V_o} \cdot 100 [\%] \quad (2.1)$$

kde: γ [%] – relativní objemový úbytek
 V_n [mm³.min⁻¹] – objemový úbytek nástroje
 V_o [mm³.min⁻¹] – objemový úbytek obrobku

Pro dosažení ideálních výsledků je nutno vhodně zvolit podmínky obrábění, mezi které patří především: [17]

- volba vhodného materiálu nástrojové elektrody pro daný obráběný materiál,
- použití vhodného dielektrika,
- celkové nastavení technologie.

2.1.1 Fáze výboje

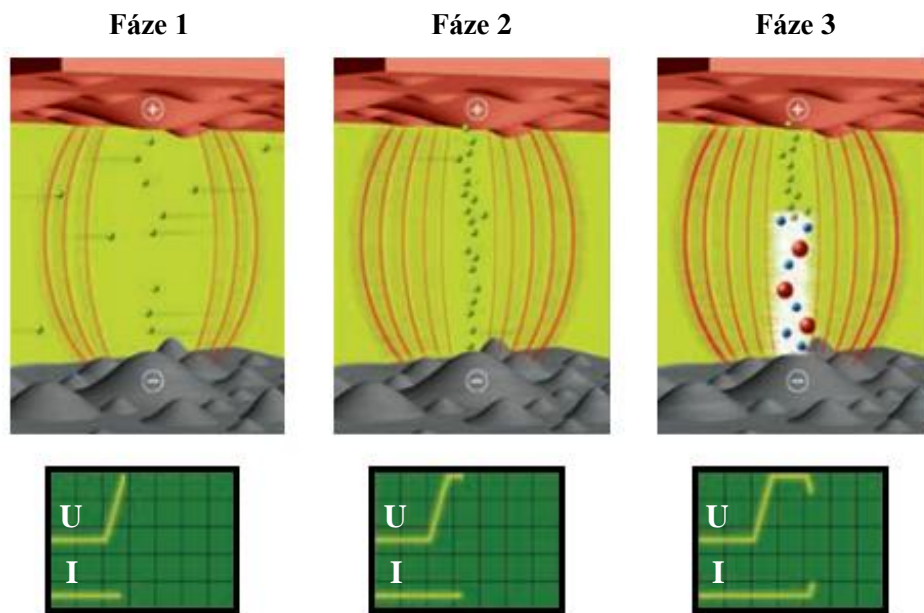
Výboj vznikající mezi elektrodami lze rozdělit na několik navazujících fází. Jednotlivé fáze jsou včetně průběhu napětí a proudu graficky znázorněny na obr. 2.2, obr. 2.3 a obr. 2.4: [17]

Fáze 1: Nástrojová elektroda (na obrázcích označená znaménkem +) a obrobek jsou ponořeny v dielektriku ve vzdálenosti umožňující vznik výboje. Po přivedení napětí na elektrody se mezi nimi vytvoří elektrické pole. V místech, kde je vzdálenost elektrod nejmenší se nachází místo s maximálním gradientem, do kterého jsou vtahovány elektricky vodivé částice z okolí. Hodnota napětí se zvyšuje.

Fáze 2: Množství elektricky nabitých částic v prostoru mezi elektrodami se zvyšuje. Ty pak začnou vytvářet můstky potřebné ke vzniku elektrického výboje. Napětí stoupá až na maximální hodnotu.

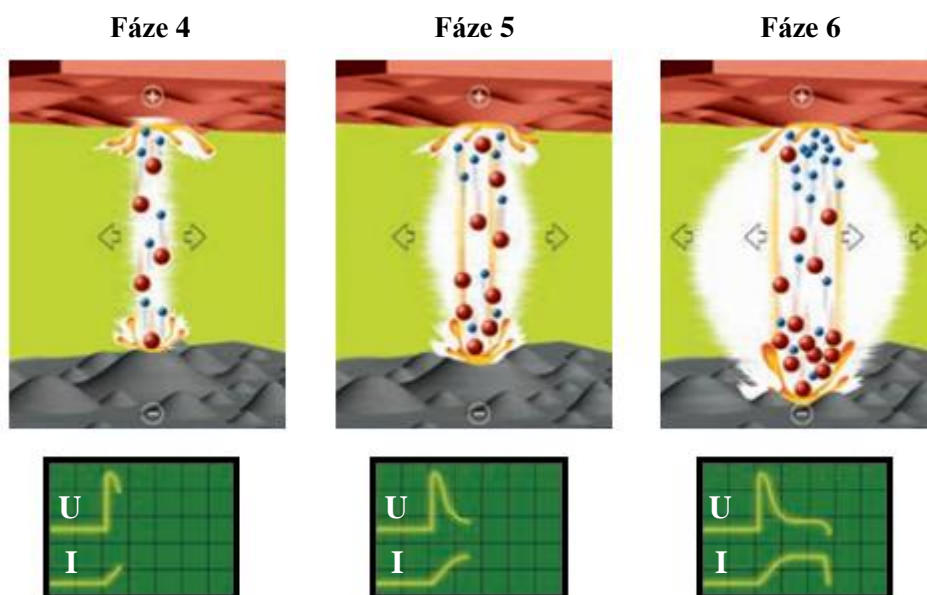
Fáze 3: Nastává ionizace prostředí. Ze záporně nabitých elektrod se vlivem působení elektrického pole uvolňují elektrony, které se v prostoru sráží s neutrálními částicemi. Tyto částice se po nárazu třísťí a v daném místě vznikají kladné a záporné ionty. Napětí je v této fázi na maximální hodnotě.

Fáze 4: Ionty vyplní prostor mezi elektrodami, kterým pak začne protékat elektrický proud. Mezi elektrodami se vytvoří vodivý plazmový kanál, vlivem kterého se začne zvyšovat povrchová teplota elektrod. Napětí v této fázi klesá, hodnota proudu se naopak zvyšuje.



Obr. 2.2 Fáze výboje 1, 2 a 3. [20]

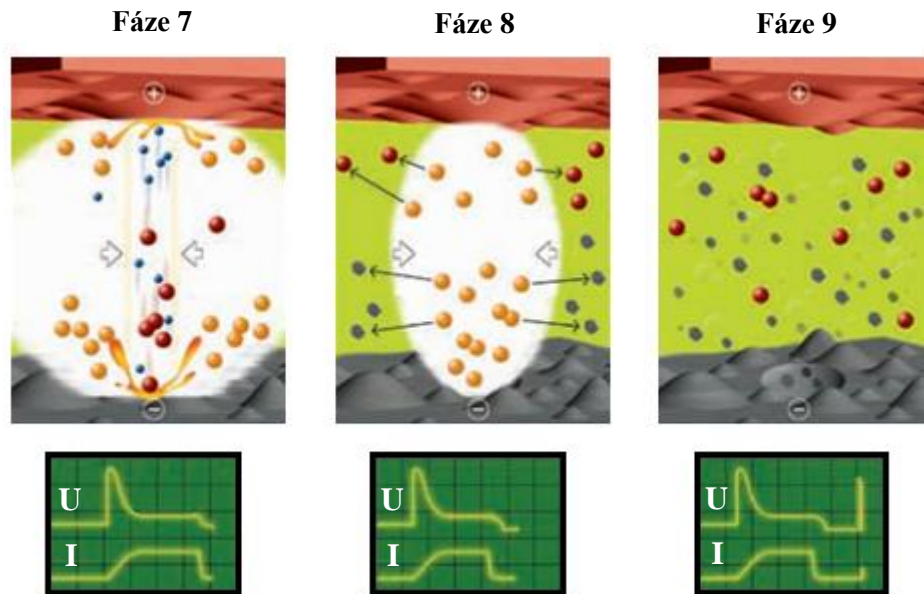
- Fáze 5:** Zvýšení teploty prostředí způsobí, že se dielektrikum začne vypařovat, a v místě mezi elektrodami vznikne plynová bublina. Elektronů a iontů naráží na povrch elektrod, čím se ještě více zvyšuje jejich povrchová teplota. Nastává tavení a odpařování materiálu obrobku i nástroje. Napětí klesá na zápalnou hodnotu výboje, na které se ustaluje. Proud v této fázi dosahuje svou maximální hodnotu.
- Fáze 6:** Plynová bublina v oblasti mezi elektrodami se nadále zvětšuje. Materiál obrobku a nástroje se intenzivně taví a vypařuje.
- Fáze 7:** V další fázi hodnota proudu klesá, čím se zároveň sníží teplota v prostoru mezi elektrodami. Plynová bublina začne implodovat a tlak plynů spolu se silami elektrického pole oddělují taveninu z elektrod. Tímto procesem vzniká kráter.



Obr. 2.3 Fáze výboje 4, 5 a 6. [20]

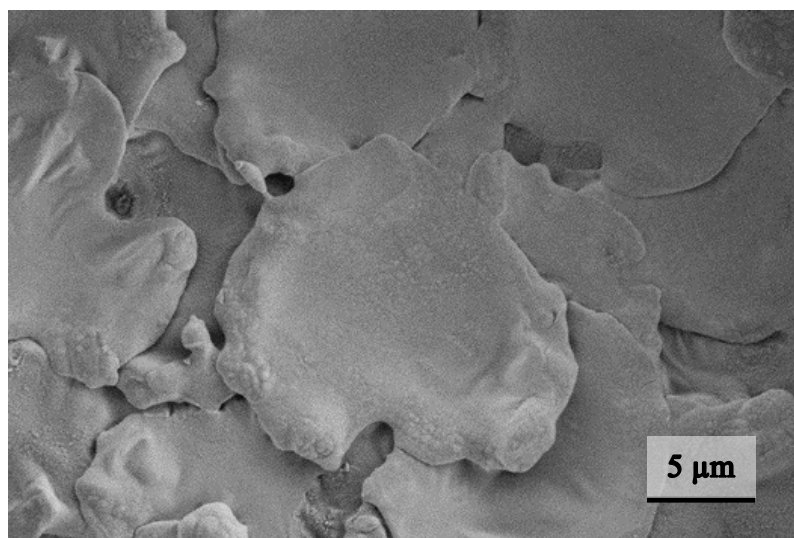
Fáze 8: Napětí a proud klesají na nulovou hodnotu. To způsobí zánik výboje i plynové bubliny. Do mezielektrodového prostoru následně vnikne dielektrikum, které ochlazuje taveninu i povrch elektrod. Materiál vytržený z místa kráteru v dielektriku ztuhne a zůstává v něm ve formě malých kuliček.

Fáze 9: Prostor mezi elektrodami se dostává do původního stavu, ve kterém se nacházel před fází číslo 1. V dielektriku se nacházejí částice odtaveného materiálu a zplodiny vzniklé při provedeném výboji. Proces se následně znovu opakuje od fáze č. 1.



Obr. 2.4 Fáze výboje 7, 8 a 9. [20]

Tvar a velikost výsledného kráteru vzniklého po elektrickém výboji závisí na použitých pracovních podmínkách. Jeho průměr a hloubka jsou závislé na délce trvání výboje a velikosti přivedené energie. Na množství odebraného materiálu má vliv vybíjecí energie. Rozměry a tvar vytvořených kráterů charakterizují výsledný povrch součásti z hlediska kvality povrchu a přesnosti rozměrů. Obr. 2.5 zobrazuje kráter, který vznikl elektroerozivním obráběním. [17]



Obr. 2.5 Kráter, který byl vytvořen elektroerozivním obráběním. [21]

2.1.2 Charakteristika výboje

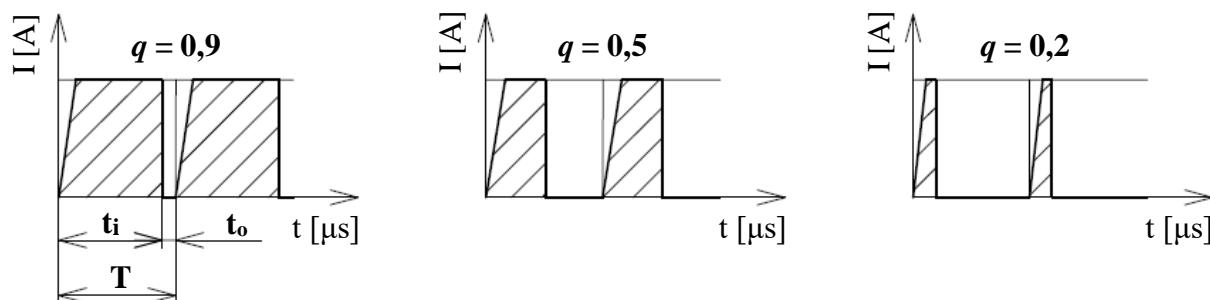
Výboj, který vznikne za stejných parametrů nastavení může na různé materiály působit odlišně. Stejně tak se budou od sebe lišit výboje určené pro hrubování a dokončování. Proto je důležité pro každou aplikaci elektroerozivního obrábění nastavit vhodné podmínky. Jedná se především o dobu trvání impulsů a jejich frekvenci. Další parametry se odvíjí od druhu použitého stroje, například nastavení technologie pro hloubení se bude výrazně lišit od nastavení drátové řezačky. Základní parametry, kterými se popisuje výboj jsou uvedeny v tab. 2.1 a vyznačeny na obr. 2.7.

Tab. 2.1 Charakteristiky popisující výboj. [17]

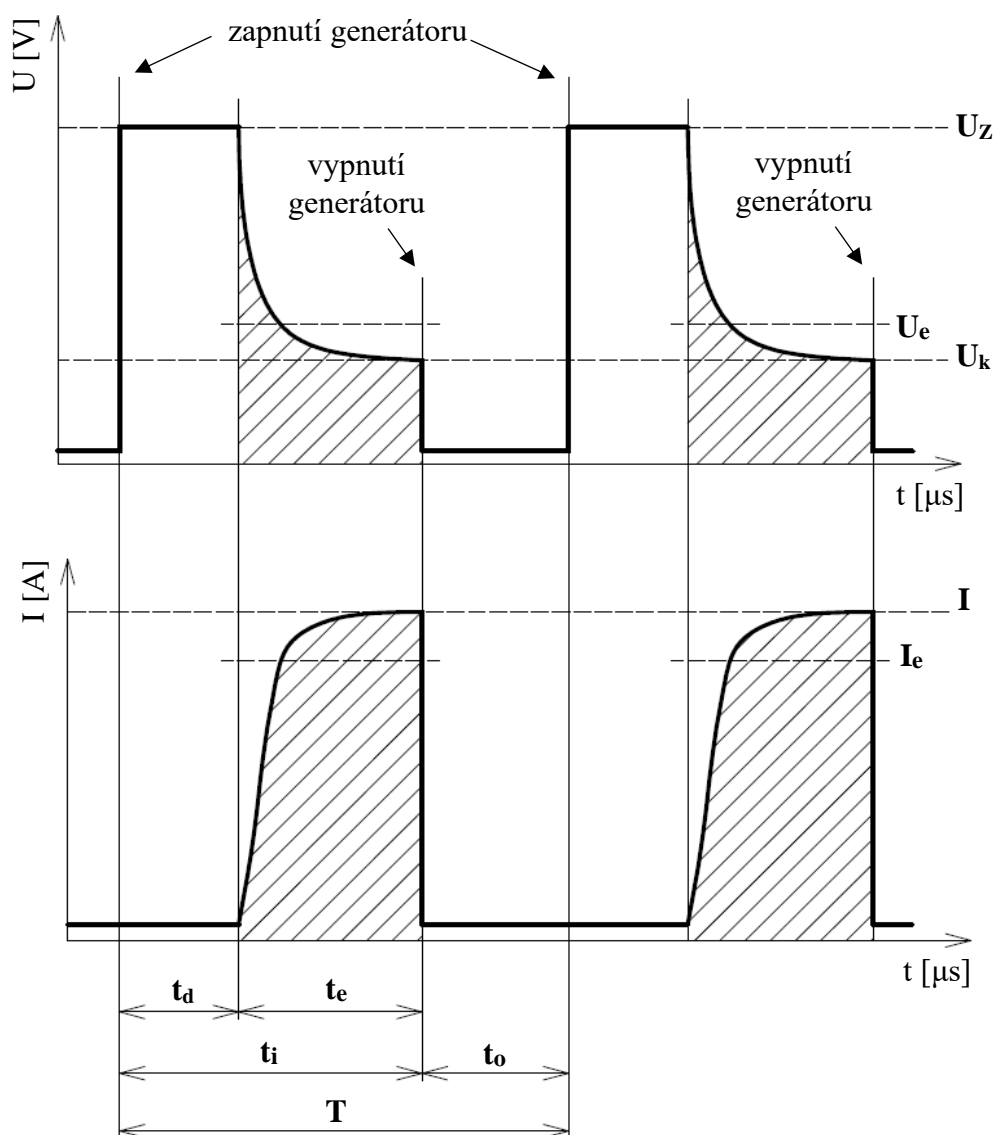
| Charakteristika | Označení | Popis |
|-------------------------|----------|--|
| doba impulsu | t_i | časový úsek mezi zapnutím a vypnutím generátoru |
| doba pauzy | t_o | časový úsek mezi vypnutím a dalším zapnutím generátoru |
| doba zpoždění výboje | t_d | časový úsek mezi zapnutím generátoru a průrazem dielektrika |
| doba výboje | t_e | časový úsek mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru |
| doba periody | T | časový úsek sestávající z doby impulsu a doby pauzy |
| napětí na prázdko | U_Z | napětí při zapnutí generátoru |
| střední vybíjecí napětí | U_e | střední hodnota napětí mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru |
| napětí | U_k | hodnota napětí v okamžiku zhasnutí výboje |
| pracovní proud výboje | I | maximální proud protékající mezi elektrodami v průběhu výboje |
| střední vybíjecí proud | I_e | střední hodnota proudu mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru |

Základní formu výboje lze popsat časovým využitím periody výboje (vztah 2.2). Tato veličina uvádí poměr délky impulsu k délce periody. Takto lze impuls jednoduše popsat pomocí jednoho čísla. Na obr. 2.6 jsou znázorněny příklady různých hodnot parametru q . [17]

$$q = \frac{t_i}{T} = \frac{t_i}{t_i + t_o} \quad [-] \quad (2.2)$$



Obr. 2.6 Znázornění parametru q . [17]



Obr. 2.7 Časový průběh výboje. [17]

Výboje lze z hlediska časového průběhu energie dodávané do místa výboje rozdělit na dvě skupiny: [17]

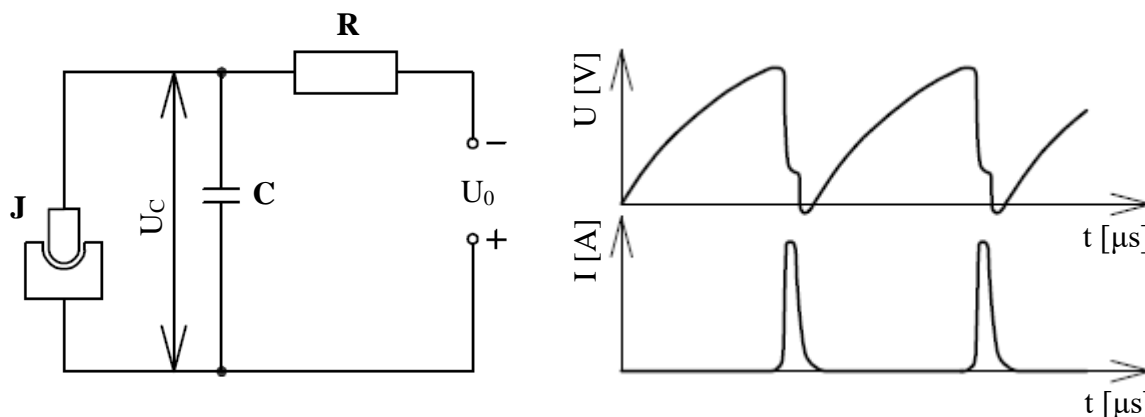
- **Výboje elektrickou jiskrou** – doba trvání impulsu je krátká, frekvence výbojů je vysoká. Hodnota časového využití periody výboje se nachází v rozmezí 0,03–0,2. Kvůli převládající elektronové vodivosti v plazmovém kanále dochází k výraznějšímu opotřebení anody. Teplota ve výbojovém kanále dosahuje hodnoty až 10 000 °C. V procesu dochází k vysoce přesnému úběru malého množství materiálu, proto je tento druh výbojů vhodný hlavně pro dokončování.
- **Výboje nestacionárním krátkodobým elektrickým obloukem** – tento typ výbojů je charakterizován dlouhou dobou trvání impulsu. Časové využití periody výboje dosahuje hodnot 0,2–1 ale frekvence výbojů je nízká. V procesu převládá iontová vodivost, kvůli čemu působí větší tepelný účinek na katodu. To má za následek větší úběr materiálu této elektrody. Teplota v místě výboje dosahuje kolem 3 500 °C. Tento typ výboje způsobuje úběry velkého množství materiálu, je tedy vhodný pro hrubovací operace.

2.2 Generátory

Obrábění může být efektivní pouze v případě, že výboje mají požadovanou formu. Ta závisí na průběhu napětí a proudu generovaných impulsů a na jejich frekvenci. Tyto parametry jsou ovlivněny generátorem, který patří k nejdůležitějším součástem stroje. Jednotlivé druhy generátorů se od sebe odlišují zapojením a konstrukcí. Lze je rozdělit na závislé a nezávislé.

2.2.1 Závislé generátory

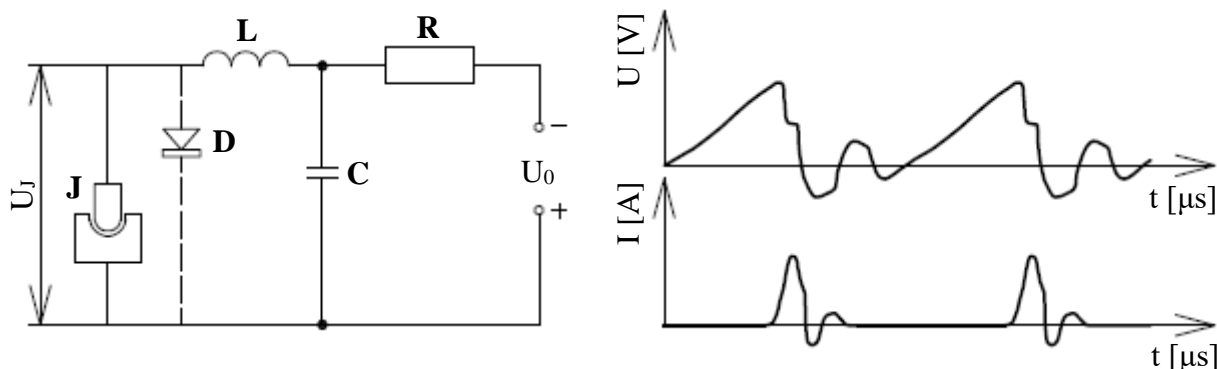
- **RC obvod** – tyto generátory patří mezi nejstarší typy, které se používají od počátku zkoumání elektroerozivního obrábění. Obvod se skládá ze zdroje napětí, elektrod, rezistoru a kondenzátoru, který je v obvodu zapojen paralelně. Principem je opakované nabíjení kondenzátoru přes rezistor ze zdroje stejnosměrného napětí. Po dosažení průrazné hodnoty napětí, nastane průraz dielektrika a kondenzátor se vybije v jiskřišti. Velikost průrazného napětí závisí na vzdálenosti mezi elektrodami a na znečištění dielektrika. Tyto generátory se nazývají závislé kvůli tomu, že změna poměrů v jiskřišti způsobí změnu frekvence a energie výbojů. Výboje jsou krátké, s převládající elektronovou vodivostí. Konstantní velikost pracovní mezery se zabezpečuje servomechanismem, který řídí pozici elektrody na základě vyhodnocování poměrů v jiskřišti. Nástroj se zapojuje jako katoda a obrobek jako anoda. K výhodám těchto generátorů patří jejich jednoduchost a spolehlivost, naopak nevýhodou je nízká produktivita obrábění, omezená možnost regulace frekvence a tvaru výbojů a vysoký objemový úbytek nástroje. Velký úbytek nástrojové elektrody vzniká v důsledku změny elektronové vodivosti na iontovou na konci vybíjení. Tyto generátory jsou vhodné hlavně pro dokončovací operace. Na obr. 2.8 je znázorněn RC obvod s příslušnými časovými průběhy napětí a proudu. [17, 19, 14]



J – jiskřiště, C – kondenzátor, R – rezistor, U_C – napětí na kondenzátoru, U_0 – napětí na zdroji

Obr. 2.8 Schéma RC obvodu s časovým průběhem napětí a proudu. [19]

- **RLC obvod** – zapojením cívky do série s jiskřištěm lze dosáhnout časovou změnu průběhu vybíjecího proudu. Tímto se prodlouží délka trvání výboje a zároveň se sníží intenzita vybíjecího proudu. Do obvodu může být zařazena polovodičová dioda, úlohou které je zabránit průrazu v opačném směru. Výhodou je dosažení menšího opotřebení nástrojové elektrody, zejména při hrubování. Nastavení parametrů pro obrábění je i v tomto případě omezené. Obr. 2.9 zobrazuje RLC obvod a příslušné průběhy napětí a proudu. [17, 19]



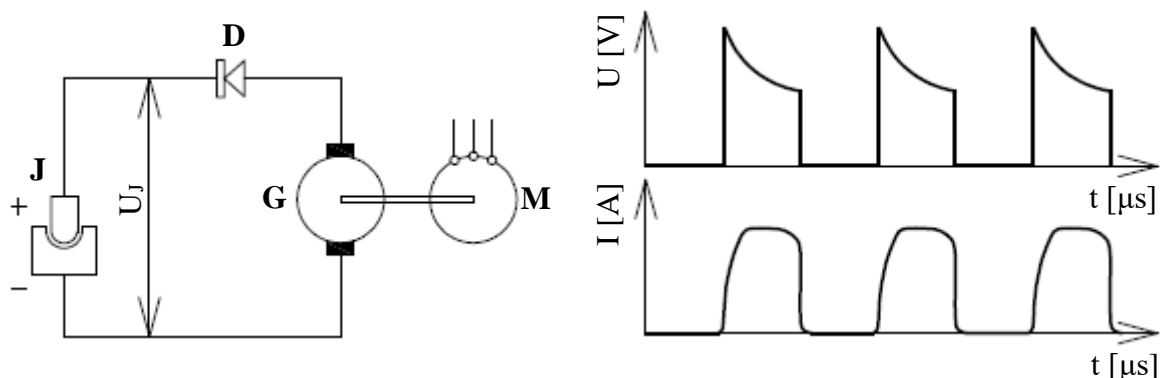
J – jiskřiště, L – cívka, D – polovodičová dioda, C – kondenzátor, R – rezistor, U_J – napětí v jiskřišti, U_0 – napětí na zdroji

Obr. 2.9 Schéma RLC obvodu s časovým průběhem napětí a proudu. [19]

2.2.2 Nezávislé generátory

Tyto typy generátorů umožňují nastavovat pracovní podmínky nezávisle na poměrech probíhajících v jiskřišti. Jsou pro ně charakteristické delší impulsy a nižší pracovní napětí. Kvůli převládající iontové vodivosti se často používá zapojení elektrod na opačné póly jako v případě závislých generátorů. [14, 17]

- **Rotační generátory** – impulsy jsou tvořeny roztáčením dynama pomocí asynchronního motoru. Do obvodu může být zařazena polovodičová dioda, která brání průrazu opačným směrem. Tento typ generátorů umožňuje odebírání velkého množství materiálu. Nevýhodou je jejich hlučnost a problematická regulace frekvence pulsů, která závisí od otáček motoru. Pro dokončování je nutné použít jiný typ generátoru. Schéma rotačního generátoru je zobrazena na obr. 2.10. [17]

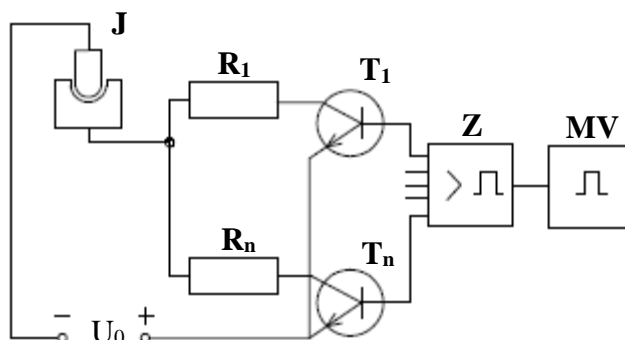


J – jiskřiště, D – polovodičová dioda, G – generátor, M – motor, U_J – napětí v jiskřišti

Obr. 2.10 Schéma rotačního generátoru s časovým průběhem napětí a proudu. [19]

- **Polovodičové generátory** – do této skupiny patří v současné době nejrozšířenější tranzistorové generátory. Umožňují změnu elektrických parametrů impulsů v širokém rozsahu. Multivibrátor určuje délku trvání impulsů a jejich frekvenci, kterou lze nastavovat v rozmezí 500 Hz až 50 kHz. Tranzistory jsou buzeny ze zesilovače, který zesiluje impulsy od multivibrátoru. Pracovní proud je ovlivněn počtem zapojených tranzistorů. Výhodou je možnost dosažení nízkého relativního objemového úbytku (cca 1 %). Impulsy mají větší délku a převládá v nich iontová vodivost. Z toho důvodu se obrobek zapojuje jako katoda.

Vhodným zapojením elektrod na tranzistory lze obrábět i několika elektrodami zároveň. Schéma polovodičového generátoru je znázorněna na obr. 2.11, průběh napětí a proudu odpovídá obr. 2.7. [14, 17, 19]



J – jiskřiště; R_1, R_n – rezistor; T_1, T_n – tranzistor; Z – zesilovač; MV – multivibrátor;
 U_0 – napětí na zdroji

Obr. 2.11 Schéma polovodičového generátoru. [19]

2.3 Nástrojové elektrody

Teoreticky lze jako nástroj použít jakýkoliv materiál, který se vyznačuje dobrou elektrickou vodivostí. Ve skutečnosti musí elektroda splňovat ještě několik dalších požadavků: [22]

- dobrá elektrická a tepelná vodivost,
- vysoká pevnost,
- vysoký bod tání,
- dobrá obrobiteľnosť,
- lehce vyrobiteľný tvar.

Vysoký bod tání je důležitý kvůli vzniku vysokých teplot v místě výboje. Se zvyšující se pevností klesá opotřebenění nástroje. Každý materiál nástroje se v závislosti na materiálu obrobku a podmínkách obrábění bude chovat trochu jinak. Některý nebude vykazovat žádné opotřebenění, ale obrábění bude trvat dlouho, jiný zase bude odebírat materiál efektivně ale nástroj se bude rychle opotřebovávat. Cílem je zvolit materiál a nastavit technologii tak, aby bylo dosaženo žádaného výsledku. Kvalita povrchu a přesnost rozměrů vyrobené součásti závisí na kvalitě povrchu nástroje a přesnosti, s jakou je vyroben a uchycen ve stroji. [13, 23]

2.3.1 Hloubicí elektrody

Elektrody se vyrábí v různých modifikacích podle jejich určení. Pro hloubení hlubokých děr se používají tyčinky nebo trubičky. Mohou být plné nebo se specifickým vnitřním profilem (obr. 2.12). Průměr elektrody se pohybuje standardně od 0,5 do 6 mm, na objednávku je většinou možné vyrobit jakýkoliv rozměr. Díry velkých průměrů lze hloubit stranovým pohybem elektrody menšího průměru. Při určování délky elektrody musíme brát v úvahu i část nutnou pro její upnutí do stroje. Hloubení obecných tvarů se provádí nejčastěji elektrodou s negativním tvarem požadované dutiny. Volba vhodného materiálu závisí na materiálu obrobku, době trvání impulsu a velikosti proudu. Snahou je dosáhnout co nejmenší opotřebenění elektrody při vysokém úbytku materiálu obrobku. Při dokončovacích operacích bývá opotřebenění nástroje výraznější. Důležitá je správná volba polarity elektrod. Tu určíme podle typu použitého generátoru a z hlediska toho, zda se jedná o hrubování nebo dokončování. Volba polarity je popsána v kapitole 2.1. [14, 17]

Základní vlastnosti nejpoužívanějších materiálů pro výrobu elektrod jsou uvedeny v tab. 2.2. Jedná se především o tyto materiály: [14, 18, 23, 24, 25]

- **Měď** (obr. 2.12) – patří k běžně dostupným materiálům. Jde o jeden z prvních materiálů, z kterého se začali vyrábět nástrojové elektrody. Používá se pro široký okruh aplikací. Lze s ní vyrobit velmi kvalitní povrchy, proto je vhodná zejména pro dokončovací operace. Využití najde také u obrábění karbidů. K nevýhodám patří její špatná obrobitelnost a nízký bod tání, který má za důsledek výrazné opotřebení. Obrobitelnost lze zlepšit přidávkou teluru,



Obr. 2.12 Měděné elektrody s tvarově složitým vnitřním profilem. [26]

- **Grafit** (obr. 2.13) – druhým nejvíce používaným materiálem pro výrobu nástrojů je grafit. Ve Spojených státech amerických se rozšířil natolik, že výrobou výrazně převyšuje elektrody z jiných materiálů. Využívá se především pro obrábění oceli. Jeho teplota tání je vyšší než 3 000 °C, díky čemuž má vysokou odolnost proti opotřebení. Výhodou je jeho nízká hmotnost a dobrá obrobitelnost. K nevýhodám lze zařadit křehkost a především prašnost, která se projevuje při výrobě elektrod. Grafit se vyrábí v izostatických lisecích, kde se lisuje do kvádrů nebo válců, z kterých se obráběním vyrobí požadovaná elektroda. Je dostupný v několika typech, které lze rozdělit podle hustoty. Ta závisí od velikosti částic prášku, z kterého se elektroda lisuje. Hrubovací operace se provádí materiálem s vyšší zrnitostí, pro dokončování se pak používají elektrody z jemného prášku. Čím je elektroda vyrobená z jemnějšího grafitu, tím lepší kvalitu povrchu součásti lze dosáhnout. Nutno však brát do úvahy delší časy obrábění. Vlastnosti grafitu se s časem výrazně nemění, což umožňuje použití těchto elektrod i po dlouhém skladování. Grafitové elektrody výrazně znečišťují dielektrikum v průběhu elektroerozivního obrábění.



Obr. 2.13 Grafitová elektroda. [27]

- **Mosaz** (obr. 2.14) – je slitinou mědi a zinku v různém poměru. Je dobře dostupná a levnější než čistá měď, nevýhodou je však větší opotřebení nástroje vznikající během elektroerozivního procesu. Proto se používá hlavně pro díry, kde nehraje opotřebení velkou roli. Vyrábí se z ní trubičkové elektrody. Odléváním nebo protlačováním lze vyrobit trubičky s komplikovaným vnitřním profilem. Poměrně dobře ji lze obrábět konvenčními metodami.



Obr. 2.14 Jednoduché mosazné elektrody. [28]

- **Wolfram** – používá se pro speciální aplikace, jako je například hloubení děr o průměru do 0,2 mm. Má vysokou hustotu, a bod tání. Nevýhodou je jeho nízká elektrická vodivost, která má za důsledek pomalý úběr materiálu obrobku. Další možností je použití karbidu wolframu, který je velmi křehký. Kvůli jeho vysoké ceně se používá jenom zřídka.
- **Kombinace grafitu s mědí** – jde o grafitovou elektrodu z jemného prášku, která je napuštěná mědí. Grafit je vyroben s určitou porozitou, co umožňuje, aby měď vztlínáním pronikla do jeho dutin. Výrobní proces probíhá v peci. Takováto elektroda v sobě spojuje kvality obou materiálů. Grafit zabezpečuje dobrou obrobiteľnosť, prítomnosť meďi se projeví vyšší pevností a elektrickou vodivostí.
- **Kombinace wolframu s mědí nebo stříbrem** – elektrody z tohoto materiálu jsou velmi drahé. Jde o karbidy wolframu rozptýlené v měděné nebo stříbrné matrici. Výsledkem je kombinace příznivých vlastností mědi, jako je například její elektrická vodivost, s vysokým bodem tání wolframu. Výroba probíhá metodou práškové metalurgie. Tyto elektrody se používají pro speciální aplikace, ale rychlost obrábění je oproti čisté mědi nižší. Lze nimi dosáhnout velmi kvalitní povrch součástí. Čisté stříbro se kvůli jeho nízkému bodu tání většinou nepoužívá.

Tab. 2.2 Vlastnosti vybraných materiálů používaných pro výrobu elektrod. [23]

| Materiál | Hustota | Měrný elektrický odpor | Tepelná vodivost | Koeficient délkové roztažnosti | Bod tání | Měrné teplo |
|-----------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------|--|
| | [g.cm ⁻³] | [μΩ.cm] | [W.m ⁻¹ K ⁻¹] | [.10 ⁻⁶ .K ⁻¹] | [°C] | [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹] |
| měď | 8,93 | 1,7 | 385 | 16,4 | 1083 | 385 |
| grafit | 2,25 | 6000 | 25 | 0,6–4,3 | 3650 | 707 |
| měď + wolfram (25 % Cu) | 14,84 | 3,83 | 220 | 10,77 | 1085–3410 | 214 |
| mosaz | 7,2–8,86 | 3,18–28 | 26–233 | 18–26 | 809–1030 | 375–380 |
| grafit s mědí | 6,8 | 4,36 | 200–300 | 7,4 | – | – |
| wolfram | 19,3 | 5,65 | 163 | 4,4 | 3370 | 134 |
| stříbro | 10,49 | 1,55 | 419 | 19,9 | 963 | 234 |
| stříbro + wolfram (30 % Ag) | 15,28 | 3,45 | 160 | – | > 980 | – |
| karbid wolframu | 15,7 | 53–80 | 84,02 | 5,2–7,3 | 2870 | 171–203 |

Elektrody se vyrábí litím, protlačováním, lisováním, obráběním nebo metodou práškové metalurgie. Výrobu elektrody obráběním lze praktikovat na běžných strojích, které zajistí dostatečnou přesnost vyrobených rozměrů. Frézování je ze všech metod obrábění nepoužívanější. Důvodem je tvar elektrod, který s výjimkou hloubení děr většinou nebývá rotační. Grafit i měď si během obrábění i po něm zachovávají rozměrovou stabilitu. Obrábění grafitu probíhá za sucha, je však nutno použít odsávání, které odstraňuje prach vznikající při procesu. Použití procesní kapaliny se nedoporučuje. Lze ní částečně omezit prašnost, ale vzniklá směs grafitového prášku a kapaliny vytvoří kašovitou emulzi, která znečistí celý stroj. Obrábění stejné elektrody z grafitu může být až 10× rychlejší oproti obrábění měděné elektrody. Důvodem je jeho lepší obrobiteľnosť. [13, 29]

2.3.2 Dráty

Elektroerozivní řezání se provádí dráty různých průměrů, standardně v rozmezí 0,1–0,3 mm. Nejpoužívanější rozměry jsou 0,2 a 0,25 mm. Drát by měl vykazovat podobné vlastnosti, které jsou charakteristické pro hloubicí elektrody (kapitola 2.3.1). Kromě toho je velmi důležitá pevnost drátu, která určuje jeho odolnost proti protržení. Každým opětovným navlékáním drátu se obráběcí proces výrazně prodlužuje. Prasknutí drátu může také v daném místě negativně ovlivnit kvalitu povrchu součásti. Pro zajištění vysoké přesnosti obrábění je nutné, aby drát splňoval tolerance průměru a kruhovitosti. Bývá namotaný na cívce, z které se přes systém kladek odvíjí do místa řezu a následně do kontejneru na použitý materiál. Opakované používání drátu se nedoporučuje. I když se může na první pohled zdát být bez poškození, jeho mechanické vlastnosti jsou často sniženy, což vede k zhoršení kvality vyrobené součásti a k trhání drátu v průběhu obrábění. Použitý materiál se skladuje v zásobníku, který bývá většinou součástí stroje. Lze jej recyklovat, čímž lze částečně snížit náklady na obrábění. [14, 18, 30]



Obr. 2.15 Měděný drát. [31]

Nabídka výrobců bývá velmi široká. Dráty se od sebe odlišují materiálem, průměrem a pevností. Důležitá je i tvrdost drátu. Měkké dráty se používají pro řezání úkosů, kdy se drát do určité míry musí ohnout. U těchto drátů může být navlečení do vodiček náročnější. Úkosy do 7° lze většinou řezat i méně ohebnými dráty. Cívky vážící několik kilogramů se dodávají v hermeticky uzavřeném obalu, který brání jejich navlhnutí. Oxidace povrchu drátu snižuje jeho elektrickou vodivost a celkově zhoršuje podmínky obráběcího procesu. [18]

Pro výrobu řezacích drátů se používají téměř stejné materiály jako pro výrobu hloubicích elektrod: [18, 30, 32, 33]

- **Měď** (obr. 2.15) – kvůli její dobré elektrické vodivosti a dostupnosti se začala používat jako první. Nevýhodou je, že tyto dráty mají nízkou pevnost v tahu a při silnějším napnutí se mohou trhat. Rychlost řezání je oproti jiným drátům pomalá. Používá se většinou na starých strojích, které nejsou vhodné pro použití speciálních moderních drátů.
- **Mosaz** (obr. 2.16) – mosazný drát splňuje požadavky na dobrou elektrickou vodivost a zároveň umožňuje díky své vyšší pevnosti silnější napnutí než čistá měď. Slitina obsahuje většinou 35–37 % zinku. Po překročení hodnoty 40 % se při výrobě začínají projevovat komplikace, materiál se láme a jeho zpracování je obtížné. Jedná se o běžně používaný drát, který zabezpečí uspokojivé výsledky při řezání většiny materiálů. Přítomnost zinku se oproti čisté mědi projevuje vyšší rychlostí řezání. Cívka má být zářivě



Obr. 2.16 Mosazný drát. [34]

barvy, matný vzhled nebo rozdíly v barevnosti jsou indikací oxidace nebo kontaminace materiálu.

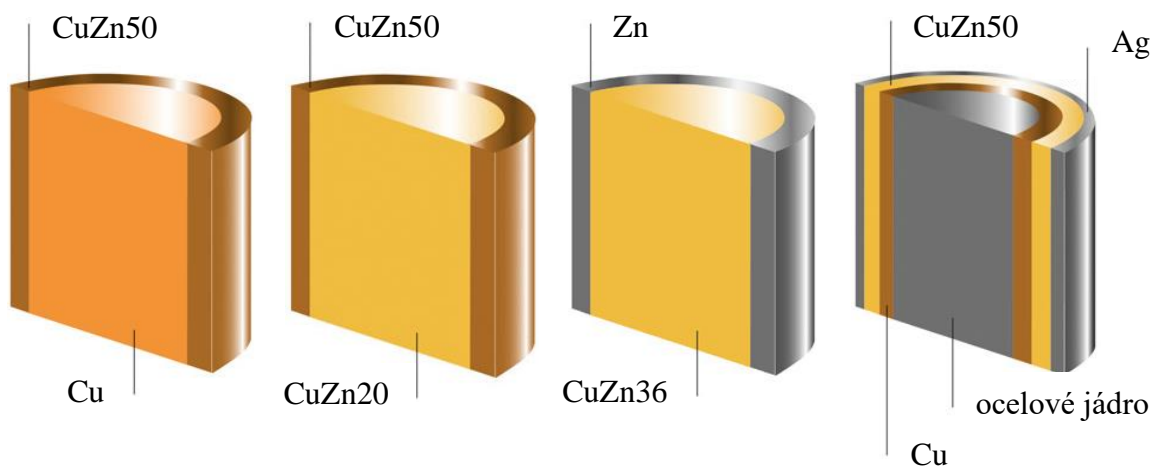
- **Povlakovaný drát** (obr. 2.17) – jádro drátu je tvořené materiálem s dobrou pevností v tahu, používá se měď, mosaz nebo ocel. Na něj je pak nanesen jeden nebo více povlaků z jiného materiálu o tloušťce 2–3 μm . Nejčastěji se používá zinek, měď, mosaz nebo stříbro. Povlakování se provádí galvanickým pokovením, které zabezpečuje dobrou homogenitu povrchu a stabilní tloušťku povlaku. Druhou možností je nanášení povlaku ponorem. Takový drát je sice levnější, ale méně kvalitní. Zinek má dobrou elektrickou



Obr. 2.17 Pozinkovaný drát. [35]

vodivost, jeho povlak zároveň působí jako tepelná bariéra, která brání vysokému zahřátí jádra drátu. K největším výhodám povlakovaných drátů lze zařadit zrychlení obráběcího procesu a snížení počtu protržení. S výhodou je lze použít při řezání obrobků s velkou tloušťkou, kde je nutno použít vyšší napnutí pro zachování přímosti stěn. Obr. 2.18 zobrazuje několik příkladů jakými může být povlakovaný drát zhotoven.

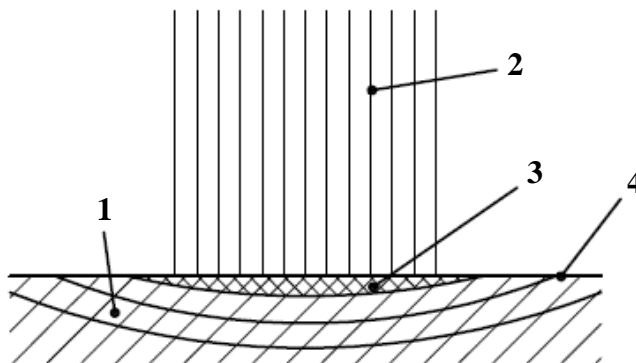
- **Molybden** – má vysokou pevnost v tahu, lze ho použít v obdobných aplikacích jako povlakovaný drát. Je vhodný pro řezání ostrých vnitřních rohů. Neulpívá na materiálu obrobku, proto se využívá například v medicíně, kde nesmí být povrch obrobku kontaminován mědí nebo zinkem. Je drahý a jeho výroba je náročná, proto se používá jenom pro případy, kdy má být dosažena vysoká přesnost a kvalita povrchu.
- **Wolfram** – stejně jako molybden se používá pro výrobu vysoce přesných součástí. Nekontaminuje povrch a má vysokou pevnost. Nevýhodou je jeho vysoká cena. Z čistého nebo legovaného wolframového prášku se metodou práškové metalurgie při vysoké teplotě a pod vysokým tlakem vytvoří prut, z kterého se tažením vyrobí drát.



Obr. 2.18 Řez různými typy povlakovaného drátu. [36]

2.3.3 Opotřebení elektrod

V průběhu elektroerozivního obrábění vzniká mezi elektrodami plazmový kanál, který na ně působí jako plošný, ostře ohraničený zdroj tepla (obr. 2.19). Při každém výboji, který způsobí úběr materiálu obrobku nastává zároveň i opotřebení nástroje. Na jednu z elektrod působí elektrony a na druhou kladné ionty. Působením těchto částic se zvyšuje povrchová teplota elektrod, což je následováno tavením a odpařováním jejich materiálu. Množství odpařeného materiálu závisí především na polaritě zapojení elektrod, fyzikálních vlastnostech materiálu a parametrech impulsů. Mechanické vlastnosti nemají na opotřebení výrazný vliv, proto je možné relativně měkkým materiálem jako je například mosaz obrábět materiály s mnohem vyšší pevností. [17, 18, 19]



1 – izotermy, 2 – plazmový kanál,
3 – roztavený materiál, 4 – povrch elektrody

Obr. 2.19 Znárodnění styku plazmového kanálu s elektrodou. [19]

V průběhu obrábění je důležité sledovat opotřebení nástroje. Jedná se hlavně o opotřebení hloubicích elektrod v předem definovaných bodech jako jsou rohy, výstupky, hroty a podobně. Změny lze pozorovat nejdříve na hranách a rozích, které se začnou zaoblovat. Na obr. 2.20 je zobrazeno opotřebení elektrody, která měla původně tvar kvádru. V extrémním případě, pokud nebude bráno opotřebení v potaz, lze takovou elektrodou místo kvádru vyhloubit dutinu s kulovým tvarem dna. Je tedy důležité dbát na volbu vhodného materiálu elektrody, nastavit vhodné pracovní podmínky a po překročení kritické hranice opotřebení elektrodu vyměnit za novou. U řezání není nutno na opotřebení tolik dbát, protože do místa řezu je neustále přiváděn nový drát. [22, 23]

K hlavním příčinám vzniku opotřebení elektrody patří: [22]

- vysoká koncentrace působících elektronů nebo kladných iontů,
- vysoká teplota, na kterou je elektroda lokálně ohřáta,
- působení kavitace,
- mechanické opotřebení částicemi oderodovaného materiálu,
- nevhodně zvolené pracovní podmínky,
- chyby vzniklé při výrobě elektrody.

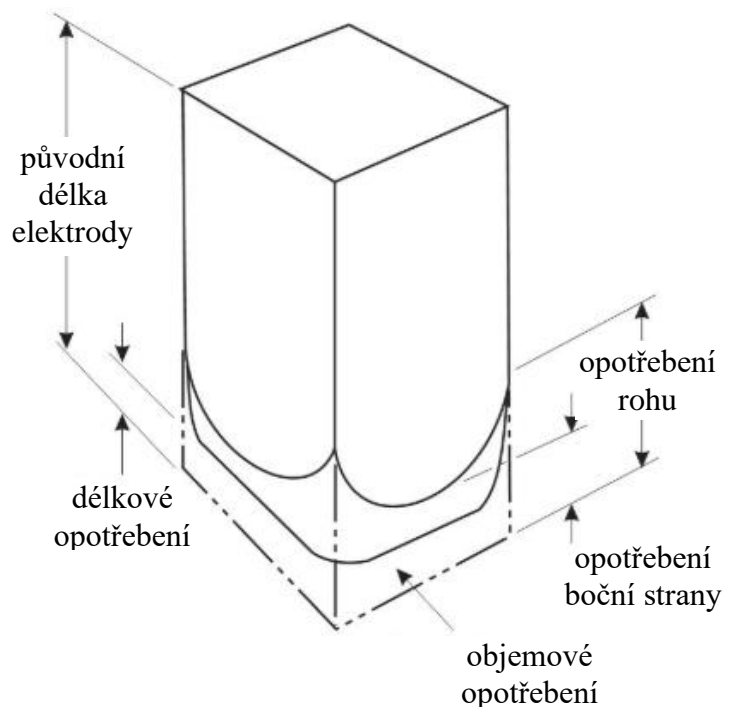
Vztahem 2.3 lze vyjádřit relativní objemové opotřebení jako poměr úbytku objemu elektrody k úbytku objemu obrobku. Hodnota této veličiny by se měla pohybovat ideálně do 10 % podle toho, zda se jedná o hrubování nebo dokončování. Snahou je, aby tato hodnota byla co nejmenší, protože náklady na výrobu elektrody mohou v případě hloubení tvořit až 50 % z celkových nákladů na obrábění. [17]

$$\gamma = \frac{V_n}{V_o} \cdot 100 [\%] \quad (2.3)$$

kde: γ [%] – relativní objemové opotřebení
 V_n [mm³] – objemové opotřebení nástroje
 V_o [mm³] – objemový úbytek obrobku

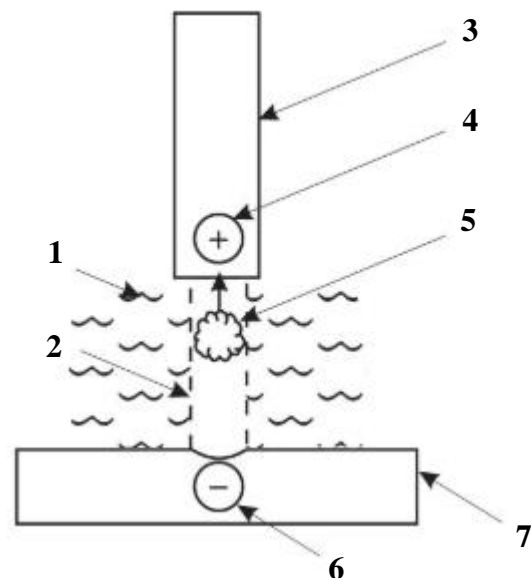
Na obr. 2.20 jsou uvedeny základní druhy opotřebení, které se mohou vyskytovat na hloubicí elektrodě: [18]

- **Opotřebení rohu** – rozdíl mezi původní délkou elektrody a nejnižším bodem na rohu, který je součástí původního tvaru elektrody. Tento parametr slouží pro určení délky elektrody nebo počtu elektrod pro hloubení forem.
- **Délkové opotřebení** – rozdíl původní délky elektrody a délky opotřebené elektrody.
- **Opotřebení boční strany** – rozdíl mezi původní délkou elektrody a nejnižším bodem nacházejícím se na boční straně, který ještě reprezentuje původní tvar elektrody. Tento parametr se používá pro určení opotřebení elektrod válcového tvaru.
- **Objemové opotřebení** – rozdíl mezi objemem elektrody před obráběním a po něm.



Obr. 2.20 Opotřebení na hloubicí elektrodě. [18]

Za určitých podmínek může docházet k obrábění bez opotřebení nástroje. Tento jev byl pozorován při hloubení oceli měděnou nebo grafitovou elektrodou. Nástroj musí být v tomto případě zapojen na kladný pól a impulsy musí být dlouhé. Mezi elektrodami vzniká široký plazmový kanál a odpařený materiál obrobku je přitahován k elektrodě s kladnou polaritou, tedy na nástroj (obr. 2.21). Materiál obrobku se usazuje na povrchu nástrojové elektrody kde tuhne, a tím se stává součástí nástroje. Při dalším výboji nastává eroze usazeného materiálu, který je následně opět nahrazen vypařeným materiálem z proběhlého výboje. Rychlost proudění dielektrika musí být malá, aby nebránila přechodu částic z obrobku na nástroj. Výhodou je snížení nákladů na výrobu a výměnu elektrod. Na druhou stranu, použití opačné polarity způsobí, že se materiál obrobku odstraňuje výrazně pomaleji. Pokud se usazený materiál z nástrojové elektrody nestíhá odstraňovat, může nastat její růst. [18]



1 – dielektrikum, 2 – plazmový kanál, 3 - nástroj, 4 – kladná polarita, 5 – obláček par uvolněných z obrobku, 6 – záporná polarita, 7 - obrobek

Obr. 2.21 Princip obrábění bez opotřebení nástroje. [18]

2.4 Dielektrikum

Dielektrikum je nezbytnou součástí pro fungování elektroerozivního procesu. Jedná se většinou o kapalinu, která má vysoký elektrický odpor. Slouží jako elektrický izolátor, který zamezuje, aby mezi elektrodami procházel proud. Napětí se v určitém okamžiku zvýší na takovou hodnotu, kdy dojde k průrazu dielektrika. To se pak změní na vodič (nastane ionizace prostředí) a umožní průtok elektrického proudu mezi elektrodami. Po přerušení elektrického proudu dielektrikum opět plní funkci izolátoru. [37, 38]

Základní vlastnosti, které by mělo dielektrikum mít: [17]

- vhodné dielektrické vlastnosti umožňující vznik výboje,
- dobrá viskozita a smáčivost,
- vysoký bod vzplanutí (minimálně 60 °C),
- hygienická a ekologická nezávadnost,
- nízká cena.

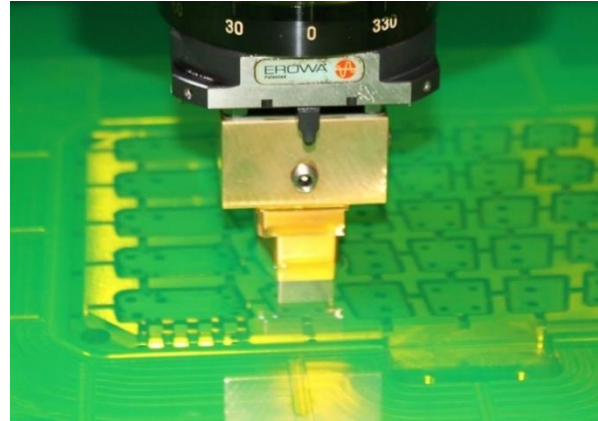
Dielektrikum zabraňuje vzniku trvalého elektrického výboje, při kterém se často nevratně poškodí povrch obrobku nebo i elektrody. Kapaliny by měla mít nízkou viskozitu, čím se zabezpečí její dobrý vtok i do úzkých a tvarově komplikovaných oblastí. Obzvláště důležité je dbát na to při dokončovacích operacích. Dalším úkolem dielektrika je chlazení elektrod a odstraňování roztavených částic z místa obrábění. Při správném použití chladí dielektrikum tak, že je možné dotknout se elektrod bezpečně holou dlaní. Teplota dielektrika při elektroerozivním obrábění dosahuje 60 až 80 °C, proto musí mít teplotu vzplanutí vyšší než 60 °C. Někdy může být nutno použít chlazení kapaliny, často například u hloubiček, které pracují s vysokými hodnotami proudu. Při dokončovacích operacích je vhodné dielektrikum udržovat na stabilní teplotě, aby nedocházelo k ovlivňování rozměrů obrobku vlivem teplotní roztažnosti materiálu. [18, 37, 38]

V současné době se výrazně dbá na bezpečnost a ekologii výrobních procesů. Dielektrikum by proto mělo být ekologicky nezávadné a v průběhu obrábění by neměly vznikat škodlivé výpary. Použité kapaliny se musí vhodným způsobem zlikvidovat. Dielektrikum je kapalina, která se vypařuje, proto je nutno ho pravidelně doplňovat. Nesmí reagovat se součástmi stroje, s kterými dojde do kontaktu. Při změně druhu dielektrika je nutno postupovat obezřetně, protože odlišné kapaliny mohou vzájemně reagovat a poškodit některé části stroje. Volbu dielektrika ovlivňuje samozřejmě i jeho cena. [18, 22, 37]

Nejpoužívanější druhy dielektrik jsou: [18, 37]

- **Deionizovaná voda** – je nejpoužívanějším dielektrikem v oblasti drátového řezání. Má dobré dielektrické vlastnosti a je lehce dostupná. Nelze však použít vodu přímo z vodovodního kohoutku. Voda musí projít deionizačním procesem, který ji upraví pro použití v elektroerozivním procesu. V průběhu obrábění se do vody dostávají částice materiálu z obrobku i nástroje. Současně teplo vznikající v okolí výboje rozkládá vodu na vodík a kyslík. Nečistoty, které se do vody dostanou mění její kvalitu a schopnost plnit svou funkci. Použitá voda musí projít přes zařízení s filtry a deionizační pryskyřicí, kterým se znečištění odstraní. Tímto se vlastnosti vody obnoví tak, aby ji bylo možné znovu použít. Moderní stroje jsou vybaveny senzory, které sledují kvalitu vody (její vodivost) v průběhu obrábění. Deionizovaná voda je bezpečným a zdravotně nezávadným dielektrikem. Pokud je obrobek náchylný na korozi, je vhodné ho po obrábění adekvátně ošetřit.

- **Petrolej a kapaliny na bázi petroleje** – použití těchto kapalin je typické pro hloubicí stroje (obr. 2.22). Dielektrikum si zachovává své vlastnosti, před dalším použitím ho není nutno deionizovat jako vodu. Většinou stačí kapalinu jenom přefiltrovat pro odstranění pevných částic. Tato dielektrika jsou velmi rozšířená hlavně kvůli jejich příznivé ceně. Jejich životnost je však omezená, doba používání by neměla přesáhnout pět let. V důsledku tepla vznikajícího při obráběcím procesu se rozkládají na vodík, uhlík a další produkty. Je u nich nutno dodržovat vyšší bezpečnost z hlediska ochrany zdraví a možnosti vzniku požáru.



Obr. 2.22 Hloubení v dielektriku na bázi petroleje. [39]

- **Syntetické kapaliny** – jejich pořizovací cena je sice oproti předchozím vyšší, ale tyto kapaliny ve všeobecnosti není nutno vyměňovat, protože jejich vlastnosti se s časem nemění. Jedinou nutností je doplňování zásobníku dielektrika. Výhodou je taktéž menší reakce při styku s pokožkou.
- **Kapaliny rostlinného původu** – byly vyvinuty kvůli farmaceutickému průmyslu, kde bylo použití určitých dielektrik zakázáno na základě směrnic. Důvodem byl požadavek, aby se součásti po obrábění nemusely složitě sterilizovat kyselinami nebo jinými látkami.

Životnost dielektrika závisí na jeho druhu, využití elektroerozivního stroje, materiálu obrobku a kvalitě použitých filtrů. Není nezvyklé používat dielektrikum i po skončení jeho životnosti, protože většinou nemá konkrétní datum expirace. Projeví se to však na kvalitě výroby. Zda je dielektrikum již vhodné vyměnit lze ověřit v laboratoriu. Zkušené obsluze stroje často stačí zhodnotit barvu a zápach tekutiny. [37]

2.4.1 Znečištění dielektrika

V průběhu obráběcího procesu se dielektrikum znečišťuje částicemi materiálu obrobku i nástroje. Jde o tuhé nebo plynné produkty, které vznikají při výboji. Tyto nečistoty výrazně ovlivňují proces obrábění. Mezi elektrodami může vzniknout propojení z vodivých částic nacházejících se v dielektriku, čím vznikne nekontrolovatelný průraz vedoucí k znehodnocení povrchu obráběné součásti. Pokud je dielektrikum výrazně znečištěné, je nutné vzdálenost mezi elektrodami zvětšit, aby se zamezilo vzniku těchto průrazů. Znečištění tvoří z největší části: [19]

- kovové vodivé kuličky,
- nepravidelná vodivá zrna sazí,
- nepravidelné nevodivé nečistoty.

Každý stroj musí být vybaven zařízením pro přívod, chlazení a filtraci dielektrika, které zabezpečuje přívod kapaliny v adekvátní kvalitě a tepelnou stabilizaci procesu. Filtry určené pro čištění dielektrika jsou schopny odstranit částice o velikosti 2–5 μm . Filtrační zařízení musí podléhat pravidelné údržbě. Znečištění dielektrika v rozsahu 2–4 % může snížit účinnost procesu až o 30–40 %. [22, 38]

2.4.2 Suché elektroerozivní obrábění

Většina kapalných dielektrik představuje ekologické a bezpečnostní riziko. Z tohoto důvodu byla hledána alternativa, při které by se zachovala kvalita obrábění a zároveň by dielektrikum nebylo rizikové pro obsluhu a životní prostředí. Vzniklo takzvané suché elektroerozivní obrábění, kde se místo kapalného dielektrika používá plynné médium. Helium, dusík, argon nebo jiná směs plynů se přivádí do místa mezi elektrodami. Odpadá tím vznik znečištění a riziko výskytu požáru. Na druhou stranou, plyny mají nízké průrazné napětí a nedokážou adekvátně chladit elektrody. Do oblasti jiskrové mezery může pronikat vzduch z okolí, co může obzvláště při vysokých teplotách způsobovat oxidaci povrchu obrobku. Při použití plynného dielektrika bylo pozorováno menší opotřebením nástroje. K dalším výhodám lze přiřadit zmenšení podlahové plochy stroje, který nemusí obsahovat zásobník na kapalinu a filtrační zařízení. Suché elektroerozivní obrábění lze aplikovat na hloubení i řezání. Porovnání základních vlastností kapalných a plynných dielektrik je uvedeno v tab. 2.3. [40, 41]

Tab. 2.3 Porovnání vlastností kapalných a plynných dielektrik. [40]

| | Kapalné dielektrikum | Plynné dielektrikum |
|---|----------------------|----------------------|
| dielektrikum | voda, petrolej | helium, dusík, argon |
| opakované použití dielektrika | ano | ne |
| nutnost filtračního a chladicího zařízení | ano | ne |
| schopnost chladit elektrody | vysoká | nízká |
| riziko vzniku znečištění a požáru | většinou ano | ne |
| riziko ohrožení zdraví obsluhy | ano | ne |
| Riziko oxidace povrchu obrobku | ne | ano |
| hodnota průrazného napětí | vyšší | nižší |

2.4.3 Vyplachování dielektrika

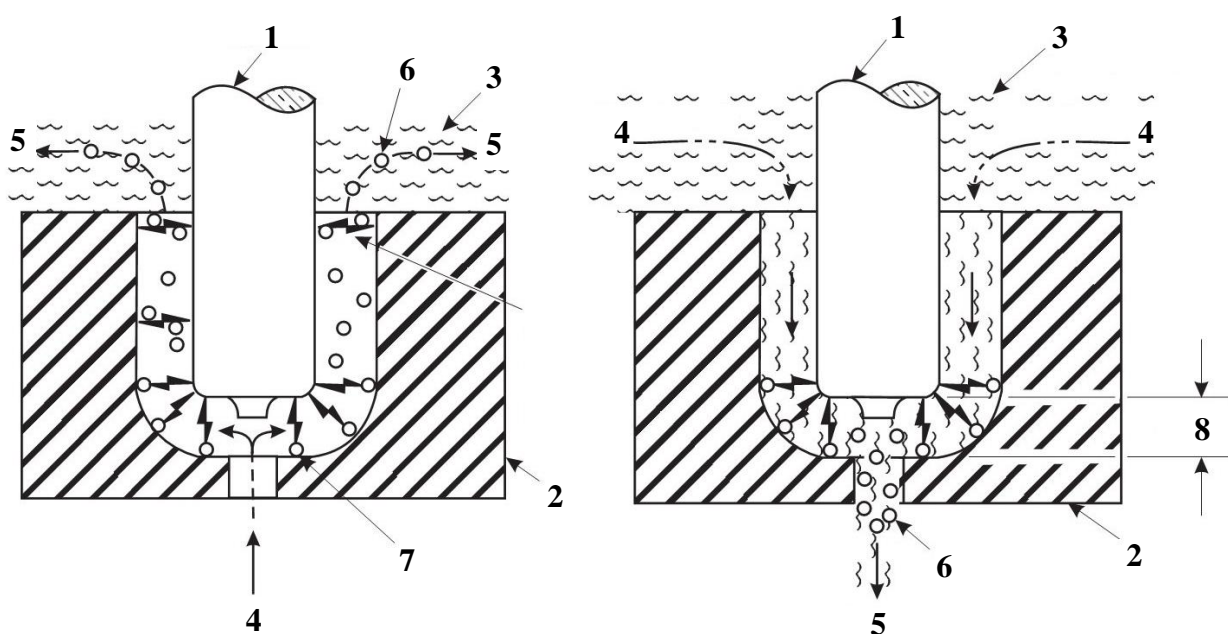
Nahromadění oderodovaných částic mezi nástrojem a obrobkem výrazně zhoršuje průběh obrábění. Výboj v tomto případě působí na třísky místo toho, aby odebíral materiál obrobku. Energie se využije hlavně na rozrušování usazených částic na menší elementy a obrábění bude neefektivní. Z tohoto důvodu je důležité zabezpečit odstraňování usazených částic z jiskrové mezery vhodným prouděním dielektrika. Obzvláště důležité je zabývat se tím při hloubení komplikovaných tvarů a hlubokých děr. V případě řezání se kapalina do místa řezu vhná tryskami, přes které prochází řezací drát. [18, 22]

Odstraňování částic prostřednictvím dielektrika může být provedeno několika způsoby: [14, 18, 22]

- **Vstřikování** (obr. 2.23 vlevo) – dielektrikum se vhná do místa obrábění přes otvor v nástroji nebo obrobku. S rostoucí hloubkou díry je nutno vhodně upravovat tlak dielektrika, aby bylo odstraňování částic efektivní. Dielektrikum spod elektrody odchází vždy nejkratší možnou cestou. V případě válcové elektrody většinou nastane rovnoměrné odstraňování třísek z jiskrové mezery. Pokud má elektroda čtvercový průřez, může nastat nedostatečné proudění dielektrika do rohů. Třísky se z těchto míst nebudou dostatečně odstraňovat, co se na vyhloubeném tvaru projeví ztmavnutím v rozích. V oblastech, kde je proudění dielektrika ideální se ztmavnutí neprojevuje. Tento jev nelze ovlivnit zvýšením rychlosti nebo průtoku kapaliny. Další nevýhodou přívodu dielektrika vstřikováním je vznik kuželovitosti stěn, která se projevuje v místech, kterými proudí znečištěné dielektrikum. Oderodované částice,

kteřé jsou v něm obsažené způsobují na už obrobených stěnách boční výboje. V důsledku toho nastává další odstraňování materiálu. Zešikmení lze eliminovat jiným typem proudění nebo elektrodou, která se směrem k upnutí zužuje. Při hloubení komplikovaného tvaru se dielektrikum vhání přes otvory, které jsou umístěné v místech prvního styku nástroje a obrobku. Pokud má elektroda tvar, pod kterým by se mohli shromáždit výpary vznikající při výbojích (například vodík), je nutno zabezpečit jejich odstranění otvorem ve vrchní části elektrody. Důvodem je riziko výbuchu těchto plynů.

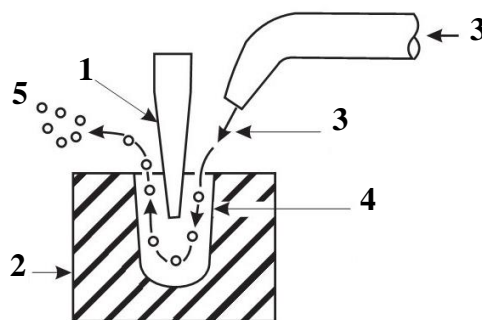
- **Nasávání** (obr. 2.23 vpravo) – jde o takzvaný reverzní systém proudění. Tento způsob se provádí nasáváním dielektrické kapaliny přes otvor v obrobku nebo v nástroji. Oderodované částice nepřicházejí do kontaktu s obrobenými plochami, díky čemu se eliminuje vznik kuželovitosti stěn. Ve filtrační soustavě se mohou hromadit plyny vzniklé při obrábění. Kvůli nebezpečí výbuchu je nutno zabezpečit jejich odstranění.



1 – nástroj, 2 – obrobek, 3 – dielektrikum, 4 – přívod dielektrika, 5 – odvod dielektrika, 6 – třísky, 7 – tříska vznikající v důsledku výboje, 8 – jiskrová mezera

Obr. 2.23 Zobrazení přívodu dielektrika vstřikováním (vlevo) a nasáváním (vpravo). [18]

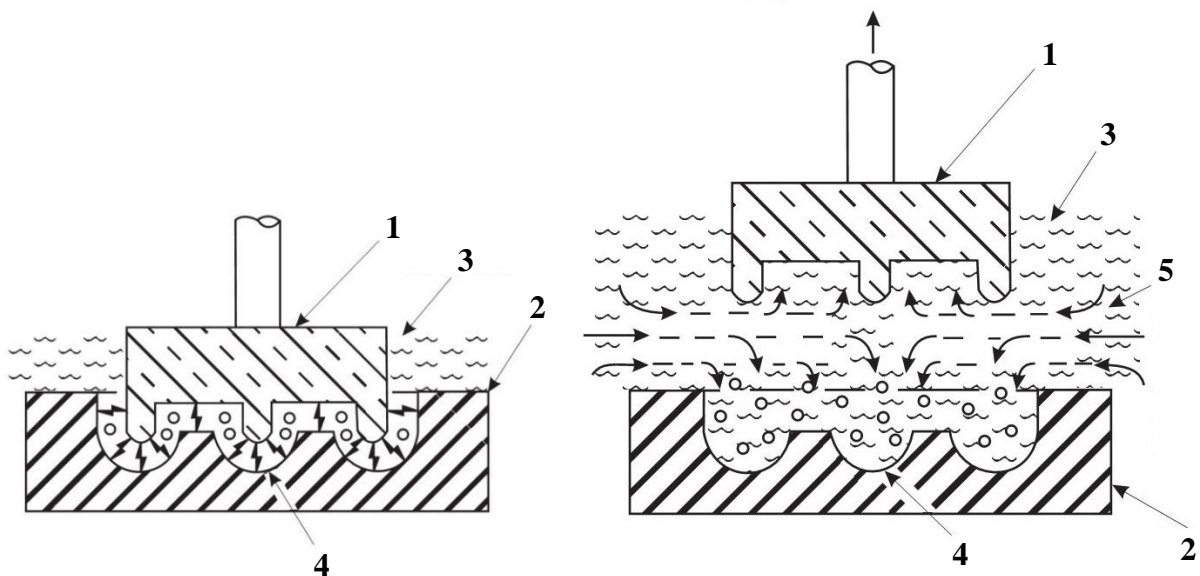
- **Externí přívod dielektrika** (obr. 2.24) – pro určité aplikace není vhodné použití odvodu dielektrika přes obrobek nebo nástrojovou elektrodu. V tomto případě jedna nebo více trysek vhání kapalinu do jiskrové mezery z boční strany elektrody. Je důležité nastavit trysky tak, aby byl tok dielektrika správně usměrněn. Při špatném nastavení může docházet k shromáždění třísek na určitých místech, čím se zhorší podmínky obráběcího procesu. Nejvhodnější je umístit trysky jenom z jedné strany elektrody. Tento typ vyplachování se využívá u elektroerozivních řezaček, kde je kapalina do místa řezu vháněna tryskami, kterými prochází drát.



1 – nástroj, 2 – obrobek, 3 – přívod dielektrika, 4 – trysky, 5 – odvod dielektrika a třísek

Obr. 2.24 Externí přívod dielektrika. [18]

- **Vibrační vyplachování** (obr. 2.25) – tato metoda se využívá hlavně při hloubení jednoduchých tvarů. Chlazení elektrod a odstraňování nečistot se zabezpečuje pohybem elektrody, která se cyklicky oddaluje a přibližuje k obrobku. Kromě vibračního pohybu může elektroda zároveň rotovat, čím se ještě více zlepši plynulost procesu. Vibrační vyplachování se skládá ze tří fází, které se opakují. Nejprve se elektroda nachází v těsné blízkosti obrobku (obr. 2.25 vlevo). Mezi elektrodami vznikne výboj, v důsledku kterého se odstraní materiál obrobku i elektrody, který pak ve formě třísek zůstává v místě jiskrové mezery. V druhé fázi (obr. 2.25 vpravo) se nástroj oddálí od obrobku a vzniklý prostor se zaplní dielektrickou kapalinou z okolí. Následuje třetí fáze, ve které se elektroda opět přisune k obrobku. Dielektrikum je vytlačeno z prostoru mezi elektrodami, a zároveň se sebou odnáší třísky usazené na obrobku.

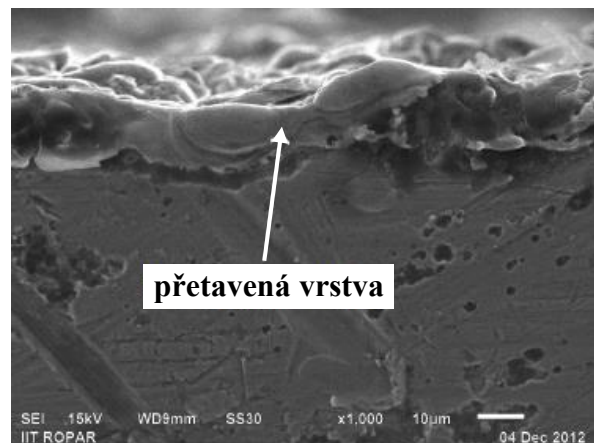


1 – nástroj, 2 – obrobek, 3 – dielektrikum, 4 – třísky, 5 – směr toku dielektrika

Obr. 2.25 Princip vibračního vyplachování. [18]

2.5 Charakteristika obrobekých součástí

vlivem vysokých teplot vznikajících při procesu, dochází k metalurgickým změnám na povrchu součástí. Vysoká rychlost ochlazování způsobuje vznik typické povrchové vrstvy. Na povrchu se nachází vrstva přetaveného kovu o tloušťce 10–40 μm (obr. 2.26). Další oblast, která může sahát do hloubky až 250 μm je kontaminována materiálem elektrody. Tepelně ovlivněná oblast může zasahovat až do hloubky 400 μm . Jde o silně nauhličenou část materiálu s vysokou tvrdostí. Největší tloušťka tepelně ovlivněné vrstvy se vyskytuje při hrubování. Při dokončování nemusí být vůbec patrná. Zároveň může docházet k chemické reakci povrchu obrobku s dielektrikem nebo nástrojem. Například při obrábění titanu tímto



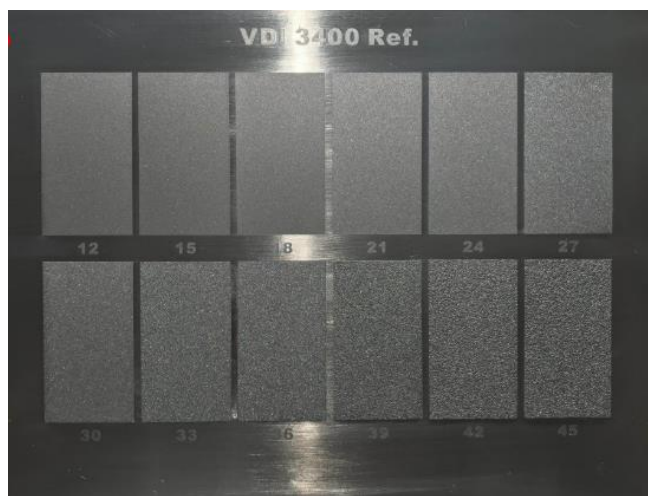
Obr. 2.26 Ukázka přetavené vrstvy, která vznikla elektroerozivním obráběním. [42]

způsobem vznikají jeho karbidy nebo oxidy. Vlivem působení vysokých teplot vznikají v povrchové vrstvě zbytková tahová napětí. Může nastat i situace, že se tyto napětí zvýší natolik, že způsobí vznik povrchových mikrotrhlin. V důsledku rozrušování povrchu se pak zhoršuje funkčnost součástí a klesá jejich životnost. V určitých případech proto může být vhodně ovlivněnou vrstvu následně odstranit mechanickým způsobem. [22]

2.5.1 Struktura povrchu

Povrch elektroerozivně obrobených součástí je tvořen náhodně rozmístěnými krátery. Jejich velikost a tvar závisí na materiálu obrobku a nástroje, druhu použitého dielektrika a parametrech procesu. Povrch vysoké kvality lze dosáhnout krátkými impulsy o vysoké frekvenci. Elektroda musí být vyrobena minimálně se stejnou kvalitou povrchu, která má být dosažena na obrobku. Sebeměší škrábanec nebo jiný defekt na elektrodě se projeví na povrchu součásti. [17, 18, 22]

Obrobené plochy mají charakteristický matný vzhled. Elektroerozivní obrábění je jednou z mála obráběcích metod, kterými lze dosáhnout rovnoměrný hrubý povrch bez periodicky se opakujícího rýhování. Při vhodných podmínkách lze dosáhnout kvalitu povrchu $Ra = 0,1 \mu\text{m}$. Směr měření nemá na získané hodnoty vliv. Kromě běžných parametrů lze pro vizuální hodnocení povrchu použít stupnici VDI 3400. Na trhu jsou dostupné plastové nebo kovové šablony, do kterých jsou vyhloubeny vzory s různými hodnotami VDI (obr. 2.27). Čím je hodnota VDI vyšší, tím je povrch hrubší. Vztah mezi hodnotou VDI a Ra je popsán vztahem 2.4. Několik příkladů je uvedených v tab. 2.4. [18, 43]



Obr. 2.27 Stupnice VDI 3400. [44]

$$VDI = 20 \cdot \log(10 \cdot Ra) [-] \quad (2.4)$$

kde: VDI [-] – kvalita povrchu podle VDI 3400
 $Ra [\mu\text{m}]$ – průměrná aritmetická úchylka profilu

Tab. 2.4 Porovnání hodnot kvality povrchu podle VDI 3400 a Ra . [45]

| | | | | | | | | |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| VDI 3400 | 0 | 6 | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 |
| $Ra [\mu\text{m}]$ | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,8 | 1,6 | 3,2 | 6,3 | 12,5 |

2.5.2 Geometrická přesnost

Elektroerozivním obráběním lze dosáhnout přesnost vyrobených rozměrů v řádu tisícín milimetru. Vzniklou odchylku lze vyjádřit jako součet všech chyb, které vstupují do obráběcího procesu (vztah 2.5). Odchylku obráběcího stroje způsobují nepřesnosti vznikající při posuvech nebo při upínání nástroje. Kolísání teploty v průběhu obrábění způsobuje změnu rozměrů nástroje i obrobku. Tuto skutečnost lze eliminovat monitorováním a upravováním teploty dielektrika v průběhu obrábění. Je nutno dbát i na vhodné umístění stroje ve výrobní hale. Odchylku nástroje reprezentuje přesnost, s jakou je elektroda vyrobena. Pro přesné aplikace se

používají broušené nástroje. Odchylka dána metodou výroby obsahuje všechny chyby, které vznikají z podstaty elektroerozivního obrábění. Patří sem například odchylky vzniklé v důsledku nadměrného znečištění dielektrika nebo jeho špatným prouděním. Mezi hlavní druhy nepřesností, které se projevují na součástech lze zařadit vznik kuželovitosti stěn, vznik úkosů a změnu rozměrů. [17, 22]

$$\delta = \delta_S + \delta_T + \delta_N + \delta_E \text{ [mm]} \quad (2.5)$$

kde: δ [mm] – odchylka přesnosti
 δ_S [mm] – odchylka obráběcího stroje
 δ_T [mm] – teplotní odchylka
 δ_N [mm] – odchylka nástroje
 δ_E [mm] – odchylka dána metodou výroby

2.6 Metody elektroerozivního obrábění

Jednotlivé druhy elektroerozivního obrábění se od sebe odlišují typem elektrického výboje, parametry obráběcího procesu, tvarem nástroje a dalšími charakteristikami. Z tohoto hlediska se dříve používalo rozdělení na následující oblasti: [22]

- elektrojiskrové obrábění,
- elektroimpulsní obrábění,
- elektrokontaktní obrábění,
- anodomechanické obrábění.

V současnosti se více používá rozdělení vzhledem k aplikaci jednotlivých metod, tedy z hlediska cíle, který má být metodou dosažen. Jednotlivé druhy elektroerozivního obrábění jsou stručně popsány v kapitolách 2.6.1, 2.6.2, 2.6.3, 2.6.4 a 2.6.5.

2.6.1 Elektroerozivní hloubení

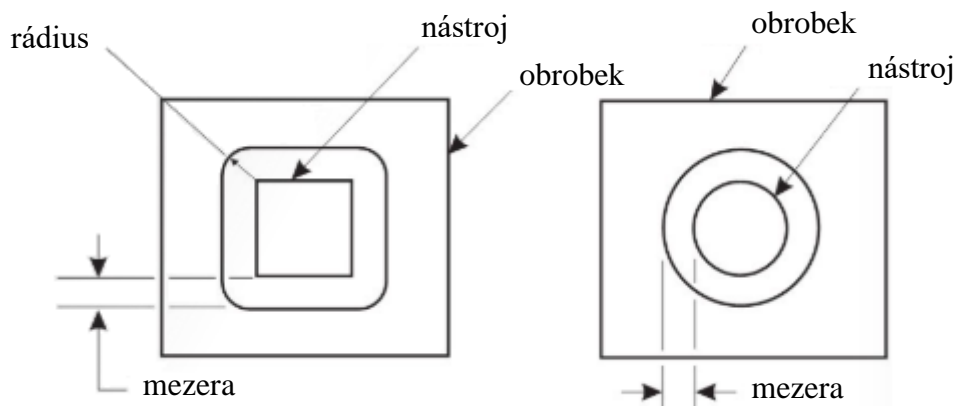
Hloubení patří mezi nejrozšířenější metody elektroerozivního obrábění. Úběr materiálu se provádí elektrodou, která má negativní tvar výsledné součásti. Většinou se tato metoda používá pro výrobu tvářecích a lisovacích forem, nebo kovacích zápustek. Z ekonomického hlediska je vhodná pro kusovou výrobu, nebo pro výrobu tvarově složitých nástrojů. Používá se i pro renovace součástí ve zušlechtném stavu. [14]

Nástroj se díky posuvovému mechanismu neustále přibližuje k obrobku tak, aby byla zachována konstantní vzdálenost mezi elektrodami. Nástroj do obrobku postupně vniká, čím se do něj vyhloubí jeho negativní tvar (obr. 2.28). Při hloubení musíme brát v potaz, že úběr materiálu nenastává jen na spodní straně elektrody ale také na jejích bočních stranách. Průměr vyhloubené díry nebude tedy odpovídat přesné hodnotě velikosti elektrody, ale je zvětšený o mezeru vznikající v důsledku výbojů. Mezera, která vzniká mezi nástrojem a obrobkem má konstantní velikost.



Obr. 2.28 Ukázka hloubení. [46]

Z tohoto důvodu se při hloubení čtvercového profilu v jeho rozích vždy projeví určité zaoblení (obr. 2.29). S těmito skutečnostmi je nutno počítat již při návrhu tvaru elektrody. [18, 22]

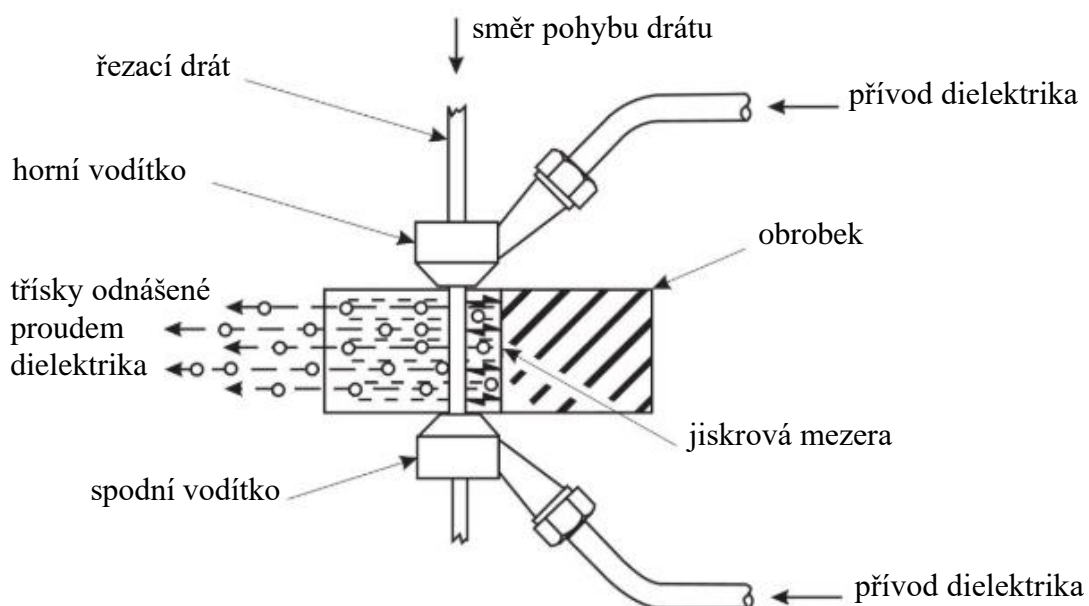


Obr. 2.29 Vliv tvaru elektrody na výsledný profil. [18]

V současnosti je běžné hloubení i složitých tvarů, jakými jsou například závity. Použitím jednoduché elektrody lze rovněž vyhloubit složité otvory (například kuželového tvaru) bez nutnosti výroby nástroje speciálního tvaru. Nástroj se v tomto případě kromě přibližování k obrobku (pohyb v ose Z) pohybuje zároveň v osách X a Y. [17, 19]

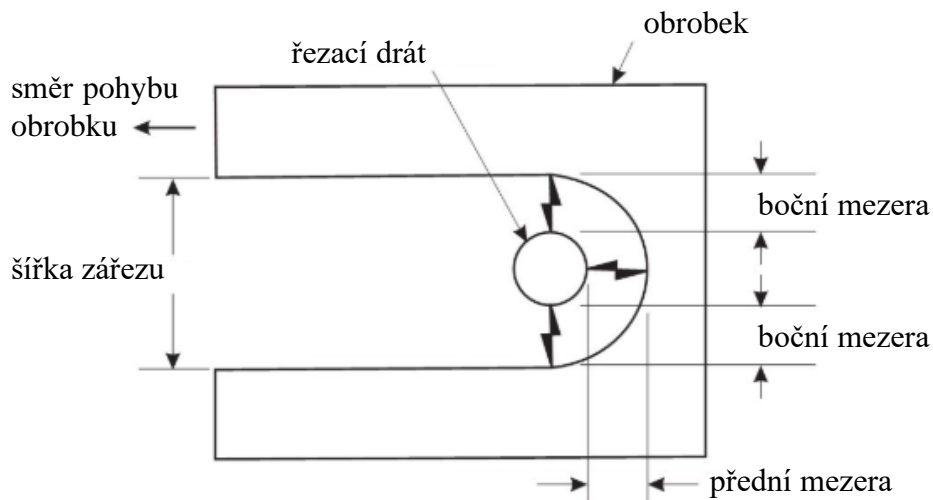
2.6.2 Elektroerozivní drátové řezání

Tato metoda se označuje zkratkou Wire EDM nebo WEDM (Wire Electrical Discharge Machining). Elektroerozivní řezání se používá nejčastěji pro výrobu plochých součástí jako jsou například střížné nástroje. Elektrodami jsou v tomto případě obrobek a řezací drát, mezi kterými dochází k výbojům. Drát je navinut na cívce, ze které se kontinuálně odvíjí přes soustavu kladek do vodiček. Princip metody je stručně popsán na obr. 2.30. Nevýhoda této metody spočívá v tom, že při nastavení nevhodných podmínek může dojít k protržení drátu. Na určitých materiálech může být stopa po protržení viditelná i pouhým okem. Takováto rýha může působit jako koncentrátor napětí a samozřejmě dochází k zhoršení kvality povrchu, která se



Obr. 2.30 Princip elektroerozivního řezání. [18]

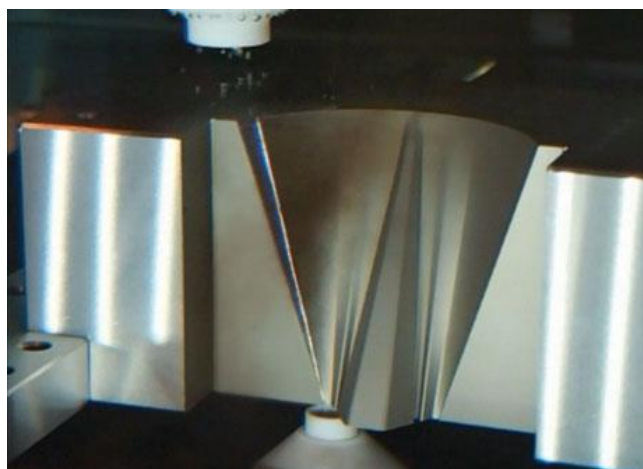
projeví hlavně v nárůstu parametru Rz. V současnosti bývají řezačky vybaveny automatickým navlékáním drátu, kterým se eliminuje nutnost ručního navlékání. Výhoda tohoto prvku se nejvíce projeví při protržení drátu v průběhu obrábění, kdy odpadá nutnost zásahu obsluhy. Stroj automaticky najede do startovacího bodu, navlékne drát a pokračuje v řezání. Navlečení se provádí proudem dielektrika, které je přiváděno přes horní vodítko. Většinou se používá deionizovaná voda nebo jiná kapalina s nízkou viskozitou, kterou lze zabezpečit spolehlivé odstranění nečistot z místa řezu. Je důležité nastavit trysky do vhodné vzdálenosti od obrobku, čím se zabezpečí ideální přítok dielektrika do místa řezu. [14, 22]



Obr. 2.31 Princip vzniku zářezu. [18]

Obrobek je upevněn na pracovním stole, který se pohybuje v osách X a Y a tím dochází k řezání cíleného tvaru. Podobně jako u hloubení, je šířka zářezu vzniklého po průchodu drátu větší než jeho průměr (obr. 2.31). Hrubování se zpravidla provádí na jeden řez. Dle požadované kvality povrchu následuje jeden nebo více dokončovacích řezů. Pokud se má řezat uzavřená kontura, je nutné v obrobku nejdříve vyrobít startovací otvor, kterým lze provléct řezací drát. Díra o průměru nejčastěji 3 mm se vyrábí za měkka konvenčními metodami obrábění nebo v zušlechťeném stavu s využitím elektroerozivního vyjiskřovacího zařízení, které může být součástí řezačky. [17, 19]

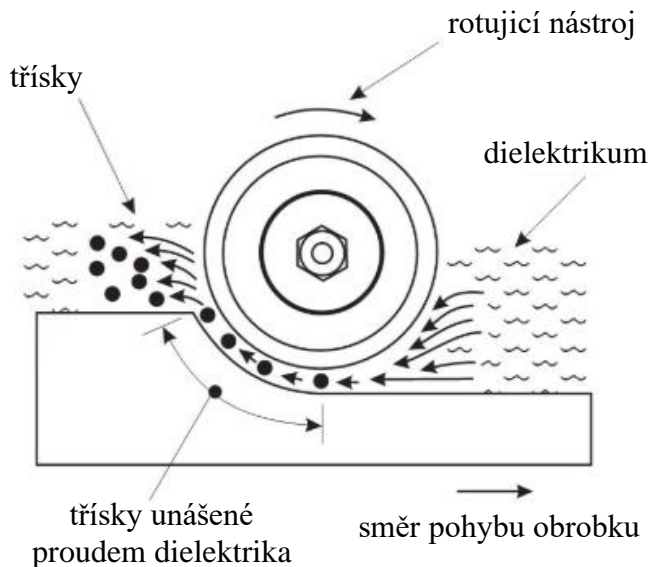
Řezání skloněných ploch se provádí vyosením vodítek, přičemž je nutno použít měkký drát, který nebude v důsledku jeho ohybu prskat (obr. 2.32). Další možností je naklopení celého systému vodítek, které je však technicky náročnější. Při řezání součástí o velkých tloušťkách se na nich může projevit určitá soudečkovitost. Důvodem je nedokonalé napnutí drátu v důsledku velké vzdálenosti vodítek. Problémy mohou vznikat taktéž v případě obrobku s proměnlivou výškou, kde se v průběhu obrábění mění podmínky proudění dielektrika. Pro zajištění vysoké přesnosti výroby je nutno udržovat jeho stabilní teplotu. [14, 22]



Obr. 2.32 Řezání skloněné plochy použitím metody vyosených vodítek. [47]

2.6.3 Elektroerozivní broušení

Tato metoda není oproti předchozím příliš rozšířená. Označuje se zkratkou EDG (z angl. Electrical Discharge Grinding). Jako nástrojová elektroda slouží rotující kotouč z mosazi nebo grafitu, který dosahuje otáček $50\text{--}100\text{ min}^{-1}$. Obrobek je upevněn na posuvném stole, přičemž je celý ponořen v dielektriku (obr. 2.33). Stůl zabezpečuje jeho posun směrem k stacionárnímu nástroji. Rotující nástroj vhání dielektrikum do jiskrové mezery, není tedy potřebný jeho přívod přes trysky. Používají se nižší hodnoty proudu, které jsou vhodné pro dokončovací operace. Použití vyšších hodnot by vedlo ke zhoršení kvality povrchu a výraznému tepelnému ovlivnění součásti. Touto metodou lze dosáhnout kvalitu povrchu až $R_a = 0,1\ \mu\text{m}$ a přesnosti $\pm 0,001\text{ mm}$. Metoda je proto vhodná pro broušení těžkoobrobitelných a křehkých materiálů s požadavkem na vysokou kvalitu. [18, 22, 48]

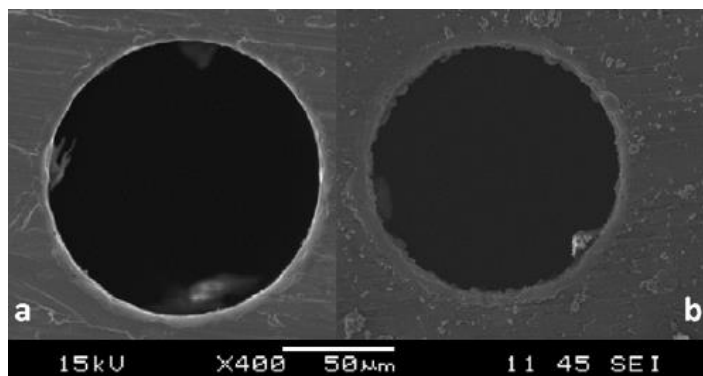


Obr. 2.33 Princip elektroerozivního broušení. [18]

2.6.4 Elektroerozivní vrtání děr

Jedná se v podstatě o hloubení tenkou, válcovou, rotující elektrodou. Neprůchozí díry se hloubí plným nástrojem. Pro průchozí díry je vhodnější použít elektrodu s otvorem. Obráběcí proces se tím urychlí z důvodu menší průřezové plochy, na které dochází k odstraňování materiálu. Oproti konvenčnímu vrtání není nástroj výrazně mechanicky namáhán. Proto je možné vyrobít díry velkých hloubek, kde by u běžného nástroje hrozilo riziko jeho zlomení. Díry přesných rozměrů se po vyhloubení musí ještě zkalibrovat novou, neopotřebenou elektrodou. [17]

Na podobném principu je založená i metoda mikroděrování, kterou se hloubí díry o malých průměrech ($0,02\text{--}1\text{ mm}$). Nástrojem je většinou tenký drátek z wolframu nebo molybdenu. Elektroda je vedena přes přípravek, který slouží k jejímu přesnému ustavení a zabraňuje jejímu zlomení nebo vybočení. Dielektrikum se do místa obrábění přivádí tryskou. Jde o velmi pomalý proces využívaný především pro speciální aplikace. Na vyvrtaných dírách se často projevuje kuželovitost vznikající v důsledku znečištění nacházejícího se v dielektriku (vysvětleno v kapitole 2.4.3). Příklad je uveden na obr. 2.34, kde je zobrazen vstupní a výstupní otvor stejné díry. Lze pozorovat, že vstupní otvor má větší průměr. Mikroděrování lze provádět také chemickým způsobem nebo pomocí laseru, ale elektroeroze je z hlediska nákladů stále nejpoužívanější metodou. [14, 49]



a – vstupní otvor, b – výstupní otvor

Obr. 2.34 Díra vyrobená elektroerozivním obráběním. [49]

V praxi může nastat situace, kdy se při konvenčním obrábění nástroj zlomí a zůstane zaseknutý v obrobku. Nejčastěji jde o vrtáky, výhrubníky a výstružníky. Problém nastává, pokud je obrobek drahý nebo obtížně nahraditelný. V takové situaci je možné zalomený nástroj odstranit elektroerozivním vyjiskřovacím zařízením. Jde o přenosný hloubicí stroj, který se umísťuje přímo na obrobek. Nástrojová elektroda má tvar trubičky. Velikost jejího průměru se volí mírně větší, než je průměr jádra zalomeného nástroje. Jádro se hloubením odstraní, díky čemu se nástroj rozpadne na části, které jdou následně snadno vyjmout. Jako dielektrikum slouží kapaliny běžně používané při elektroerozivním vrtání. [50]

2.6.5 Anodomechanické obrábění

Anodomechanické obrábění funguje na principu kombinace účinků elektrické eroze a elektrolytického rozpouštění materiálu obrobku. Nástrojem bývá rotující kotouč z oceli nebo litiny, který je připojen na záporný pól stejnosměrného napětí a mírně přitlačován k obrobku. Mezi nástroj a obrobek se přivádí elektrolyt (křemičitan sodný), který zabraňuje vzájemnému styku obou elektrod vytvořením pasivační vrstvy. Obvodová rychlost kotouče dosahuje hodnot 8–12 m.s⁻¹. Touto metodou lze dosáhnout povrch s kvalitou Ra = 12,6 μm. Metoda je kvůli dosahované nízké přesnosti a špatné kvalitě povrchu vhodná pro dělení těžkoobrobitelných polotovarů, odřezávání nálitků, nebo pro jiné technicky nenáročné aplikace. [19]

2.7 Bezpečnost

Elektroerozivní obrábění se zařazuje mezi celkem bezpečné metody obrábění. V pracovním prostoru stroje se většinou nenachází rotující nástroj nebo obrobek, a nedochází k dynamickému odlétávání třísek z obrobku. Riziko úrazu elektrickým proudem je oproti jiným metodám rovněž nižší, protože se zde pracuje s nízkými hodnotami napětí. Největším nebezpečím je riziko vzniku požáru. Důvodem bývá použití nevhodného typu dielektrika, které má nízký bod vzplanutí. V rámci prevence se na stroje umísťují čidla, které obráběcí proces při dosažení nevyhovujících podmínek přeruší. Stroje jsou rovněž často vybaveny automatickým hasicím zařízením. [22]

Při obrábění mohou v důsledku zahřívání dielektrika nebo při reakci materiálu nástroje a obrobku vznikat škodlivé výpary (tab. 2.5). Jejich množství je závislé na viskozitě dielektrika. Kapalina s nízkou viskozitou tvoří výparů méně. Kromě vzniku plynů může docházet k rozkladu obráběných kovových materiálů. Produktem mohou být těžké kovy nebo karcinogenní látky. Nahromadění vodíku v uzavřeném prostoru může velice snadno způsobit výbuch. Kontakt dielektrika s kůží nebo očima pracovníka může způsobit kožné nebo jiné problémy. Míra nebezpečí závisí od složení použité kapaliny. V rámci ochranných opatření se používají odsávací zařízení nebo ochranné pomůcky pro pracovníky. [18, 22]

Tab. 2.5 Vedlejší produkty vznikající při elektroerozivním obrábění. [18, 22]

| Dielektrikum na bázi: | Vedlejší produkty |
|---|---|
| minerální oleje nebo organické sloučeniny | minerální páry a aerosoly |
| | benzeny |
| | polycyklické aromatické uhlovodíky |
| | vedlejší produkty vzniklé rozkladem olejů |
| vodní roztok | oxid uhelnatý |
| | oxid dusný |
| | ozon |
| | vodík |

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato kapitola se zabývá experimentem, který byl proveden na základě požadavků firmy PENTA TRADING. Tato firma úzce spolupracuje s podniky, které se zabývají výrobou komponentů do leteckých motorů. I z tohoto důvodu byl pro experiment zvolen materiál NIMONIC 263. Úkolem bylo zjistit, zda lze zadaný materiál efektivně obrábět pomocí elektroeroze, a za jakých podmínek. Hlavním cílem bylo dosažení určené kvality povrchu pomocí různých technologií a materiálů nástroje. Kromě určení nejvhodnějších podmínek se posuzovala rovněž míra kontaminace povrchové vrstvy základního materiálu v důsledku obráběcího procesu. Experiment se prováděl na elektroerozivní drátové řezačce značky FANUC, v prostorách nově vzniklé brněnské pobočky firmy (obr. 3.1).

Společnost PENTA TRADING působí v oblasti elektroerozivního obrábění od roku 1991. Za tuto dobu se z ní stal největší dodavatel elektroerozivních strojů a příslušenství v České a Slovenské republice. Firma má několik poboček v obou zmiňovaných státech. Jejím hlavním zaměřením je kompletní servis týkající se prodeje elektroerozivních strojů, od objednávky stroje a příslušenství až po zaškolení obsluhy. Kromě nabídky strojů značek FANUC nebo EXERON se firma může pyšnit elektroerozivními hloubicími stroji vlastní výroby. Zajímavá je určitě nabídka repasování starších elektroerozivních strojů, čím lze dosáhnout kvalitní stroj za nižší pořizovací náklady. Portfolio firmy doplňuje široká nabídka spotřebního materiálu zahrnující řezací dráty, hloubicí elektrody, grafit, a mnoho dalšího. V nabídce je také zakázkové obrábění na firemních strojích. [51]



Obr. 3.1 Brněnská pobočka firmy PENTA TRADING. [52]

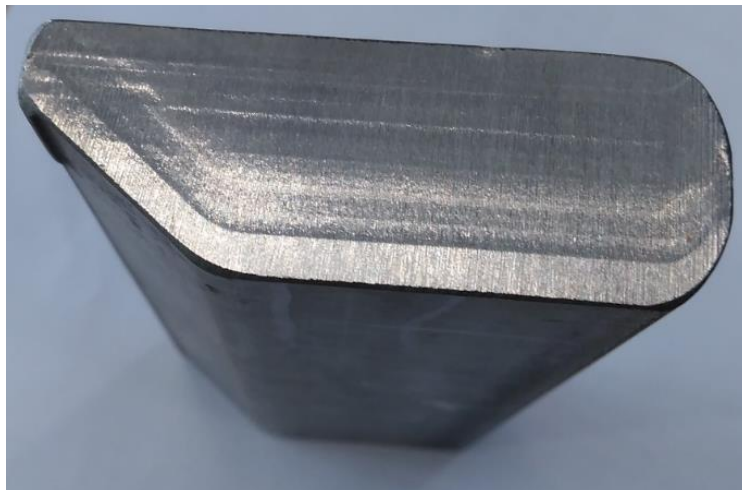
3.1 Materiál

Jako materiál pro experimentální část byla zvolena slitina na bázi niklu známá pod obchodním názvem NIMONIC 263. Z dalších prvků jsou ve složení nejvýrazněji zastoupeny chrom, kobalt a molybden. Tento materiál byl vyvinut v roce 1971 firmou Rolls-Royce Ltd., s cílem nahradit materiál NIMONIC 80A slitinou s lepšími vlastnostmi. Chemické složení této slitiny je uvedeno v tab. 3.1. [53]

Tab. 3.1 Chemické složení slitiny NIMONIC 263. [53]

| Prvek | Obsah [%] | Prvek | Obsah [%] | Prvek | Obsah [%] |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|------------|
| Ni | báze | Al | max 0,6 | Ag | max 0,0005 |
| Cr | 19–21 | Mn | max 0,6 | Bi | max 0,0001 |
| Co | 19–21 | Si | max 0,4 | | |
| Mo | 5,6–6,1 | Cu | max 0,2 | | |
| Ti | 1,9–2,4 | S | max 0,007 | | |
| C | 0,04–0,08 | B | max 0,005 | | |
| Fe | max 0,7 | Pb | max 0,002 | | |

Uvedený materiál se vyznačuje vysokou odolností proti korozi a oxidaci za vysokých teplot, dobrou tažností, tvářitelností i svařitelností. Svařování je vhodné provádět metodou TIG nebo MIG za použití argonu jako ochranné atmosféry. Materiál v žíhaném stavu se vyznačuje vysokou tažností, díky čemuž lze tvářet za tepla i za studena. Slitina NIMONIC 263 si zachovává vysokou pevnost i za vysokých teplot. Spolu s nízkou tepelnou vodivostí tohoto materiálu to vede k jeho špatné obrobitelnosti konvenčními metodami. Tento materiál je běžně dostupný ve formě plechů i tyčí. Jeho další vlastnosti jsou shrnuty v tab. 3.2. Hodnoty jsou uvedeny při teplotě 20 °C pro precipitačně vytvrzenou slitinu (kromě teplot solidu a likvidu). [54, 55]



Obr. 3.2 Polotovár určený pro experiment.

Na obr. 3.2 je zobrazen řez polotovarem, který byl použit pro experiment. Jedná se o těleso s nepravidelným tvarem průřezu stříbrné barvy.

Tab. 3.2 Vybrané vlastnosti slitiny NIMONIC 263. [54]

| Materiál | Hustota | Teplota solidu | Teplota likvidu | Mez kluzu | Mez pevnosti | Tepelná vodivost |
|-------------|-----------------------|----------------|-----------------|-----------|--------------|---------------------------------------|
| | [g.cm ⁻³] | [°C] | [°C] | [MPa] | [MPa] | [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] |
| NIMONIC 263 | 8,36 | 1300 | 1355 | 550 | 940 | 11,7 |

3.1.1 Určení chemického složení vzorku

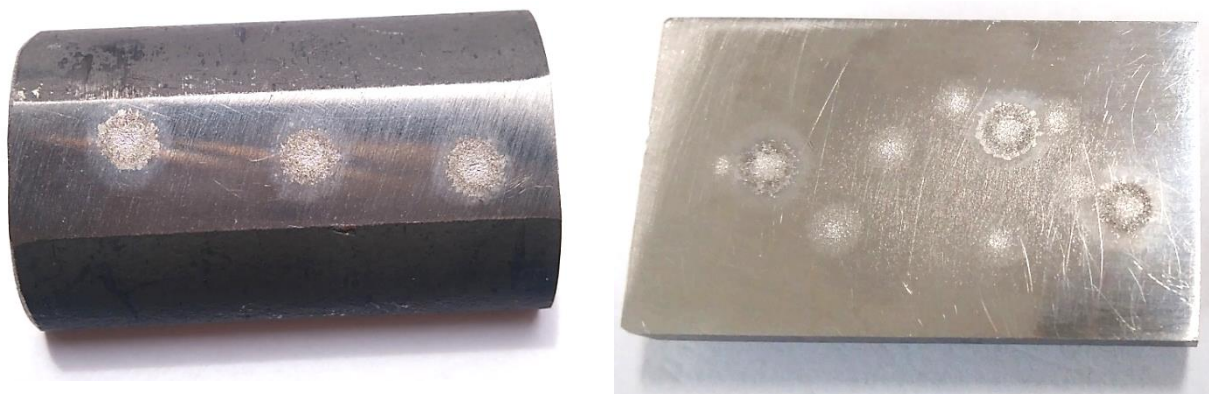
Z polotovaru byl uříznut vzorek o maximálních rozměrech 43×25×10 mm. Protože se jednalo o krajní část polotovaru, která má zaoblený tvar, byla na této části vybroušena ploška (obr 3.4 vlevo), která zajišťuje stabilitu vzorku. Plochy určené pro měření byly před měřením obroušeny z důvodu odstranění povrchových nečistot, které by mohly zkreslit výsledky měření.

Měření chemického složení bylo provedeno na spektrometru PMI-Master Pro2 (obr. 3.3). Jde o mobilní opticko-emisní spektrometr určený pro analýzu chemického složení kovů. Měření se provádí v ochranné atmosféře (v tomto případě argon) pomocí jiskrové sondy. Prostřednictvím vysokonapěťového impulsu dojde k natavení povrchu zkoumaného materiálu a jeho vypaření. Následně přístroj vyhodnotí složení materiálu z uvolněných par. [55]



Obr. 3.3 Spektrometr PMI-Master Pro2. [55]

Měření bylo provedeno celkem 10krát, z toho 7 měření bylo provedeno na ploše vzniklé po odříznutí vzorku a tři měření na zbrošené plošce na zaoblené části. Na obr. 3.4 jsou viditelné stopy vzniklé po měření v podobě malých kráterů. Naměřené hodnoty jednotlivých prvků jsou uvedeny v tab. 3.3.



vlevo – zbrošená ploška na zaoblené části polotovaru, vpravo – plocha vzniklá odříznutím vzorku

Obr. 3.4 Vzorek s viditelnými stopami vzniklými po měření chemického složení.

Tab. 3.3 Chemické složení vzorku.

| Obsah prvku [%] | Číslo měření | | | | | | | | | | Průměr |
|-----------------|--------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| Ni | 48,00 | 50,40 | 50,00 | 49,00 | 52,60 | 48,10 | 48,90 | 52,40 | 49,70 | 51,50 | 50,06 |
| Cr | 9,63 | 11,70 | 10,50 | 12,20 | 13,70 | 8,76 | 11,30 | 17,10 | 14,20 | 13,80 | 12,29 |
| Co | >22,0 | >22,0 | >22,0 | >22,0 | >22,0 | >22,0 | >22,0 | >22,0 | >22,0 | >22,0 | >22,0 |
| Mo | 4,17 | 3,77 | 5,98 | 4,88 | 4,91 | 4,81 | 4,52 | 2,48 | 4,90 | 5,68 | 4,61 |
| Ti | 1,84 | 0,22 | 2,01 | 1,82 | 1,11 | 1,41 | 1,77 | 0,36 | 0,26 | 1,29 | 1,21 |
| C | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |
| Fe | 0,40 | 0,43 | 0,40 | 0,37 | 0,36 | 0,34 | 0,34 | 0,38 | 0,36 | 0,36 | 0,37 |
| Al | 0,57 | 0,56 | 0,56 | 0,51 | 0,56 | 0,53 | 0,53 | 0,43 | 0,54 | 0,57 | 0,54 |
| Mn | 0,24 | 0,19 | 0,20 | 0,20 | 0,18 | 0,18 | 0,17 | 0,17 | 0,19 | 0,18 | 0,19 |
| Si | 0,42 | 0,72 | 0,27 | 0,38 | 0,50 | 0,51 | 0,35 | 0,69 | 0,45 | 0,33 | 0,46 |
| Cu | 0,65 | 0,79 | 0,19 | <0,005 | 1,50 | 1,39 | 2,18 | 2,07 | <0,005 | 2,66 | 1,43 |

Z porovnání tab. 3.1 a tab. 3.3 je patrné, že zjištěné chemické složení vzorku nekorresponduje s údaji uvedenými v materiálovém listu. Důvodem může být příliš velká odchylka měření nebo chyba v nastavení měřícího zařízení. Materiál mohl být určitým způsobem ovlivněn nebo mohlo dojít k jeho záměně. Předchozí manipulace nebo operace, které byly s materiálem prováděny nejsou známy. Rovněž není známo zda, a jak bylo provedeno tepelné zpracování materiálu. Ve všech měřeních bylo ve slitině zjištěno procentuální zastoupení niklu v rozmezí 48–52,6 %. Lze tedy jednoznačně prohlásit, že jde o slitinu na bázi niklu.

3.2 Použitý stroj

Experiment byl proveden na elektroerozivní drátové řezačce FANUC ROBOCUT α -C600iB (obr. 3.5). Jde o univerzální stroj japonské výroby, který lze použít na většinu běžných aplikací. Stroj má střední velikost a vyznačuje se vysokou přesností a rychlostí řezání. Je vybaven automatickým navlékáním drátu proudem dielektrika. Jako dielektrická kapalina se používá deionizovaná voda. Technické parametry tohoto stroje jsou uvedeny v tab. 3.4.

Tab. 3.4 Technické parametry stroje FANUC ROBOCUT α -C600iB. [56]

| | |
|----------------------------|-------------------------|
| Maximální rozměry obrobku | 1050×820×300 mm |
| Maximální hmotnost obrobku | 1000 kg |
| Pojezd v ose X a Y | 600×400 mm |
| Pojezd v ose Z | 310 mm |
| Pojezd v ose U a V | 200×200 mm |
| Maximální úhel řezu | $\pm 30^\circ$ / 150 mm |
| Minimální krok pohonu | 0,0001 mm |
| Průměr řezacího drátu | 0,10–0,30 mm |
| Maximální hmotnost drátu | 16 kg |
| Půdorys (Š/H) | 2440×2680 mm |
| Přibližná hmotnost stroje | 3000 kg |



Obr. 3.5 Elektroerozivní drátová řezačka FANUC ROBOCUT α -C600iB.

3.3 Příprava vzorků pro experiment

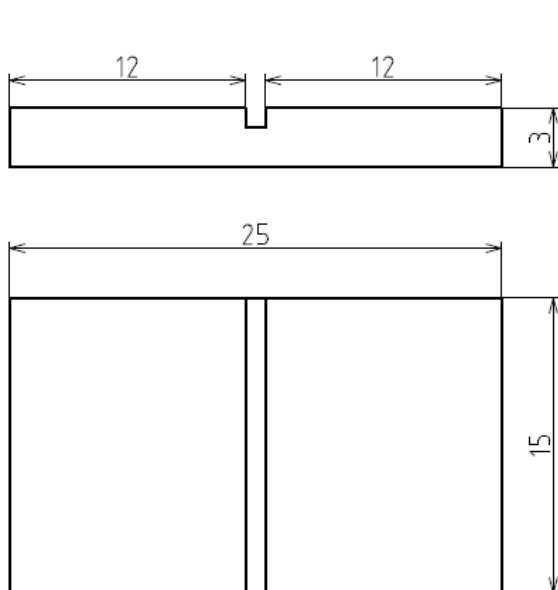
Hlavním cílem provedeného experimentu bylo dosažení zadané kvality povrchu pomocí různých technologií. Byly zvoleny dvě hodnoty kvality povrchu, konkrétně $Ra = 2,9 \mu\text{m}$ a $Ra = 0,5 \mu\text{m}$. Pro každou z těchto hodnot byly určeny tři rozdílné technologie, které by měly vést k jejímu dosažení. Dalším důležitým faktorem, který se v průběhu experimentu měnil, byl materiál řezacího drátu. Důvodem bylo určení míry kontaminace povrchové vrstvy základního materiálu v důsledku obráběcího procesu. Každá technologie tak byla provedena třemi řezacími dráty z rozdílného materiálu (kapitola 3.3.2). Z důvodu velikosti vzorků, která je vhodná pro zpracování výsledků byl experiment rozdělen na dvě části. V první části experimentu byly každou technologií řezány plochy o velikosti $15 \times 12 \text{ mm}$. Výsledky dosažené na těchto vzorcích byly posuzovány z hlediska:

- počtu protržení drátu ke kterým došlo v průběhu řezání,
- rychlosti řezání,
- spotřeby drátu.

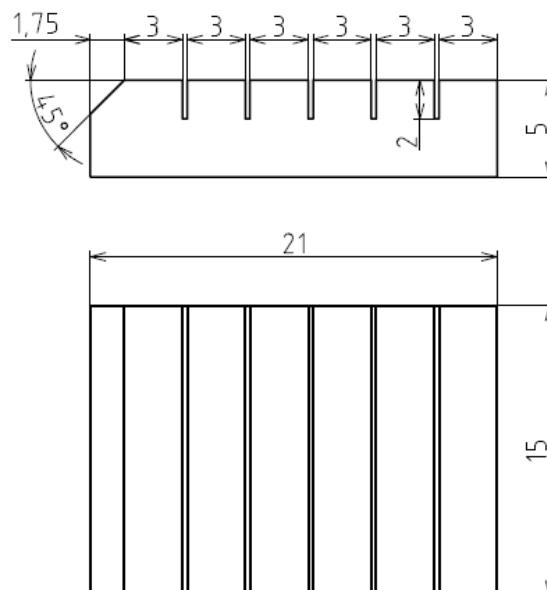
Tato část experimentu byla provedena jako první, z důvodu posouzení vhodnosti daných technologií pro řezání zadaného materiálu. Velikost vzorků byla zvolena z důvodu delší dráhy řezu, na které jde lépe zhodnotit, zda vznikají problémy s trháním drátu. Rovněž rychlost řezání a spotřebu drátu lze přesněji určit na delším řezu. Vzorek má tvar desky o rozměrech $25 \times 15 \text{ mm}$ (obr. 3.6). Na každé desce byly provedeny dva řezy o délce 12 mm. Důvodem je skutečnost, že technologie pro dosažení kvality povrchu $Ra = 0,5 \mu\text{m}$ byly prováděny na tři řezy. Tato plocha byla řezána jako první. Následně byla provedena jednořezová technologie s požadovanou kvalitou povrchu $Ra = 2,9 \mu\text{m}$, čímž byl proveden druhý řez a vzorek se tak oddělil od základního materiálu. Každým drátem byly vyrobeny celkem tři desky se dvěma řezy. Výsledky dosažené v druhé části experimentu byly posuzovány z hlediska:

- dosažení zadané kvality povrchu,
- kontaminace základního materiálu.

Pro tuto část experimentu byl zvolen tvar vzorku o menších rozměrech, který se lépe zpracovává na různých měřicích zařízeních (obr. 3.7). Vzorek má tvar destičky, na které je



Obr. 3.6 Vzorek pro první část experimentu.



Obr. 3.7 Vzorek pro druhou část experimentu.

zhotoveno šest menších plošek, z toho tři hrubovacími technologiemi a další tři dokončovacími technologiemi. Na jedné straně desky byla sražena hrana, aby bylo možné lehce identifikovat, z které strany byly plošky postupně řezány a nedošlo k jejich záměně. Každým drátem byla vyřezána jedna taková destička. Zářezy vyskytující se na obou typech vzorků slouží pro jednoznačné oddělení jednotlivých ploch. Bylo kladen důraz na to, aby vzorky řezané v obou částech experimentu měly stejnou tloušťku (15 mm).

3.3.1 Volba technologie

Všechny uvedené technologie byly nastaveny na základě doporučených parametrů výrobce stroje a po konzultaci s vysoce kvalifikovanou obsluhou zařízení. Pro zadanou hodnotu kvality povrchu $R_a = 2,9 \mu\text{m}$ (v dalších částech experimentu označovanou jako hrubování) byly zvoleny tři technologie, které byly označeny H1, H2 a H3. Parametry jednotlivých technologií jsou uvedeny v tab. 3.5. Všechny technologie byly provedeny na jeden řez. Zkratky použité v tabulkách jsou vysvětleny ve spodní části této strany.

Tab. 3.5 Technologie pro dosažení kvality povrchu $R_a = 2,9 \mu\text{m}$.

| Označení | NUM | ON | OFF | SV | T | WF | FR |
|----------|-----|-------------------|-------------------|-----|------|------------------------------------|-------|
| | [-] | [μs] | [μs] | [V] | [gf] | [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$] | [bar] |
| H1 | 1 | 2 | 41 | 5 | 1700 | 10 | 12 |
| H2 | 1 | 3 | 23 | 26 | 1700 | 10 | 10 |
| H3 | 1 | 2 | 35 | 4 | 1400 | 10 | 12 |

Pro plochy s požadovanou kvalitou povrchu $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ (v dalších částech experimentu označovanou jako dokončování) byly zvoleny technologie, které sestávají ze tří řezů. Jednotlivé technologie, které byly označeny D1, D2 a D3 jsou uvedeny v tab. 3.6.

Tab. 3.6 Technologie pro dosažení kvality povrchu $R_a = 0,5 \mu\text{m}$.

| Označení | NUM | ON | OFF | SV | T | WF | FR |
|----------|-----|-------------------|-------------------|-----|------|------------------------------------|-------|
| | [-] | [μs] | [μs] | [V] | [gf] | [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$] | [bar] |
| D1 | 1 | 2 | 41 | 5 | 1700 | 10 | 12 |
| | 2 | 6 | 40 | 43 | 2000 | 12 | 2 |
| | 3 | 4 | 0,2 | 8 | 1500 | 12 | 2 |
| D2 | 1 | 4 | 20 | 10 | 1700 | 10 | 15 |
| | 2 | 8 | 15 | 57 | 2200 | 11 | 2 |
| | 3 | 5 | 0,2 | 55 | 2200 | 13 | 2 |
| D3 | 1 | 2 | 35 | 7 | 1300 | 12 | 16 |
| | 2 | 8 | 40 | 63 | 1900 | 12 | 2 |
| | 3 | 4 | 0,2 | 8 | 1500 | 12 | 2 |

NUM – číslo označující pořadí řezu v dané technologii

ON – doba trvání impulsu

OFF – doba pauzy mezi impulsy

SV – servo napětí

T – napnutí drátu

WF – rychlost odvinu drátu

FR – tlak výplachu dielektrika

3.3.2 Volba řezacího drátu

Jedním ze základních cílů experimentu bylo zjištění míry kontaminace povrchové vrstvy základního materiálu v důsledku obráběcího procesu. Z tohoto hlediska byly zvoleny tři dráty, kterými bylo provedeno řezání vždy za stejných podmínek. Jako první byl vybrán drát PENTA CUT P. Jde o univerzální mosazný drát bez speciálního povlaku. Je vhodný pro řezání většiny materiálů s uspokojivými výsledky. Jako druhý byl zvolen drát TOPAS PLUS D, který má mosazné jádro, na kterém je dvojitý povlak z mosazi s vysokým podílem zinku. Tento drát by měl poskytnout vyšší rychlost řezání. Jako třetí byl vybrán drát s mosazným jádrem a speciálním zinkovým povlakem COBRACUT TYPE A. Jde o běžně používaný drát, který je vhodný pro řezání s vysokou kvalitou povrchu a rozměrovou přesností. Všechny tři dráty jsou zobrazeny na obr. 3.8. Jejich základní vlastnosti jsou shrnuty v tab. 3.7. Pro lepší přehlednost v rámci celého experimentu byly dráty označeny písmeny A, B, a C. Kromě kontaminace základního materiálu byl posuzován rovněž vliv materiálu řezacího drátu na rychlost řezání a kvalitu obrobeneho povrchu. [57, 58, 59]

Tab. 3.7 Parametry drátů, které byly použity v experimentu. [57, 58, 59]

| Označení v experimentu | A | B | C |
|------------------------|---------------|--|-----------------|
| Název | PENTA CUT – P | TOPAS PLUS D | COBRACUT TYPE A |
| Výrobce | PENTA TRADING | bedra | bedra |
| Materiál jádra | mosaz | CuZn20 | CuZn36 |
| Povlak | – | dvojitá mosazná vrstva s vysokým podílem zinku | zinek |
| Barva | zlatá | tmavě hnědá | stříbrná |
| Průměr drátu [mm] | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| Pevnost drátu [MPa] | 900 | 800 | 900 |
| Hmotnost cívky [kg] | 8 | 8 | 8 |



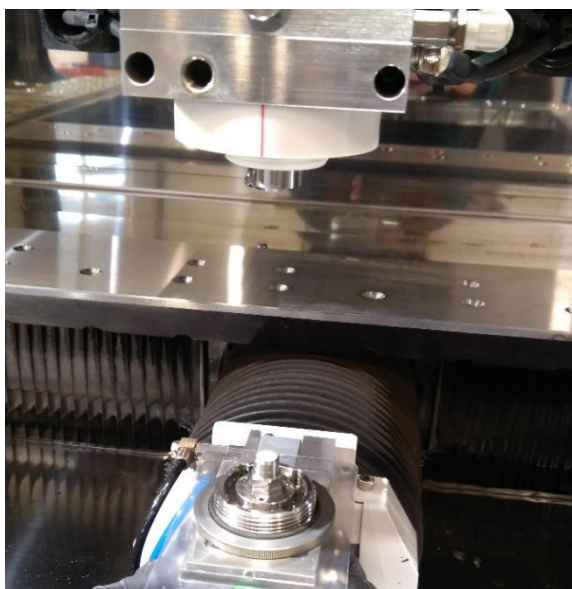
zleva: A – mosazný drát, B – povlakovaný mosazný drát, C – pozinkovaný drát

Obr. 3.8 Řezací dráty, které byly použity pro experiment.

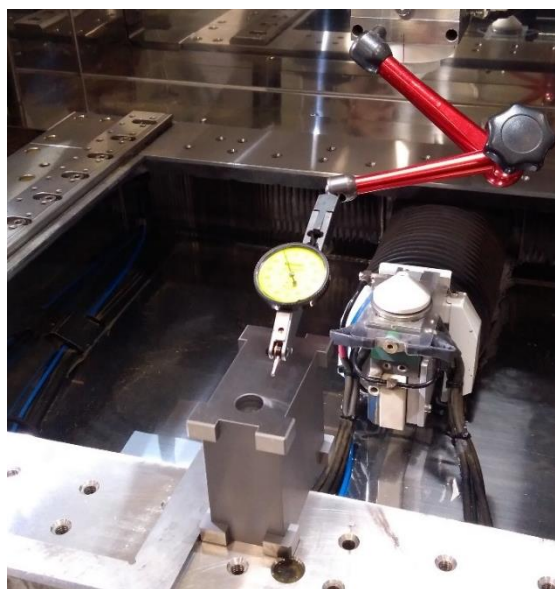
3.3.3 Příprava stroje

Před samotným řezáním vzorků bylo potřebné připravit stroj pro experiment. Kvalifikovaná obsluha provedla kontrolu funkčnosti všech prvků drátové rezačky. Jako první bylo nutno vyměnit trysky na horním a spodním vodítku, protože před tímto experimentem byl na stroji používán drát jiného průměru. Na stroj byly namontovány trysky určené pro průměr drátu 0,25 mm a nasazeny krytky vhodné velikosti (obr. 3.9).

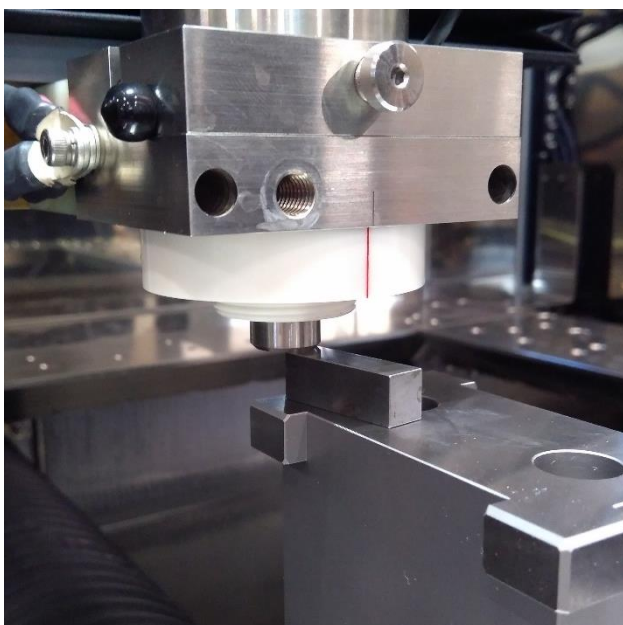
Po výměně trysek bylo nutno provést vertikální kalibraci vodítek. Pro tento účel byla použita kalibrační kostka, která byla umístěna na pracovní stůl. Po zkorigování její polohy pomocí přesného úhelníku (obr. 3.10) byla kostka zabezpečena proti pohybu dotažením. Následně byl pomocí dotykového číselníkového úchylkoměru změřen rozdíl úchylek mezi přední a zadní



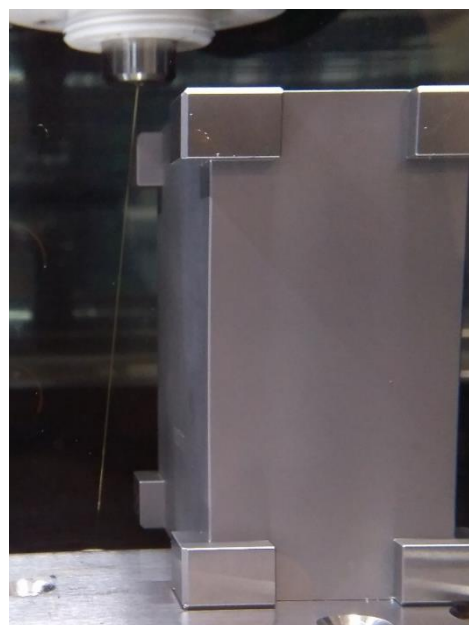
Obr. 3.9 Výměna spodní trysky.



Obr. 3.10 Ustavení polohy kalibrační kostky.



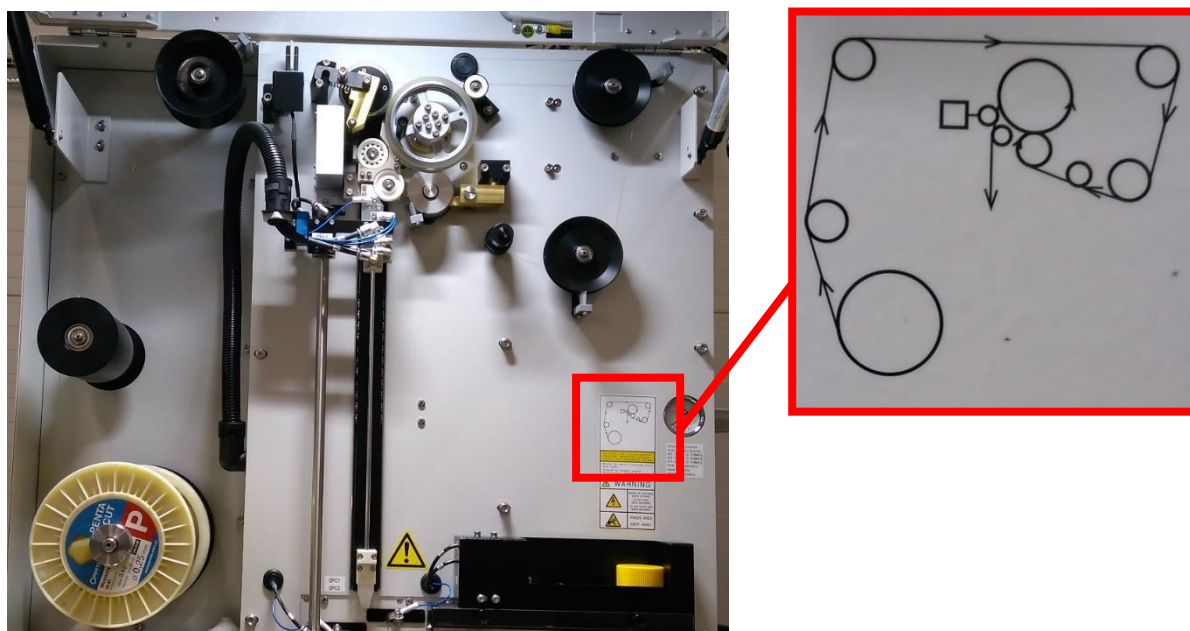
Obr. 3.11 Detail nastavení vzdálenosti mezi vrchní tryskou a kalibrační kostkou.



Obr. 3.12 Detail dotyku řezacího drátu a kalibrační kostky.

části vrchní plochy kostky. Změřené hodnoty byly zapsány do systému obráběcího stroje. Stejný postup byl zopakován z boční strany kostky. Vrchní tryska byla následně přesunuta do výšky 10 mm nad kalibrační kostku. Tato vzdálenost byla kontrolována měřícím hranolem s přesnými rozměry (obr. 3.11). Poloha osy Z byla zapsána do systému stroje. Vodítka byla následně přemístěna do prostoru mimo kalibrační kostku, kde mohlo být provedeno navlečení řezacího drátu. Následně bylo možné spustit kalibraci, kterou stroj provádí samostatně. Pracovní vana byla napuštěna dielektrikem a drát se v určených místech postupně přibližoval ke kostce, přičemž systém vždy zaznamenal polohu vodiček v okamžiku dotyku kostky a drátu (obr. 3.12). Uvedený postup proběhl několikrát z boční i zadní strany kostky. Na základě zjištěných dat stroj samostatně zkorigoval vzájemnou polohu vodiček.

Po kalibraci stroje mohl být navlečen drát určený pro řezání prvních vzorků. Drát je veden přes systém kladek (obr. 3.13). Cívka byla usazena na držák a zabezpečena maticí. Drát byl následně navlečen podle schéma, které je vždy uvedeno na daném stroji. První navlečení bylo provedeno až do spodního vodička, přičemž bylo odvinuto a odstříhnuo několik prvních metrů drátu, které se mohly zdeformovat v průběhu navlékání. Napnutí drátu zabezpečuje brzda, která se nastavuje na základě aktuální hmotnosti cívky.



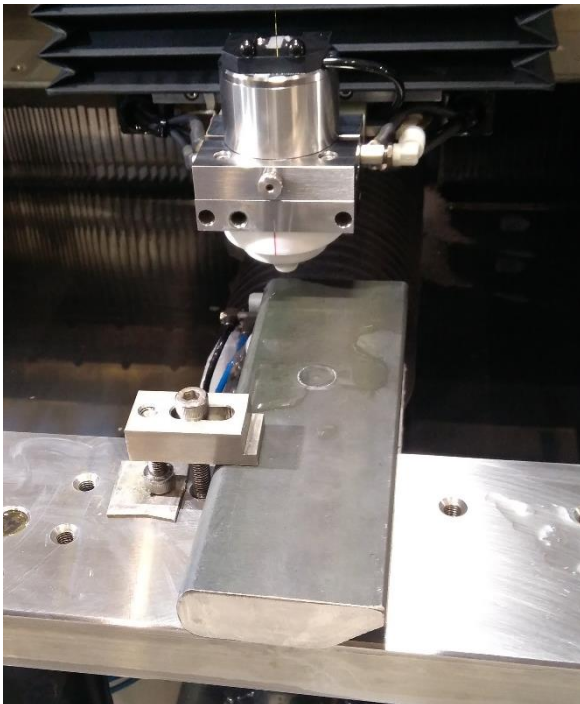
Obr. 3.13 Systém kladek, přes které je veden drát a schéma pro jeho navlečení.

3.4 Zpracování vzorků

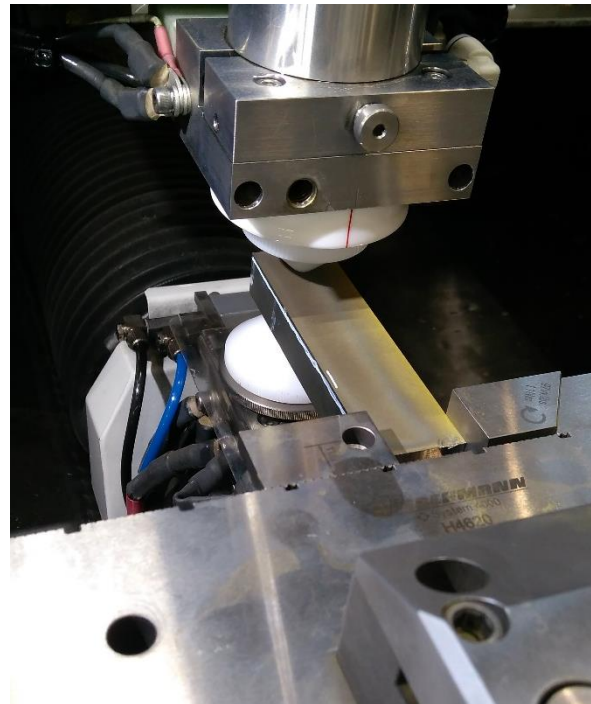
Ze základního materiálu bylo nejdříve nutno odříznout menší část, ze které se pak řezaly jednotlivé vzorky. Polotovár byl umístěn na pracovní stůl a upnut pomocí upínky (obr. 3.14). Následně z něj byl vyříznut kvádr o rozměrech 15×25×100 mm. Rozměry byly zvoleny tak, aby z něj bylo možné řezat vzorky pro první i druhou část experimentu. Kvalita provedení řezu ani jeho rychlost v tomto případě nebyly podstatné. Pro řezání byla zvolena technologie, která se běžně používá pro řezání nástrojové oceli.

Kvádr, který byl vyříznut ze základního materiálu byl vložen mezi čelisti upínače tak, aby tloušťka řezu byla 15 mm. Upínač je vybaven dvěma čelistmi. Levá slouží pro nastavení šířky upnutí, pravá je určena k dotažení, čím se docílí pevného upnutí vzorku. Následně byl upínač spolu s materiálem upevněn na pracovní stůl drátové řezačky. Pomocí dotykového číselníkového úchylkoměru bylo zkontrolováno vyrovnaní kvádrů ve všech směrech.

Vyrovnaní bylo provedeno stavěcími šrouby, které jsou součástí upínače. Hlavním důvodem bylo zabránění kontaktu trysky a obrobku v průběhu řezání. Následně byl řezací drát odstříhnut a materiál byl umístěn do polohy mezi tryskami (obr. 3.15). Postupným přibližováním (stejně jako v případě kalibrace) byla vrchní i spodní tryska umístěna do vzdálenosti 0,2 mm od obrobku. Vzdálenost byla kontrolována spárovou měrkou. Po nastavení vzdálenosti byl materiál přemístěn do místa mimo trysky a proběhlo navlečení řezacího drátu. Do stroje byl nahrán předem připravený program a proběhlo nastavení požadované technologie. Nakonec proběhlo určení nulového bodu, do pracovní vany bylo napuštěno dielektrikum a bylo provedeno samotné řezání vzorků. Těsně před ukončením každého řezu byl chod stroje pozastaven a vzorek odebrán, aby nedošlo k jeho znehodnocení při oddělení od základního materiálu a následném upadnutí do pracovní vany.



Obr. 3.14 Řezání polotovaru.



Obr. 3.15 Řezání vzorků.

3.5 Vyhodnocení naměřených dat

Každý ze dvou typů vzorků byl vyhodnocován z hlediska jiných parametrů. Nejprve bylo provedeno celkové zhodnocení vhodnosti použitých technologií a drátů pro řezání materiálu NIMONIC 263. Výsledky z této části jsou uvedeny v kapitole 3.5.1. Následně byla posouzena kvalita povrchu, kterou lze jednotlivými kombinacemi vstupních parametrů dosáhnout, a taky jejich vliv na změnu chemického složení základního materiálu. Výsledky z druhé části experimentu jsou shrnuty v kapitolách 3.5.2 a 3.5.3.

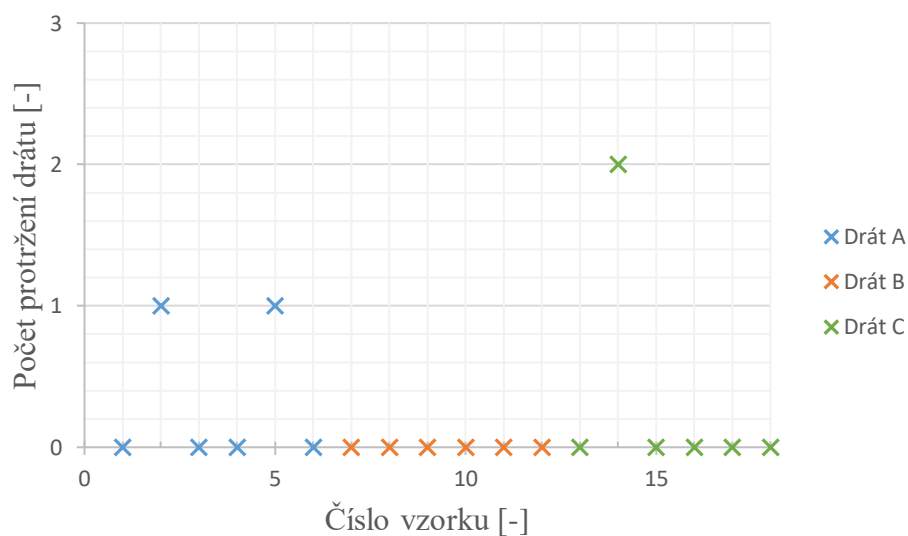
3.5.1 Celkové posouzení jednotlivých technologií

V první části experimentu proběhlo vyhodnocení vzorků s plochou řezu o velikosti 15×12 mm. Tyto vzorky byly označeny čísly 1/1 až 1/18. U každého vzorku byl v průběhu řezání zaznamenán počet protržení drátu, celkový čas řezání a spotřeba řezacího drátu. Rychlost řezání byla vypočtena z celkového času, který byl potřebný pro provedení řezu délky 12 mm. Výsledky z jednotlivých měření jsou uvedeny v tab. 3.8, přičemž rychlost i spotřeba drátu jsou vztaženy na 1 mm délky řezu. Pro lepší přehlednost byly naměřené výsledky graficky zpracovány (obr. 3.16, obr. 3.17 a obr. 3.18).

Tab. 3.8 Data naměřena v první části experimentu.

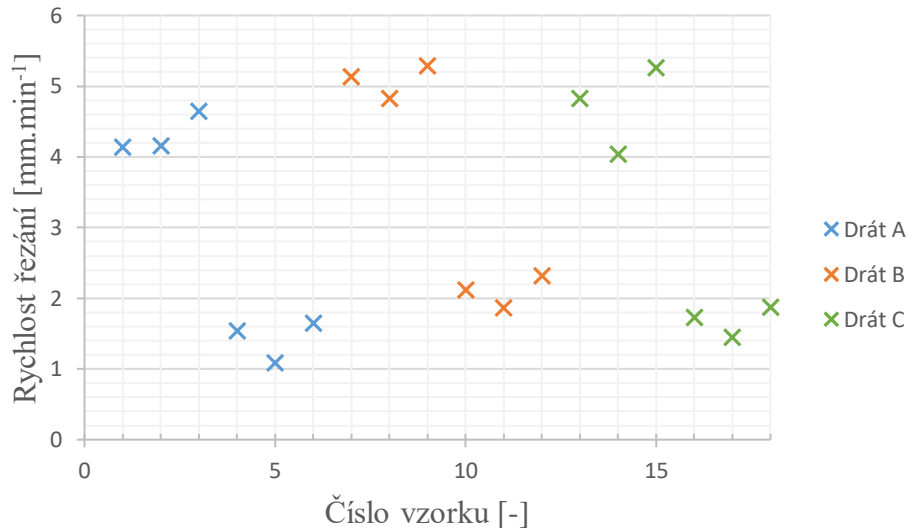
| Označení vzorku | Použitý drát | Použitá technologie | Počet protržení | Čas řezání | Rychlost řezání | Spotřeba drátu |
|-----------------|--------------|---------------------|-----------------|------------|-------------------------|-----------------------|
| | | | [-] | [s] | [mm.min ⁻¹] | [m.mm ⁻¹] |
| 1/1 | A | H1 | 0 | 174 | 4,14 | 2,50 |
| 1/2 | | H2 | 1 | 173 | 4,16 | 2,83 |
| 1/3 | | H3 | 0 | 155 | 4,65 | 2,33 |
| 1/4 | | D1 | 0 | 467 | 1,54 | 7,67 |
| 1/5 | | D2 | 1 | 663 | 1,09 | 11,17 |
| 1/6 | | D3 | 0 | 437 | 1,65 | 7,75 |
| 1/7 | B | H1 | 0 | 140 | 5,14 | 1,92 |
| 1/8 | | H2 | 0 | 149 | 4,83 | 2,17 |
| 1/9 | | H3 | 0 | 136 | 5,29 | 2,00 |
| 1/10 | | D1 | 0 | 340 | 2,12 | 5,67 |
| 1/11 | | D2 | 0 | 385 | 1,87 | 6,58 |
| 1/12 | | D3 | 0 | 311 | 2,32 | 5,67 |
| 1/13 | C | H1 | 0 | 149 | 4,83 | 2,17 |
| 1/14 | | H2 | 2 | 178 | 4,04 | 3,50 |
| 1/15 | | H3 | 0 | 137 | 5,26 | 2,17 |
| 1/16 | | D1 | 0 | 416 | 1,73 | 7,08 |
| 1/17 | | D2 | 0 | 497 | 1,45 | 8,33 |
| 1/18 | | D3 | 0 | 382 | 1,88 | 6,83 |

Protržení drátu v průběhu obrábění je nežádoucí jev. V daném místě může nastat poškození povrchu obráběného materiálu a celý proces se také výrazně zpomaluje v důsledku opakovaného navlékání drátu. Z tohoto hlediska lze jednoduše posoudit, zda je určitá technologie pro obrábění daného materiálu vhodná, nebo nikoliv. Obr. 3.16 zobrazuje počet protržení drátu, ke kterým došlo u jednotlivých vzorků v průběhu jejich řezání. Drát byl protržen pouze ve třech případech, konkrétně u dvou vzorků řezaných drátem A, a u jednoho vzorku řezaného drátem C. Je nutno poznamenat, že všechna uvedená protržení nastala



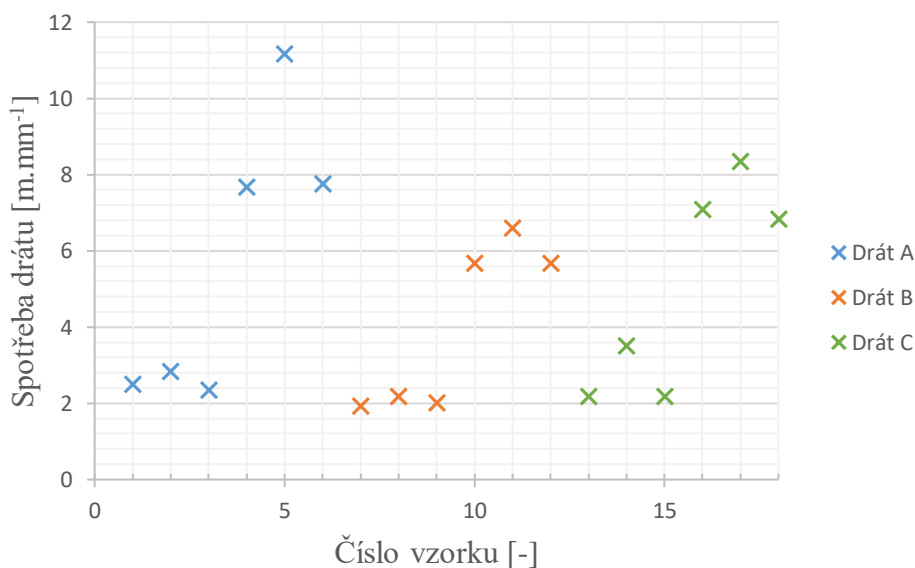
Obr. 3.16 Počet protržení drátu u jednotlivých vzorků.

v průběhu zajíždění drátu do materiálu. Důvodem tak mohla být například přítomnost znečištění nebo ostřiny v daném místě. Lze tedy konstatovat, že materiál NIMONIC 263 lze řezat všemi použitými technologiemi i dráty bez výrazných potíží.



Obr. 3.17 Rychlost řezání dosažená u jednotlivých vzorků.

Protože se jedná o pomalou metodu obrábění, je rychlost řezání při hodnocení technologií velice podstatným faktorem. Obr. 3.17 zobrazuje průměrnou rychlost, která byla dosažena při řezání vzorků. Jsou zde uvedeny rychlosti pro hrubování i dokončování. Do rychlosti dokončovacích technologií je zahrnuto provedení všech tří řezů, proto jsou tyto hodnoty oproti hrubovacím výrazně nižší. V rámci hrubování byl nejrychleji proveden řez na vzorku 1/9, který trval 136 s. Nejpomalejší řez byl proveden na vzorku 1/14. Jedním z důvodů jsou dvě protržení drátu, v důsledku kterých se zvýšil celkový čas řezání tohoto vzorku. Dokončovací řez proběhl nejrychleji na vzorku 1/12 a nejpomaleji na vzorku 1/5. Lze si povšimnout, že řezání proběhlo bez ohledu na použitý drát vždy nejrychleji při použití technologií H3 a D3. Z grafu je také patrné ovlivnění rychlosti řezání použitým drátem. Celkově byly nejlepší výsledky dosaženy drátem B, a bylo tak potvrzeno tvrzení výrobce, že ním lze dosáhnout vyšší rychlosti řezání.



Obr. 3.18 Spotřeba drátu při řezání jednotlivých vzorků.

Obr. 3.18 zobrazuje spotřebu řezacího drátu u jednotlivých vzorků na 1 mm provedeného řezu. V grafu jsou opět uvedeny hodnoty pro hrubování i dokončování, přičemž spotřeba drátu pro dokončovací technologie je uváděna pro všechny tři řezy. Určení technologie s nejnižší spotřebou není jednoznačné. Podobné výsledky byly dosaženy při hrubování technologiemi H1 a H3, a taky v případě dokončování technologiemi D1 a D3. Stejně tak nejsou u hrubování příliš výrazné rozdíly v použitém drátu. Celkově je z hlediska spotřeby nejvýhodnější použití drátu B, co se projevilo výrazněji u dokončovacích technologií. Lze si taky povšimnout zvýšení spotřeby u vzorků 1/5 a 1/14, u kterých nastalo protržení drátu v průběhu obrábění. Z porovnání obr. 3.17 a obr. 3.18 je patrné, že nejvyšší hodnoty spotřebovaného drátu se projevily u nejpomalejších technologií.

Na základě uvedených výsledků lze prohlásit, že nejvhodnější pro řezání materiálu NIMONIC 263 z hlediska posuzovaných parametrů je použití drátu B v kombinaci s technologiemi H3 a D3.

3.5.2 Posouzení vlivu vstupních faktorů na kvalitu povrchu

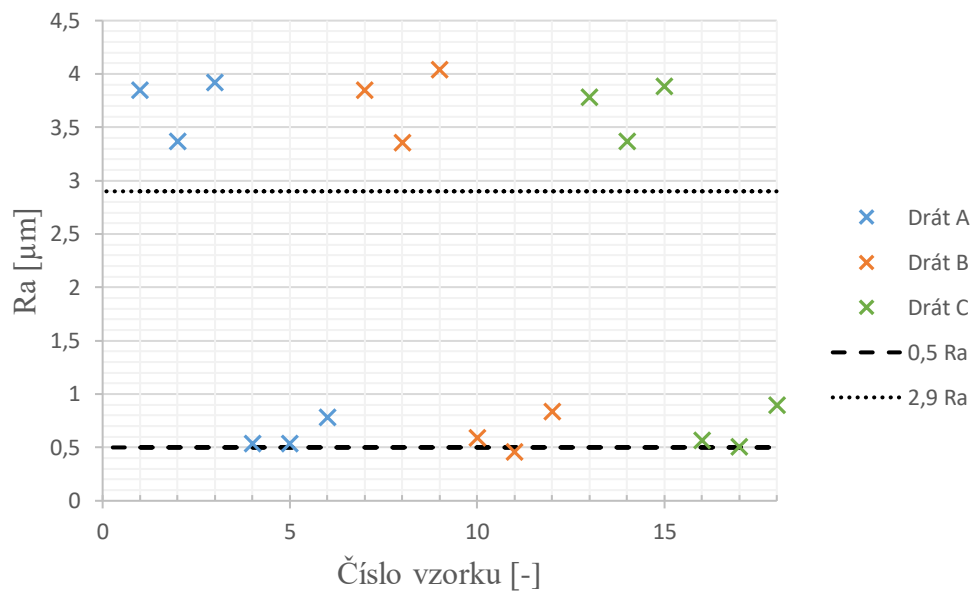
Hodnocení kvality povrchu bylo provedeno pomocí mechanického profilometru Bruker Dektak XT (obr. 3.21). Měření bylo provedeno na vzorcích vyhotovených ve druhé části experimentu s plochou řezu o velikosti 15×3 mm. Tyto vzorky byly označeny čísly 2/1 až 2/18, naměřená data jsou zpracována v tab. 3.9. V rámci měření byly posuzovány tyto parametry:

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

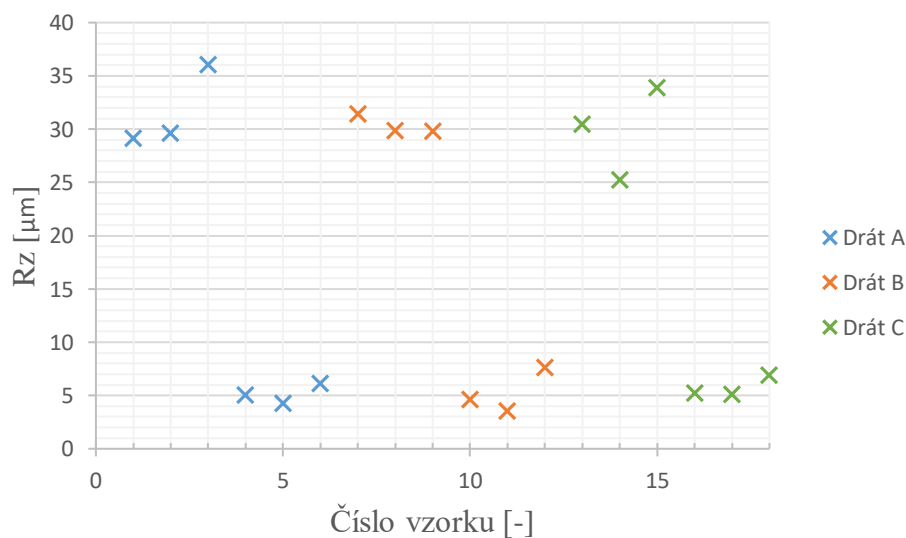
Tab. 3.9 Data naměřena v druhé části experimentu.

| Označení vzorku | Použitý drát | Použitá technologie | Ra | Rq | Rz | Sa | Sq | Sz |
|-----------------|--------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | | [μm] | [μm] | [μm] | [μm] | [μm] | [μm] |
| 2/1 | A | H1 | 3,845 | 4,89 | 29,133 | 3,843 | 4,888 | 31,684 |
| 2/2 | | H2 | 3,370 | 4,363 | 29,64 | 3,312 | 4,303 | 32,712 |
| 2/3 | | H3 | 3,921 | 5,091 | 36,037 | 3,815 | 4,947 | 36,663 |
| 2/4 | | D1 | 0,533 | 0,687 | 5,015 | 0,502 | 0,65 | 6,003 |
| 2/5 | | D2 | 0,534 | 0,66 | 4,282 | 0,383 | 0,481 | 4,713 |
| 2/6 | | D3 | 0,783 | 0,988 | 6,1 | 0,684 | 0,865 | 6,205 |
| 2/7 | B | H1 | 3,848 | 4,883 | 31,418 | 3,78 | 4,825 | 36,013 |
| 2/8 | | H2 | 3,353 | 4,278 | 29,859 | 3,345 | 4,272 | 34,122 |
| 2/9 | | H3 | 4,039 | 5,118 | 29,793 | 4,019 | 5,083 | 31,389 |
| 2/10 | | D1 | 0,588 | 0,748 | 4,644 | 0,569 | 0,728 | 6,049 |
| 2/11 | | D2 | 0,457 | 0,572 | 3,564 | 0,41 | 0,518 | 4,091 |
| 2/12 | | D3 | 0,834 | 1,066 | 7,631 | 0,778 | 0,993 | 8,596 |
| 2/13 | C | H1 | 3,779 | 4,773 | 30,448 | 3,734 | 4,696 | 33,017 |
| 2/14 | | H2 | 3,369 | 4,244 | 25,235 | 3,315 | 4,187 | 30,157 |
| 2/15 | | H3 | 3,885 | 4,991 | 33,911 | 3,834 | 4,935 | 39,651 |
| 2/16 | | D1 | 0,568 | 0,723 | 5,246 | 0,517 | 0,658 | 6,359 |
| 2/17 | | D2 | 0,503 | 0,649 | 5,091 | 0,381 | 0,518 | 6,983 |
| 2/18 | | D3 | 0,893 | 1,108 | 6,876 | 0,73 | 0,918 | 7,254 |

V praxi jsou nejpoužívanější parametry Ra a Rz. Z tohoto důvodu bylo provedeno jejich grafické zpracování (obr. 3.19 a obr. 3.20). Na obr. 3.19 jsou vyznačeny také hodnoty Ra, které měli být v průběhu experimentu dosaženy. Hrubováním nebyla zadaná hodnota dosažena ani v jednom případě. Nejlepší výsledek byl dosažen na vzorku 2/8, konkrétně 3,353 μm . Co se týče dokončování, nejlepší výsledek vykazuje vzorek 2/11, který se jako jediný nachází pod stanovenou hranicí. Lze si povšimnout, že na parametr Ra nemá materiál drátu téměř žádný vliv. Všechny řezy provedeny stejnou technologií vykazují podobné hodnoty, přičemž nejlepší výsledky byly dosaženy technologiemi H2 a D2. Parametr Rz má pro hrubovací vzorky nahodilý charakter. Nejnižší hodnota byla dosažena u vzorku 2/14. U dokončovacích řezů si lze povšimnout podobnosti s parametrem Ra, kdy byly nejlepší hodnoty dosahovány rovněž technologií D2.



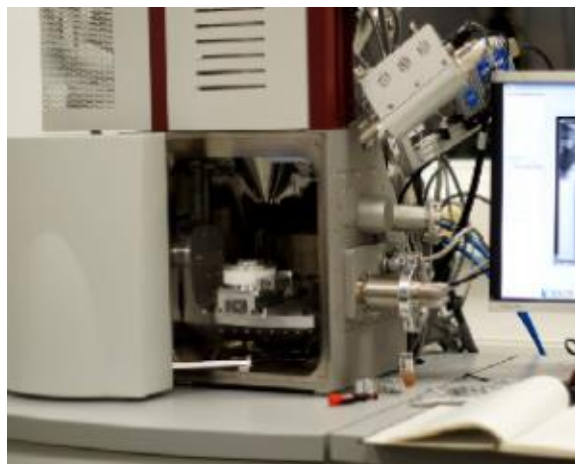
Obr. 3.19 Hodnoty parametru Ra dosažené na jednotlivých vzorcích.



Obr. 3.20 Hodnoty parametru Rz dosažené na jednotlivých vzorcích.



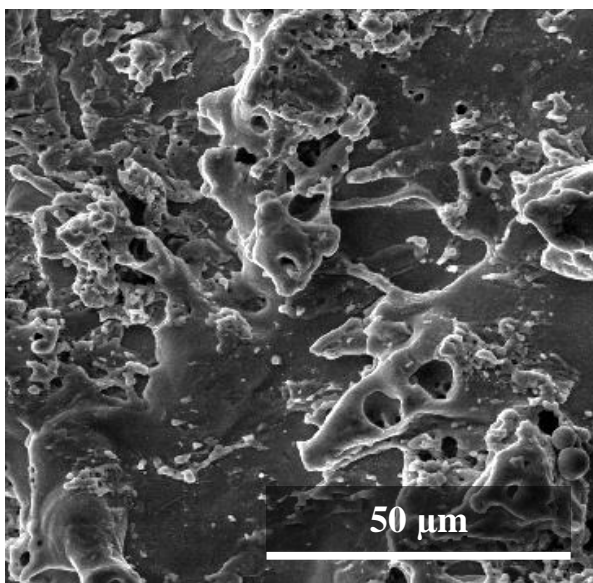
Obr. 3.21 Profilometr Bruker Dektak XT. [60]



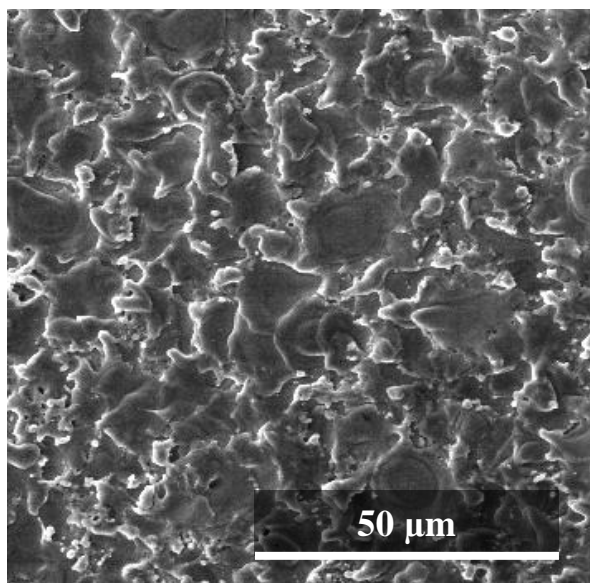
Obr. 3.22 Elektronový mikroskop TESCAN LYRA 3. [61]

Povrch součástí vzniklý po elektroerozivním obrábění je tvořen krátery různé velikosti. Mohou se na něm vyskytovat částice materiálu, které nebyly z místa řezu odstraněny a ulpěly na povrchu materiálu. Vhodné je posoudit také přítomnost přetavené vrstvy a mikrotrhlin. Pro posouzení morfologie povrchu byl v rámci experimentu použit elektronový mikroskop TESCAN LYRA 3 (obr. 3.22). Snímky byly pořízené na stejných vzorcích, které byly použity pro hodnocení kvality povrchu. V rámci experimentu byly vyhotoveny taktéž snímky povrchu drátů před obráběním a po něm. Všechny zmíněné snímky jsou zpracovány v přílohách 1 a 2.

Na snímcích vzorků, které byly obráběny hrubovacími technologiemi (obr. 3.23) lze ve všech případech pozorovat krátery s hladkým povrchem o velikosti průměru několik desítek μm . Největší kráter byl pozorován na vzorku 2/9. Na velké části snímku se nachází vrstva ulpělého, přetaveného materiálu, která byla pozorována u všech vzorků. Tato vrstva není souvislá, vyskytují se zde výrazné prohlubně a vyvýšeniny. Kromě toho se zde nacházejí částice o velikosti 1–10 μm ve formě kuliček a těles nepravidelných tvarů. Jde o oderodovaný materiál, který nebyl odstraněn z místa řezu a přichytil se na povrch vzorku. Jednotlivé vzorky se od sebe výrazně neliší, nejčlenitější povrch byl dosažen při řezání drátem C.



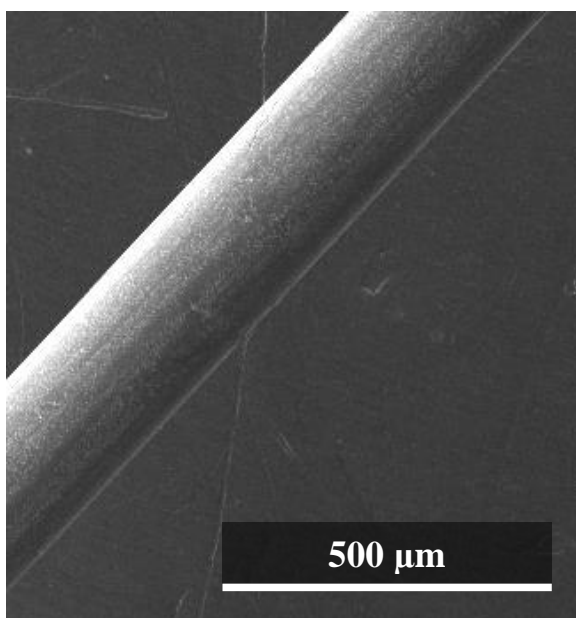
Obr. 3.23 Morfologie povrchu vzorku 2/7.



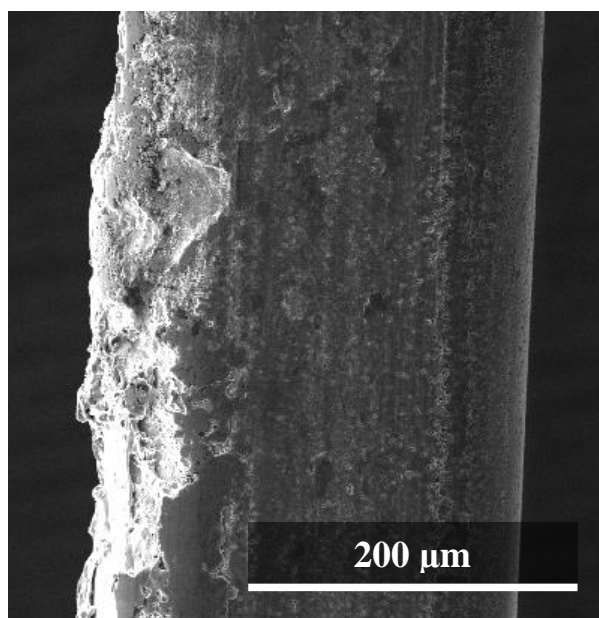
Obr. 3.24 Morfologie povrchu vzorku 2/5.

Povrch vzorků, které byly řezány dokončovacími technologiemi je mnohem souvislejší (obr. 3.24). Nachází se zde velké množství kráterů, které jsou dobře rozlišitelné. V porovnání s obr. 3.23 mají tyto krátery většinou hladký povrch a mnohem menší velikost (průměr kráteru do 25 μm). Nejmenší velikost kráterů byla dosažena na vzorcích, kde byla použita technologie D2. Na žádném ze vzorků není přítomna souvislá vrstva přetaveného materiálu. Nachází se zde však, stejně jako v případě hrubovacích operací, velké množství ulpělých částic oderodovaného materiálu, které dosahují velikosti 1–5 μm . Přítomnost trhlin nebyla zjištěna na žádném ze vzorků řezaných hrubovacími nebo dokončovacími technologiemi.

Příloha 2 obsahuje snímky nových a také použitých drátů, které byly vyhotoveny na stejném elektronovém mikroskopu. Obr. 3.25 zobrazuje vzorek nového drátu typu B. Jeho povrch je hladký, nevyskytují se zde žádné rýhy, trhliny nebo jiné povrchové poškození. Na obr. 3.26 je zobrazen drát stejného typu, který byl použit pro obrábění. Na snímku si lze povšimnout poškození, které vzniklo jako důsledek působení vysokých teplot při obrábění. Na povrchu drátu lze pozorovat oblasti s přetaveným materiálem, vyskytují se zde výrazné prohlubně a výstupky. Na detailu uvedeném v příloze 2 lze vidět mikrotrhliny, které se nacházejí prakticky na celém povrchu použitého drátu.

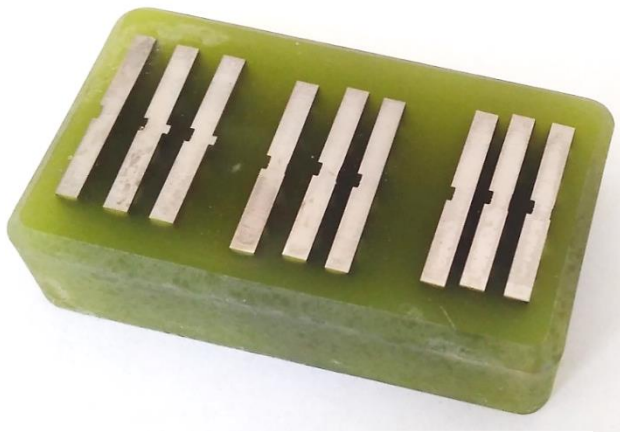


Obr. 3.25 Nový drát typu B.

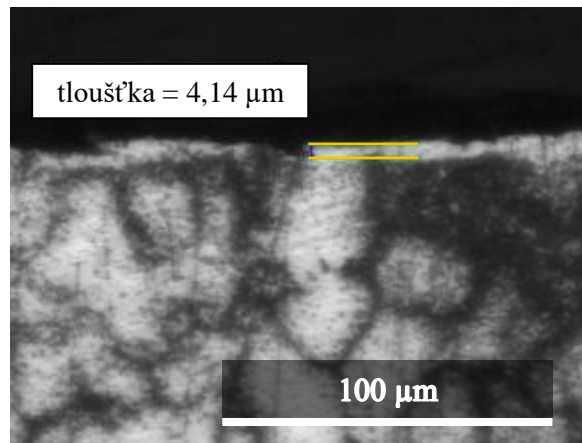


Obr. 3.26 Detail použitého drátu typu B.

Z důvodu zhodnocení tloušťky vzniklé přetavené vrstvy byly na vzorcích řezaných v první části experimentu vyhotoveny metalografické výbrusy. Nařezané vzorky byly zality do pryskyřice a vybroušeny (obr. 3.27). Následně byly naleptány v roztoku kyseliny chlorovodíkové a vody (poměr 1:1), do kterého bylo pro zvýšení účinku přidán peroxidu vodíku. Mikrostruktura vzorků byla pozorována na světelném mikroskopu. Použité leptadlo nebylo pro daný materiál příliš vhodné, nicméně na určitých vzorcích lze přetavenou vrstvu pozorovat (obr. 3.28). Všechny zhotovené snímky jsou uvedeny v příloze 3, přičemž byl větší důraz kladen na hrubované vzorky. Ze snímků uvedených v příloze 3 je patrné, že přetavená vrstva dosahuje tloušťky 4,14–7,24 μm . Největší tloušťka byla změřena na vzorku s označením 1/2. Pozoruhodné je, že tato vrstva není na snímcích ze vzorků řezaných drátem B vůbec viditelná, i když by se zde podle snímků uvedených v příloze 2 měla nacházet. Na vzorcích, které byly zhotoveny dokončovacími technologiemi byl pro každý drát provedeno jedno měření. Na těchto snímcích není přetavená vrstva zřetelná, co koresponduje s výsledky uvedenými v příloze 2.



Obr. 3.27 Vzorky zalité v pryskyřici.

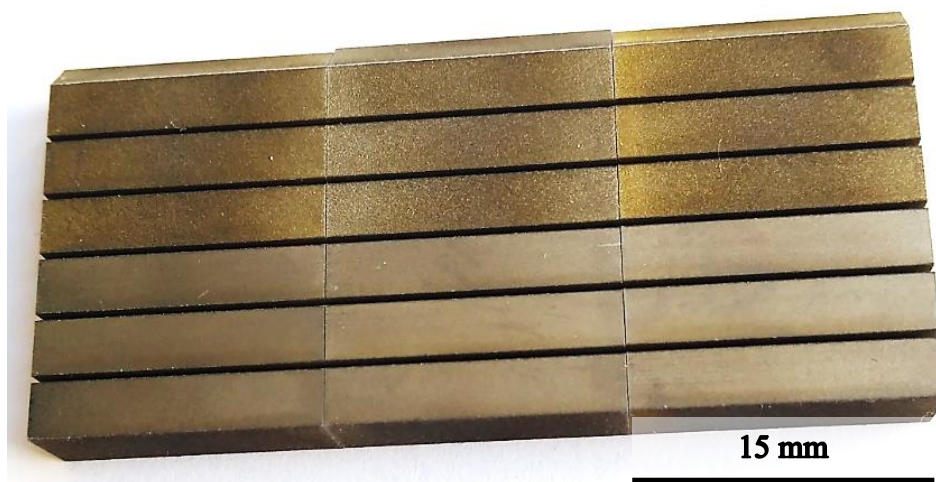


Obr. 3.28 Přetavená vrstva na vzorku 1/14.

3.5.3 Posouzení kontaminace povrchové vrstvy základního materiálu

V průběhu elektroerozivního obrábění dochází v místě řezu ke vzniku vysokých teplot, v důsledku čehož dochází k tavení materiálu obrobku i nástroje a k jejich vzájemné kontaminaci. V oblasti leteckého průmyslu je v určitých případech kontaminace základního materiálu nepřijatelná. Z tohoto důvodu bylo pro řezání materiálu v experimentální části zvoleno více druhů řezacích drátů. Chemické složení bylo posuzováno na vzorcích vyhotovených ve druhé části experimentu. Rozdíly na vzorcích lze pozorovat i pouhým okem. Každá destička se vyznačuje jiným barevným odstínem, což je nejvíce zřetelné na hrubovacích řezech (obr. 3.29). Pro měření dat byl použit elektronový mikroskop TESCAN LYRA 3, který je vybaven zařízením pro energiově disperzní rentgenovou spektroskopii. Hodnoty jsou uváděny v hmotnostních procentech, přičemž přesnost měření je 0,5 hm. %.

Jako první bylo provedeno měření chemického složení jednotlivých drátů. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.10. Všechny dráty obsahují převážně měď a zinek v různých poměrech. V případě drátu A bylo naměřeno poměrně vysoké množství hliníku. Tyto dráty byly posuzovány rovněž po provedení obrábění. Z uvedené tabulky je patrné, že složení drátu B se výrazně nezměnilo. V případě drátu C nastal výrazný nárůst obsahu mědi při současném poklesu obsahu zinku. Vysoký rozdíl je pravděpodobně způsoben odtavením zinkového



zleva: vzorek řezaný drátem A, drátem B, drátem C

Obr. 3.29 Vzorky vyhotovené v druhé části experimentu.

povlaku, pod kterým se nachází mosazné jádro. U všech drátů byla zaznamenána kontaminace niklem, a kobaltem. Tyto prvky jsou v materiálu NIMONIC 263 zastoupeny v největší míře. Naměřené hodnoty jsou nízké pravděpodobně z důvodu vysoké teploty tání, kterou tyto prvky vykazují. Výstupy z měření jsou uvedeny v přílohách 4 a 5.

Tab. 3.10 Chemické složení drátů.

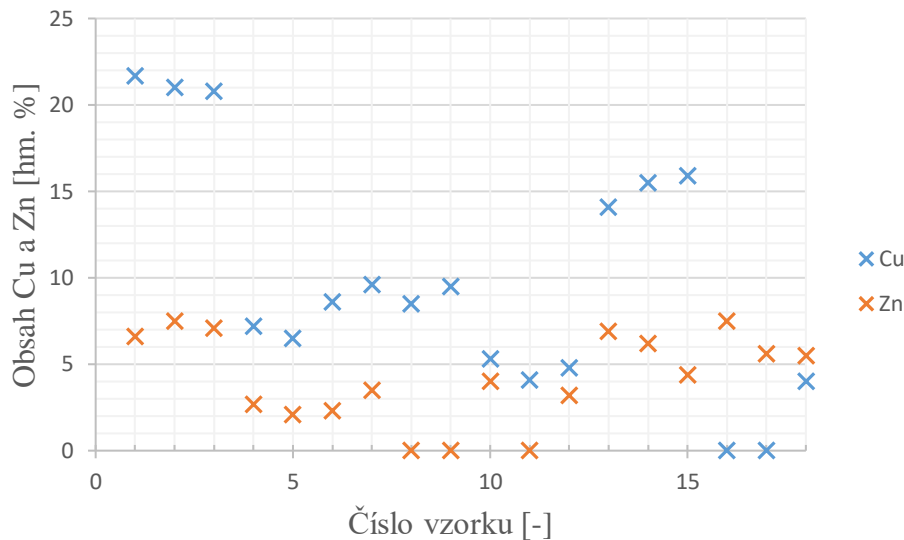
| Označení drátu | Prvek [hm. %] | | | | | | | |
|----------------|---------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Al | Cu | Zn | Co | Ni | Mo | Si | Cr |
| A – nový | 19,2 | 50,7 | 21,6 | – | – | – | – | – |
| A – použitý | 1,7 | 52,1 | 30,9 | 1,0 | 3,4 | 0,6 | – | – |
| B – nový | – | 32,3 | 53,0 | – | – | – | – | – |
| B – použitý | – | 30,5 | 56,8 | 0,2 | 0,6 | – | 0,2 | – |
| C – nový | 3,8 | 14,3 | 69,3 | – | – | – | – | – |
| C – použitý | 0,6 | 49,9 | 29,9 | 0,7 | 2,3 | – | – | 1,6 |

Hodnocení chemického složení jednotlivých vzorků je uvedeno v tab. 3.11. Tato tabulka obsahuje jenom vybrané prvky. Všechny výstupy z měření jsou uvedeny v příloze 6 a kompletní chemické složení je uvedeno v příloze 7. Na konci tab. 3.11 je pro přehlednost uvedeno chemické složení základního materiálu naměřeno v kapitole 3.1.1. U všech vzorků lze pozorovat výrazný nárůst obsahu mědi. Nebyla naměřena jenom na dvou vzorcích řezaných drátem C. Největší nárůst byl pozorován při hrubovacích technologiích. Kontaminace zinkem se oproti mědi projevila v menší míře. U drátu B byl naměřen jenom u tří ze šesti vzorků. Uvedené výsledky jsou graficky znázorněny v obr. 3.30.

Tab. 3.11 Chemické složení povrchové vrstvy jednotlivých vzorků.

| Označení vzorku | Použitý drát | Použitá technologie | Prvek [hm. %] | | | | | | | |
|-------------------|--------------|---------------------|---------------|-----|------|-------|------|-----|-----|-----|
| | | | Cu | Zn | Ni | Co | Cr | Ti | Mo | Al |
| 2/1 | A | H1 | 21,7 | 6,6 | 30,7 | 12,2 | 16,3 | 2,2 | 3,2 | – |
| 2/2 | | H2 | 21,0 | 7,5 | 30,6 | 10,9 | 17,7 | 2,4 | – | – |
| 2/3 | | H3 | 20,8 | 7,1 | 30,4 | 13,9 | 14,6 | 2,2 | – | 0,3 |
| 2/4 | | D1 | 7,2 | 2,7 | 42,0 | 16,2 | 20,2 | 2,3 | – | 0,4 |
| 2/5 | | D2 | 6,5 | 2,1 | 42,1 | 18,2 | 18,4 | 2,2 | – | 0,7 |
| 2/6 | | D3 | 8,6 | 2,3 | 39,9 | 16,0 | 18,2 | 2,0 | 5,3 | 0,3 |
| 2/7 | B | H1 | 9,6 | 3,5 | 37,1 | 14,6 | 17,6 | 2,3 | 5,7 | 0,6 |
| 2/8 | | H2 | 8,5 | – | 37,9 | 13,6 | 17,4 | 2,5 | 4,7 | 0,6 |
| 2/9 | | H3 | 9,5 | – | 39,2 | 16,1 | 15,6 | 2,1 | – | – |
| 2/10 | | D1 | 5,3 | 4,0 | 42,1 | 17,0 | 16,1 | 2,2 | 5,3 | – |
| 2/11 | | D2 | 4,1 | – | 41,9 | 16,3 | 17,8 | 2,3 | 4,2 | – |
| 2/12 | | D3 | 4,8 | 3,2 | 41,2 | 16,5 | 21,4 | 2,7 | – | 0,7 |
| 2/13 | C | H1 | 14,1 | 6,9 | 32,6 | 13,7 | 18,0 | 2,6 | – | 0,4 |
| 2/14 | | H2 | 15,5 | 6,2 | 33,4 | 13,9 | 17,7 | 1,8 | – | 0,6 |
| 2/15 | | H3 | 15,9 | 4,4 | 32,5 | 12,5 | 18,6 | 2,2 | 5,7 | 0,2 |
| 2/16 | | D1 | – | 7,5 | 41,6 | 16,0 | 20,8 | 2,5 | – | 0,6 |
| 2/17 | | D2 | – | 5,6 | 40,5 | 17,0 | 21,1 | 2,6 | – | 0,7 |
| 2/18 | | D3 | 4,0 | 5,5 | 39,2 | 16,3 | 19,2 | 2,6 | 5,1 | – |
| Základní materiál | | | 1,4 | – | 50,1 | >22,0 | 12,3 | 1,2 | 4,6 | 0,5 |

Zajímavé je, že drát C, který má zinkový povlak, ovlivnil složení povrchové vrstvy základního materiálu z hlediska obsahu zinku podobně, jako čistě mosazný drát A. Celkově nejnižší výsledky z hlediska kontaminace mědí a zinkem vykazují vzorky, které byly řezány drátem B.



Obr. 3.30 Kontaminace povrchové vrstvy základního materiálu mědí a zinkem.

Lze si také povšimnout výrazný pokles obsahu niklu, který je v základním materiálu zastoupen v největší míře. Jeho obsah byl naměřen v rozmezí 30,4–42,1 hm. %. Největší pokles nastal při hrubovacích operacích, což je důsledek výrazného zvýšení obsahu mědi a zinku. Obdobně byl zaznamenán pokles obsahu kobaltu. Z výsledků je patrné také celkové zvýšení obsahu chromu a titanu ve vzorcích. Tyto prvky se v použitých drátech nenacházejí, lze tedy konstatovat, že složení prvků zjištěné v kapitole 3.1.1 nemusí být přesné. Zvýšené hodnoty lépe odpovídají těm, které jsou pro slitinu NIMONIC 263 uváděny v materiálovém listu (tab. 3.1). Výskyt molybdenu koresponduje se složením základního materiálu, byl však naměřen pouze u některých vzorků. Z tabulky uvedené v příloze 7 si lze povšimnout, že u vzorků, kde byl naměřen molybden nebyla naměřena síra a naopak. Je tedy možné, že měřicí přístroj detekoval vždy jen jeden z těchto prvků. To by vysvětlovalo, proč nebyl u některých vzorků naměřen žádný obsah molybdenu, i když by podle chemického složení měl být obsažen v základním materiálu. Obsah hliníku se ve vzorcích pohybuje do hodnoty 0,7 hm. %, přičemž typ použitého drátu na něj nemá výrazný vliv.

4 ZÁVĚRY

Elektroerozivní řezání je jednou z metod, které jsou vhodné pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Tímto způsobem lze obrábět i slitinu NIMONIC 263, což bylo prokázáno provedeným experimentem. V průběhu řezání vzorků nedocházelo k výraznějším potížím. Řezací drát byl protrhnut pouze na třech vzorcích, a to vždy při zajištění do materiálu. Z hlediska dosažené rychlosti řezání a spotřeby řezacího drátu byly nejlepší výsledky dosaženy v případě použití drátu B (TOPAS PLUS D) v kombinaci s technologiemi H3 a D3. Na základě dosažených výsledků lze souhlasit s tvrzením výrobce, že uvedeným drátem lze dosáhnout vyšší rychlosti řezání.

Jedním z hlavních cílů experimentu bylo dosažení kvality povrchu $R_a = 2,9 \mu\text{m}$ hrubovacími technologiemi, a $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ dokončovacími technologiemi. Technologie, které byly zvoleny v experimentu nejsou z hlediska dosažení stanovené kvality povrchu příliš vhodné. Hrubovacími technologiemi nebyla zadaná hodnota dosažena ani v jednom případě. Z dokončovacích technologií byla hodnota $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ dosažena jenom na jednom vzorku. Nejlepší výsledky byly pozorovány při použití technologií H2 a D2. Bylo rovněž zjištěno, že materiál řezacího drátu nemá na výslednou hodnotu parametrů R_a a R_z výrazný vliv.

Na řezacích drátech a vzorcích bylo provedeno měření chemického složení povrchové vrstvy. Tímto měřením bylo prokázáno, že v důsledku elektroerozivního obráběcího procesu dochází ke vzájemné kontaminaci povrchu nástroje a obrobku. Pro řezání vzorků byly použity tři řezací dráty vyrobeny z rozdílného materiálu. Důvodem bylo posouzení míry kontaminace povrchové vrstvy mědí, která je v oblasti leteckého průmyslu nežádoucí. Její přítomnost byla zjištěna téměř na všech posuzovaných vzorcích. Nulové hodnoty byly naměřeny na některých vzorcích, které byly řezány drátem C (pozinkovaný drát COBRACUT TYPE A).

V návaznosti na provedený experiment by bylo vhodné pokračovat ve zkoumání hrubovacích a dokončovacích technologií, kterými by bylo možné bez problémů dosáhnout zadané hodnoty parametru R_a . Z hlediska chemického složení nebyla prokázána konkrétní souvislost mezi kontaminací povrchové vrstvy a použitou technologií. Z tohoto důvodu by pro zamezení kontaminace mědí bylo vhodnější zkoumat použití drátů z jiných typů materiálu. Dobré výsledky by mohly být dosaženy řezacím drátem z wolframu nebo molybdenu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. RODZIŇÁK, Dušan. *Letecké materiály a technológie*. Košice: Elfa, 2007, 128 s. ISBN 978-80-8086-050-9.
2. PÍŠKA, Miroslav et al. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
3. Turbine blades: An example of the element Nickel. In: *Periodic Table* [online]. 27 February, 2003 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://periodictable.com/Items/028.11/index.pr.html>
4. Parts are made by the method of electroerosive wire-cut machining. In: *ARTA: Electro-erosion technologies* [online]. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: http://www.artaedm.com/mach_eng.html
5. BEŇO, Luděk a Martin BUGAJ. *Materiály v letectví*. Žilina: Žilinská univerzita, 2002, 167 s. ISBN 80-710-0936-3.
6. TANASA, Fulga a Mandalina ZANOAGA. *FIBER-REINFORCED POLYMER COMPOSITES AS STRUCTURAL MATERIALS FOR AERONAUTICS* [online]. Brasov, 23-25 May 2013 [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: http://www.afahc.ro/ro/afases/2013/eng_mech/Tanasa_Zanoaga.pdf
7. MICHNA, Štefan a Lenka MICHNOVÁ. *Neželezné kovy*. Ústí nad Labem: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014. ISBN 978-80-260-7132-7.
8. 3.2.1.2.1.3 TITAN A JEHO SLITINY. In: *Studijní materiály nejen do strojírenství: Největší databáze školních materiálů pro střední a vysoké školy*. [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-stredni-skola.blogspot.com/2011/04/321213-titan-jeho-slitiny.html>
9. Tepel. délková roztažnost a měrná tepel. kapacita. *Fyzikální kabinet GymKT* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <http://kabinet.fyzika.net/studium/tabulky/tepelna-kapacita-roztaznost.php>
10. Problematika obrábění dílů pro letecký průmysl. *Technický týdeník* [online]. 1. leden 2006 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/problematika-obrabeni-dilu-pro-letecky-prumysl_18279.html
11. CAMPBELL, F.C. *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*. 2. Amsterdam: Elsevier, 2008. ISBN 978-1-8561-7495-4.
12. Důležité aspekty vysokorychlostního obrábění. *MM Průmyslové spektrum: Odborně-vzdělávací a zpravodajský portál z oblasti strojírenství a navazujících oborů* [online]. 11.12.2002, **2002**(12) [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dulezite-aspekty-vysokorychlostniho-obrabeni.html>
13. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.

14. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999, 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
15. Novinky laserového předehřevu při obrábění. *MM Průmyslové spektrum: Odborně-vzdělávací a zpravodajský portál z oblasti strojírenství a navazujících oborů* [online]. 17.12.2013, **2013**(12) [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/novinky-laseroveho-predehrevu-pri-obrabeni.html>
16. SCHNEIDER, J., A. KIENZLER a V. SCHULZE. Influence of surface condition on wear behavior of μ PIM mould inserts made of tool steel and cemented carbide. *Microsystem Technologies* [online]. 10 February 2011, **17**(2), 273-280 [cit. 2020-06-16]. DOI: 10.1007/s00542-011-1238-6. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/226535487_Influence_of_surface_condition_on_wear_behavior_of_mPIM_mould_inserts_made_of_tool_steel_and_cemented_carbide
17. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989, 122 s.
18. JAMESON, Elman C. *Electrical Discharge Machining*. Michingan: Society of Manufacturing Engineers, 2001, 329 s. ISBN 0-87263-521-X.
19. OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění: (vzdělávací a tréninkový modul)* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <http://opus.fme.vutbr.cz/dokumenty/moduly/Osicka.pdf>
20. STORR, Manfred. *Important facts about spark erosion* [online]. 2006 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: https://www.oelheld.com/fileadmin/content/Broschueren/EN/Important_facts_about_spark_erosion_-BR-__EN__01.pdf
21. LIU, Chong, Nick DUONG, Muhammad P. JAHAN, Jianfeng MA a Roan KIRWIN. Experimental investigation and numerical simulation of micro-EDM of bulk metallic glass with focus on crater sizes. *Procedia Manufacturing*. 2019, **34**, 275-286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.151>. ISSN 2351-9789. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919308790>
22. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progressívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienala, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
23. CZELUSNIAK, Tiago, Camila Fernandes HIGA, Ricardo Diego TORRES, Carlos Augusto Henning LAURINDO, José Mário Fernandes de PAIVA JR, Armin LOHRENGEL a Fred Lacerda AMORIM. Materials used for sinking EDM electrodes: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019, **41**(1). DOI: 10.1007/s40430-018-1520-y.
24. Grafit. In: *PENTA TRADING: VÁŠ SVĚT ELEKTROEROZE* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.penta-edm.cz/text-grafit/>

25. EDM Electrode Materials Information. In: *Engineering 360* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: https://www.globalspec.com/learnmore/materials_chemicals_adhesives/electrical_optical_specialty_materials/electrical_contact_electrode_materials/edm_electrode_materials
26. Copper multi hole electrode tubes. In: *QUEN CHEER INDUSTRIAL CO. LTD* [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: https://www.quencheer.com.tw/products-detail/id/7/title/Copper_multi_hole_electrode_tubes
27. Electrode manufacturing for electrical discharge machining (EDM). In: *Boryszew: Automotive plastics* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://www.wedo-mouldmaker.com/manufacturing-electrodes.php>
28. Brass single-hole electrode tubes. In: *QUEN CHEER INDUSTRIAL CO. LTD* [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: https://www.quencheer.com.tw/products-detail/id/6/title/Brass_single-hole_electrode_tubes
29. PAGÁČ, Marek a Marek SADÍLEK. Konstrukce a výroba elektrod. *MM Průmyslové spektrum: Odborně-vzdělávací a zpravodajský portál z oblasti strojírenství a navazujících oborů* [online]. 2012, 15.02.2012, (1), 68 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/konstrukce-a-vyroba-elektrod.html>
30. EDM wire selection. *Novotec* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.novotec-edm.com/wire-selection>
31. COPPER WIRE. In: *EDM CUTTING WIRE* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.edmcuttingwire.com/edm-wire/edm-wire-types/copper-wire/>
32. MOLYBDENUM WIRE. In: *EDM CUTTING WIRE* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.edmcuttingwire.com/edm-wire/edm-wire-types/molybdenum-wire/>
33. TUNGSTEN WIRE. In: *EDM CUTTING WIRE* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.edmcuttingwire.com/edm-wire/edm-wire-types/tungsten-wire/>
34. BRASS WIRE. In: *EDM CUTTING WIRE* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.edmcuttingwire.com/edm-wire/edm-wire-types/brass-wire/>
35. COATED WIRE. In: *EDM CUTTING WIRE* [online]. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.edmcuttingwire.com/edm-wire/edm-wire-types/coated-wire/>
36. BedraEDM – High-tech solutions for spark erosion. *Bedra: intelligent wires* [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.bedra.com/en/products/bedraedm/>
37. PFLUGER, Brian. Familiar With Your EDM Fluid?: Fluid choice and maintenance affect part quality, reduce DC arcing. *CANADIAN METALWORKING* [online]. March 15, 2013 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadian-industrialmachinery/article/metalworking/familiar-with-your-edm-fluidr>

38. Sinker EDM – Dielectric Fluids: Choosing Dielectric Fluid for Sinker EDM Applications. In: *GRAPHEL: Carbon Products* [online]. April 16, 2018 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://graphel.com/dielectric-fluids/>
39. Senkleistungen. In: *Novum plast* [online]. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.novumplast.pl/de/angebot/senkleistungen>
40. Difference Between Conventional EDM and Dry EDM. *Minaprem* [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <http://www.difference.minaprem.com/ntm/difference-between-conventional-edm-and-dry-edm/>
41. ADVANCED SOLUTIONS FOR DRY ELECTROEROSION PROCESSES. *Tekniker: MEMBER OF BASQUE RESEARCH & TECHNOLOGY ALLIANCE* [online]. 25-04-2018 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.tekniker.es/en/advanced-solutions-for-dry-electroerosion-processes>
42. KUMAR, Anish, Vinod KUMAR a Jatinder KUMAR. Experimental Investigation on Material Transfer Mechanism in WEDM of Pure Titanium (Grade-2). *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. Hindawi Publishing Corporation, 2013/12/29, **2013**, 1-20 [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.1155/2013/847876. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2013/847876/>
43. VDI 3400 Surface Finish Grade Definition. *PDF4PRO* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://pdf4pro.com/view/vdi-3400-surface-finish-grade-definition-5a0c27.html>
44. Plastic plaque size: 200×145×3.5mm of VDI 3400 for ABS material made in EDM machine of GF-AgieCharmilles from Switzerland. In: *VDI 3400* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <http://www.vdi3400.com/>
45. Surface Roughness Comparison. *EDM: Precision Technologies Ltd* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://edmprecision.com/surface-roughness-comparison/>
46. WRIGHT, Ian. EDM 101: Electrical Discharge Machining Basics. In: *Engineering.com* [online]. 15 December 2017 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/10100/EDM-101-Electrical-Discharge-Machining-Basics.aspx?fbclid=IwAR2mi4g_z4FWe8BPP6JJhaHcNN-rCkOeamxvLOkC42wxmC6GskYdVXkxK9A
47. Cutting High- Taper Angles with Soft Wire: Soft wire outperforms hard wire in high-taper EDM. In: *CANADIAN METALWORKING* [online]. February 18, 2015 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianindustrial-machinery/article/metalworking/cutting-high-taper-angles-with-soft-wire>
48. Electrical Discharge Machining (EDM) and Grinding (EDG). *OpenLearn: Free Learning from The Open University* [online]. 12th December 2017 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/electrical-discharge-machining-edm-and-grinding-edg>

49. SKRABALAK, Grzegorz. Influence of Electrode Tool Length on the Micro EDM Drilling Performance. *Procedia CIRP*. 2018, **68**, 594-598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.120>. ISSN 2212-8271. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117310612>
50. Vyjiskřovačky eromobil. *PENTA TRADING: VÁŠ SVĚT ELEKTROEROZE* [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.penta-edm.cz/vyjiskrovacky-eromobil/>
51. O nás. *PENTA TRADING: VÁŠ SVĚT ELEKTROEROZE* [online]. [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <https://www.penta-edm.cz/o-nas/>
52. V Brně vzniklo nové centrum elektroeroze. In: *STROJIRENSTVI.CZ: PORTÁL PROFESIONÁLŮ* [online]. 1. dubna 2019 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/v-brne-vzniklo-nove-centrum-elektroeroze>
53. *NIMONIC alloy 263* [online]. Special Metals Corporation, 2004 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/nimonic/nimonic-alloy-263.pdf>
54. Nickel Nimonic 263. *TECH STEEL & MATERIALS* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.techsteel.net/alloy/nickel/nimonic-263>
55. PMI-Master Pro2: Mobilní opticko-emisní spektrometr, který dosahuje přesnosti a opakovatelnosti výsledků stolních analyzátorů. *PCS: DIVIZE ANALYTIKA* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://pcsanalytika.cz/produkt/pmi-master-smart/>
56. FANUC ROBOCUT α -C600iB: Rychlá a přesná univerzální drátová řezačka. *PENTA TRADING: VÁŠ SVĚT ELEKTROEROZE* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.penta-edm.cz/fanuc-robocut-a-c600ib-dratova-rezacka/>
57. Řezací dráty. *PENTA TRADING: VÁŠ SVĚT ELEKTROEROZE* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.penta-edm.cz/rezaci-draty/>
58. TOPAS® PLUS D: Gamma phase wire for highest demand of cutting performance and process stability on AGIE and Japanese machines. *Bedra: intelligent wires* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.bedra.com/en/products/bedraedm/topas-plus-d/>
59. COBRACUT® TYPE A: Hard zinc-coated EDM wire for highest precision. *Bedra: intelligent wires* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.bedra.com/en/products/bedraedm/cobracut-type-a/>
60. Mechanical profilometer Bruker Dektak XT (DEKTAK). In: *CEITEC: NANO* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <http://nano.ceitec.cz/mechanical-profilometer-bruker-dektak-xt-dektak/>
61. Focused Ion Beam/Scanning Electron Microscope TESCAN LYRA3 (LYRA). In: *CEITEC: NANO* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <http://nano.ceitec.cz/focused-ion-beam-scanning-electron-microscope-tescan-lyra3-lyra/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Označení | Legenda | Jednotka |
|------------------|---|------------|
| C | kondenzátor | [-] |
| D | polovodičová dioda | [-] |
| D1 | první dokončovací technologie | [-] |
| D2 | druhá dokončovací technologie | [-] |
| D3 | třetí dokončovací technologie | [-] |
| EDG | Electrical Discharge Grinding | [-] |
| EDM | Electrical Discharge Machining | [-] |
| FR | tlak výplachu dielektrika | [bar] |
| G | generátor | [-] |
| H1 | první hrubovací technologie | [-] |
| H2 | druhá hrubovací technologie | [-] |
| H3 | třetí hrubovací technologie | [-] |
| I | pracovní proud výboje | [A] |
| I_e | střední vybíjecí proud | [A] |
| J | jiskřiště | [-] |
| L | cívka | [-] |
| M | motor | [-] |
| MV | multivibrátor | [-] |
| NUM | číslo označující pořadí řezu v dané technologii | [-] |
| OFF | doba pauzy mezi impulsy | [μ s] |
| ON | doba trvání impulsu | [μ s] |
| q | časové využití periody výboje | [-] |
| R, R_1 , R_n | rezistor | [-] |
| R_a | průměrná aritmetická úchylka profilu | [μ m] |
| RE | Rare Earth | [-] |
| R_q | průměrná kvadratická úchylka profilu | [μ m] |
| R_z | největší výška profilu | [μ m] |
| S_a | aritmetický průměr výšky povrchu | [μ m] |
| S_q | základ průměrné výšky povrchu | [μ m] |
| SV | servo napětí | [V] |
| S_z | maximální výška povrchu | [μ m] |
| T | doba periody | [μ s] |
| T | napnutí drátu | [gf] |

| | | |
|------------|-------------------------------------|---|
| T_1, T_n | tranzistor | [–] |
| t | čas | [μs] |
| t_d | doba zpoždění výboje | [μs] |
| t_e | doba výboje | [μs] |
| t_i | doba impulsu | [μs] |
| t_o | doba pauzy | [μs] |
| U | napětí | [V] |
| U_0 | napětí na zdroji | [V] |
| U_C | napětí na kondenzátoru | [V] |
| U_e | střední vybíjecí napětí | [V] |
| U_J | napětí v jiskřišti | [V] |
| U_k | napětí | [V] |
| U_Z | napětí na prázdno | [V] |
| VDI | kvalita povrchu podle VDI 3400 | [–] |
| V_n | objemový úbytek nástroje | [$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$] |
| V_o | objemový úbytek obrobku | [$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$] |
| WEDM | Wire Electrical Discharge Machining | [–] |
| WF | rychlost odvinu drátu | [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] |
| Z | zesilovač | [–] |
| γ | relativní objemový úbytek | [%] |
| δ | odchylka přesnosti | [mm] |
| δ_E | odchylka dána metodou výroby | [mm] |
| δ_N | odchylka nástroje | [mm] |
| δ_S | odchylka obráběcího stroje | [mm] |
| δ_T | teplotní odchylka | [mm] |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Turbínové lopatky. [3] | 10 |
| Obr. 2 Tvarově složité součásti vyrobené metodou elektroerozivního drátového řezání.[4] ... | 10 |
| Obr. 1.1 Materiály, ze kterých je vyrobeno letadlo Boeing 787 Dreamliner. [6] | 11 |
| Obr. 1.2 Povrch součásti vytvořený elektroerozivním obráběním a frézováním. [16] | 16 |
| Obr. 2.1 Lazarenkovo zapojení. [18]..... | 17 |
| Obr. 2.2 Fáze výboje 1, 2 a 3. [20]..... | 19 |
| Obr. 2.3 Fáze výboje 4, 5 a 6. [20]..... | 19 |
| Obr. 2.4 Fáze výboje 7, 8 a 9. [20]..... | 20 |
| Obr. 2.5 Kráter, který byl vytvořen elektroerozivním obráběním. [21]..... | 20 |
| Obr. 2.6 Znázornění parametru q . [17]..... | 21 |
| Obr. 2.7 Časový průběh výboje. [17] | 22 |
| Obr. 2.8 Schéma RC obvodu s časovým průběhem napětí a proudu. [19]..... | 23 |
| Obr. 2.9 Schéma RLC obvodu s časovým průběhem napětí a proudu. [19] | 24 |
| Obr. 2.10 Schéma rotačního generátoru s časovým průběhem napětí a proudu. [19]..... | 24 |
| Obr. 2.11 Schéma polovodičového generátoru. [19]..... | 25 |
| Obr. 2.12 Měděné elektrody s tvarově složitým vnitřním profilem. [26]..... | 26 |
| Obr. 2.13 Grafitová elektroda. [27]..... | 26 |
| Obr. 2.14 Jednoduché mosazné elektrody. [28]..... | 26 |
| Obr. 2.15 Měděný drát. [31] | 28 |
| Obr. 2.16 Mosazný drát. [34]..... | 28 |
| Obr. 2.17 Pozinkovaný drát. [35]..... | 29 |
| Obr. 2.18 Řez různými typy povlakovaného drátu. [36] | 29 |
| Obr. 2.19 Znázornění styku plazmového kanálu s elektrodou. [19] | 30 |
| Obr. 2.20 Opotřebení na hloubicí elektrodě. [18] | 31 |
| Obr. 2.21 Princip obrábění bez opotřebení nástroje. [18]..... | 31 |
| Obr. 2.22 Hloubení v dielektriku na bázi petroleje. [39]..... | 33 |
| Obr. 2.23 Zobrazení přívodu dielektrika vstřikováním (vlevo) a nasáváním (vpravo). [18] ... | 35 |
| Obr. 2.24 Externí přívod dielektrika. [18] | 35 |
| Obr. 2.25 Princip vibračního vyplachování. [18]..... | 36 |
| Obr. 2.26 Ukázka přetavené vrstvy, která vznikla elektroerozivním obráběním. [42] | 36 |
| Obr. 2.27 Stupnice VDI 3400. [44]..... | 37 |
| Obr. 2.28 Ukázka hloubení. [46]..... | 38 |
| Obr. 2.29 Vliv tvaru elektrody na výsledný profil. [18]..... | 39 |
| Obr. 2.30 Princip elektroerozivního řezání. [18] | 39 |
| Obr. 2.31 Princip vzniku zářezu. [18] | 40 |
| Obr. 2.32 Řezání skloněné plochy použitím metody vyosených vodiček. [47] | 40 |
| Obr. 2.33 Princip elektroerozivního broušení. [18]..... | 41 |
| Obr. 2.34 Díra vyrobená elektroerozivním obráběním. [49] | 41 |

| | |
|--|----|
| Obr. 3.1 Brněnská pobočka firmy PENTA TRADING. [52] | 43 |
| Obr. 3.2 Polotovary určený pro experiment. | 44 |
| Obr. 3.3 Spektrometr PMI-Master Pro2. [55] | 44 |
| Obr. 3.4 Vzorek s viditelnými stopami vzniklými po měření chemického složení. | 45 |
| Obr. 3.5 Elektroerozivní drátová řezačka FANUC ROBOCUT α -C600iB. | 46 |
| Obr. 3.6 Vzorek pro první část experimentu. | 47 |
| Obr. 3.7 Vzorek pro druhou část experimentu. | 47 |
| Obr. 3.8 Řezací dráty, které byly použity pro experiment. | 49 |
| Obr. 3.9 Výměna spodní trysky. | 50 |
| Obr. 3.10 Ustavení polohy kalibrační kostky. | 50 |
| Obr. 3.11 Detail nastavení vzdálenosti mezi vrchní tryskou a kalibrační kostkou. | 50 |
| Obr. 3.12 Detail dotyku řezacího drátu a kalibrační kostky. | 50 |
| Obr. 3.13 Systém kladek, přes které je veden drát a schéma pro jeho navlečení. | 51 |
| Obr. 3.14 Řezání polotovaru. | 52 |
| Obr. 3.15 Řezání vzorků. | 52 |
| Obr. 3.16 Počet protržení drátu u jednotlivých vzorků. | 53 |
| Obr. 3.17 Rychlost řezání dosažená u jednotlivých vzorků. | 54 |
| Obr. 3.18 Spotřeba drátu při řezání jednotlivých vzorků. | 54 |
| Obr. 3.19 Hodnoty parametru Ra dosažené na jednotlivých vzorcích. | 56 |
| Obr. 3.20 Hodnoty parametru Rz dosažené na jednotlivých vzorcích. | 56 |
| Obr. 3.21 Profilometr Bruker Dektak XT. [60] | 57 |
| Obr. 3.22 Elektronový mikroskop TESCAN LYRA 3. [61] | 57 |
| Obr. 3.23 Morfologie povrchu vzorku 2/7. | 57 |
| Obr. 3.24 Morfologie povrchu vzorku 2/5. | 57 |
| Obr. 3.25 Nový drát typu B. | 58 |
| Obr. 3.26 Detail použitého drátu typu B. | 58 |
| Obr. 3.27 Vzorky zalité v pryskyřici. | 59 |
| Obr. 3.28 Přetavená vrstva na vzorku 1/14. | 59 |
| Obr. 3.29 Vzorky vyhotovené v druhé části experimentu. | 59 |
| Obr. 3.30 Kontaminace povrchové vrstvy základního materiálu mědí a zinkem | 61 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tab. 1.1 Vlastnosti vybraných leteckých materiálů. [7, 8, 9]..... | 12 |
| Tab. 1.2 Chemické složení vybraných niklových slitin. [1] | 13 |
| Tab. 1.3 Porovnání vybraných nekonvenčních metod obrábění. [13]..... | 16 |
| Tab. 2.1 Charakteristiky popisující výboj. [17] | 21 |
| Tab. 2.2 Vlastnosti vybraných materiálů používaných pro výrobu elektrod. [23] | 27 |
| Tab. 2.3 Porovnání vlastností kapalných a plynných dielektrik. [40]..... | 34 |
| Tab. 2.4 Porovnání hodnot kvality povrchu podle VDI 3400 a Ra. [45] | 37 |
| Tab. 2.5 Vedlejší produkty vznikající při elektroerozivním obrábění. [18, 22] | 42 |
| Tab. 3.1 Chemické složení slitiny NIMONIC 263. [53] | 43 |
| Tab. 3.2 Vybrané vlastnosti slitiny NIMONIC 263. [54]..... | 44 |
| Tab. 3.3 Chemické složení vzorku. | 45 |
| Tab. 3.4 Technické parametry stroje FANUC ROBOCUT α -C600iB. [56] | 46 |
| Tab. 3.5 Technologie pro dosažení kvality povrchu Ra = 2,9 μm | 48 |
| Tab. 3.6 Technologie pro dosažení kvality povrchu Ra = 0,5 μm | 48 |
| Tab. 3.7 Parametry drátů, které byly použity v experimentu. [57, 58, 59]..... | 49 |
| Tab. 3.8 Data naměřena v první části experimentu. | 53 |
| Tab. 3.9 Data naměřena v druhé části experimentu. | 55 |
| Tab. 3.10 Chemické složení drátů. | 60 |
| Tab. 3.11 Chemické složení povrchové vrstvy jednotlivých vzorků. | 60 |

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Morfologie povrchu vzorků

Příloha 2: Morfologie povrchu drátů

Příloha 3: Mikrostruktura vzorků

Příloha 4: Chemické složení drátů před obráběním

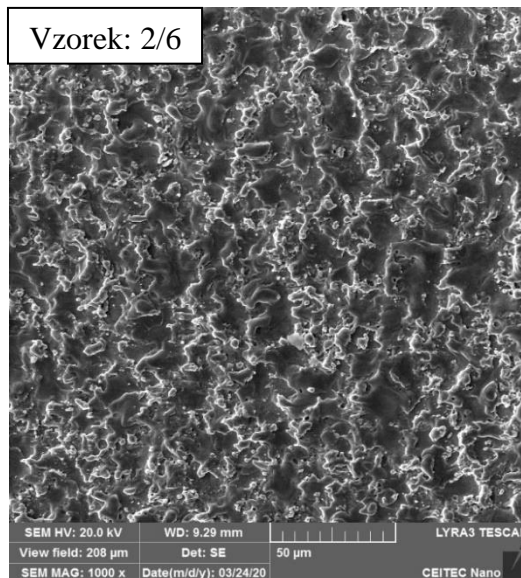
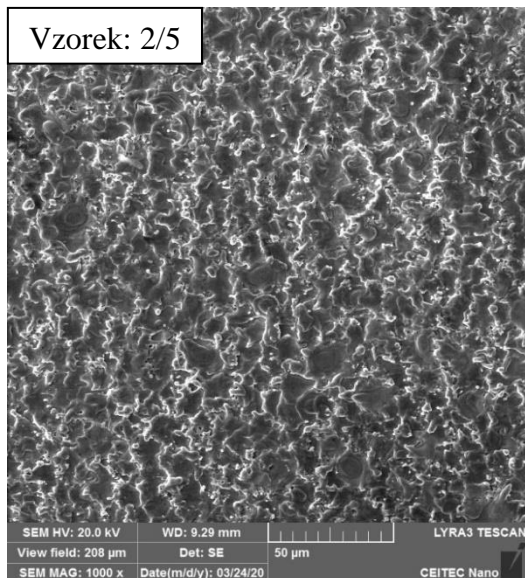
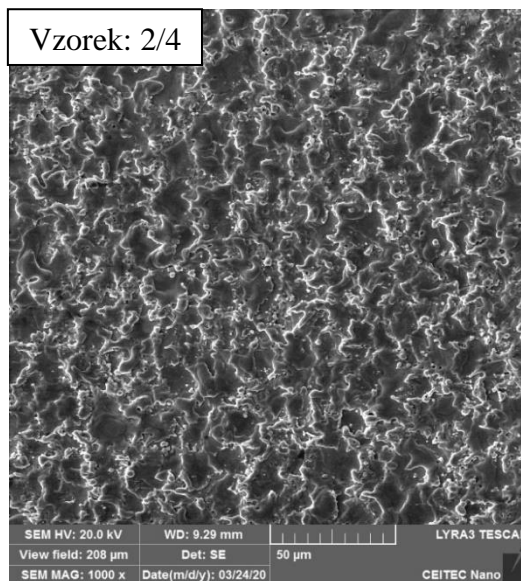
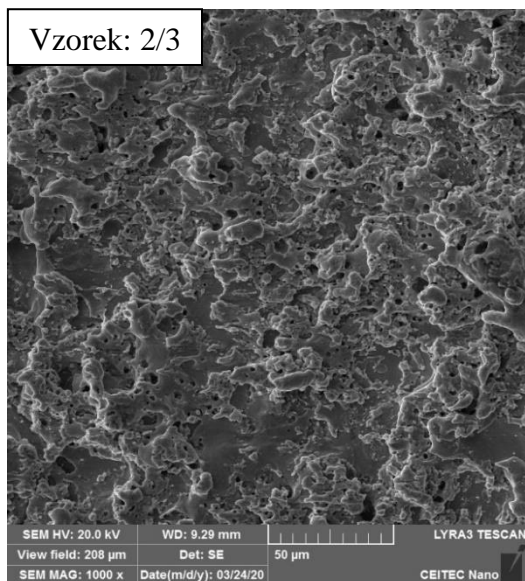
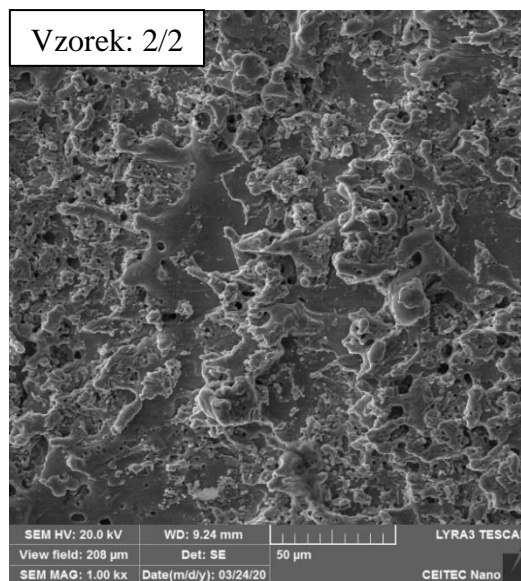
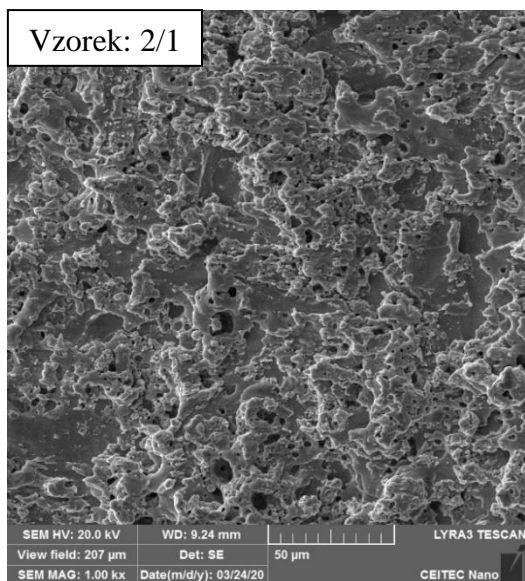
Příloha 5: Chemické složení drátů po obrábění

Příloha 6: Chemické složení vzorků

Příloha 7: Tabulka chemického složení vzorků

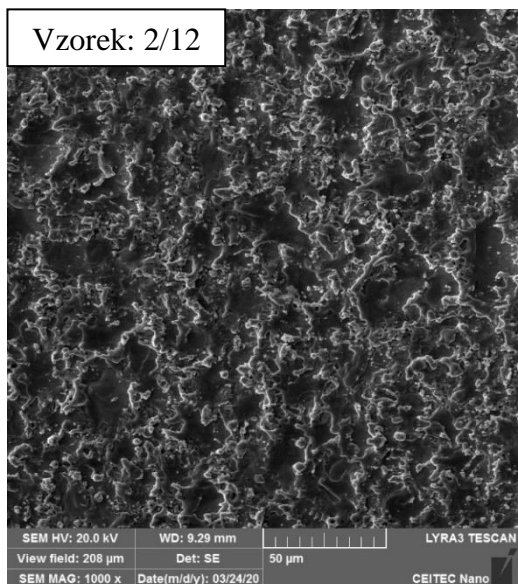
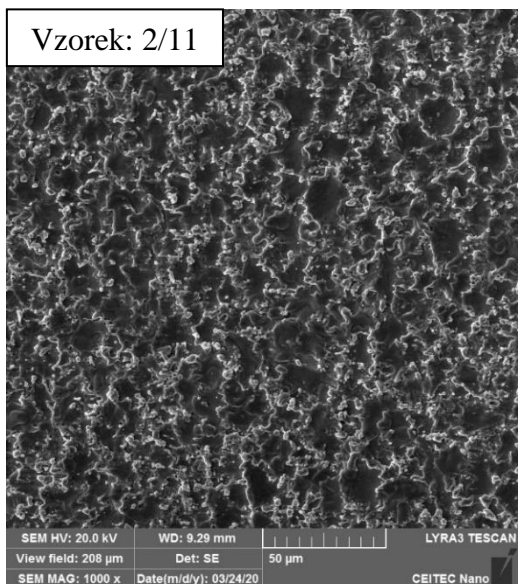
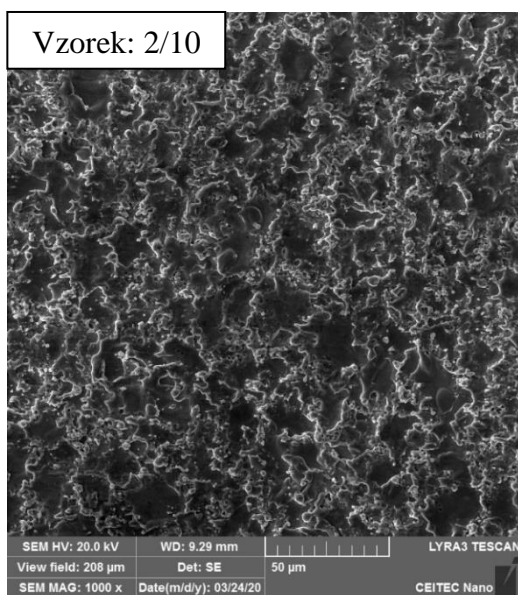
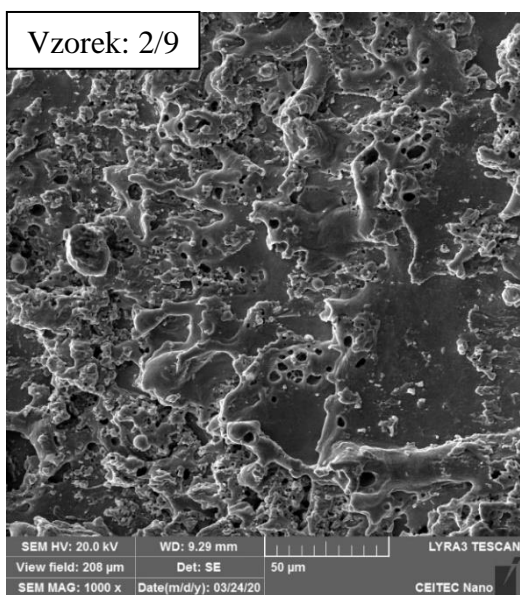
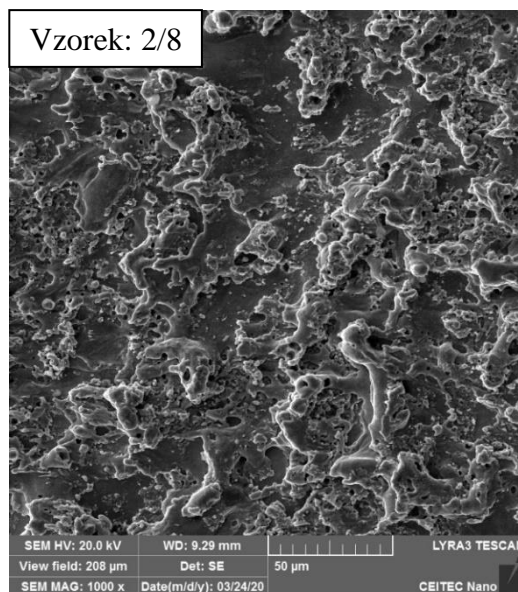
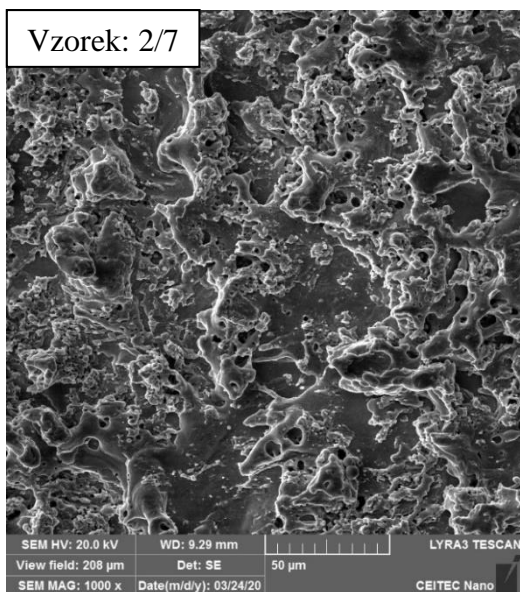
PŘÍLOHA 1, 1/3

Morfologie povrchu vzorků

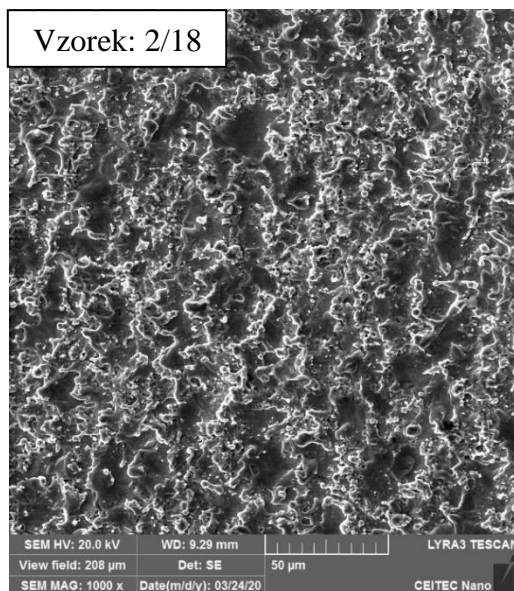
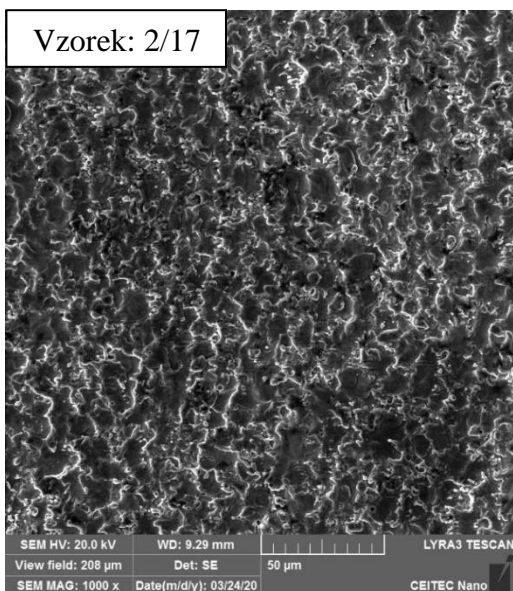
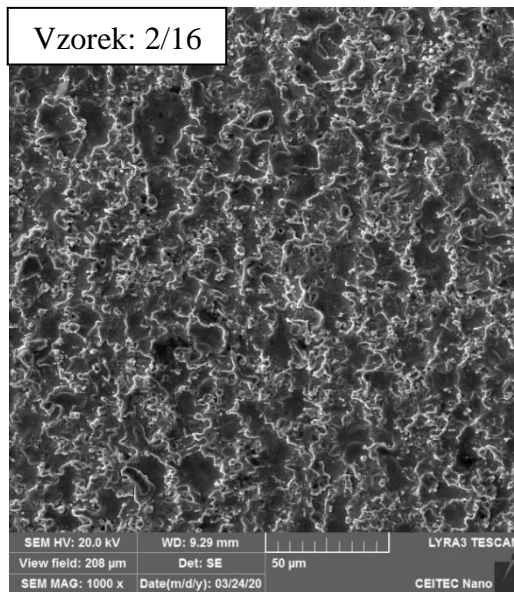
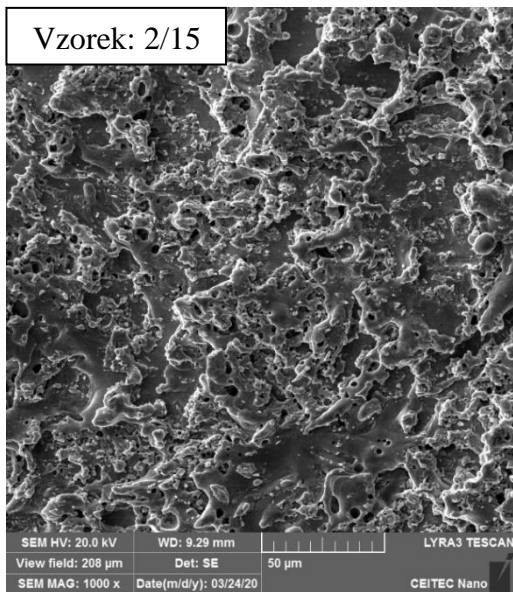
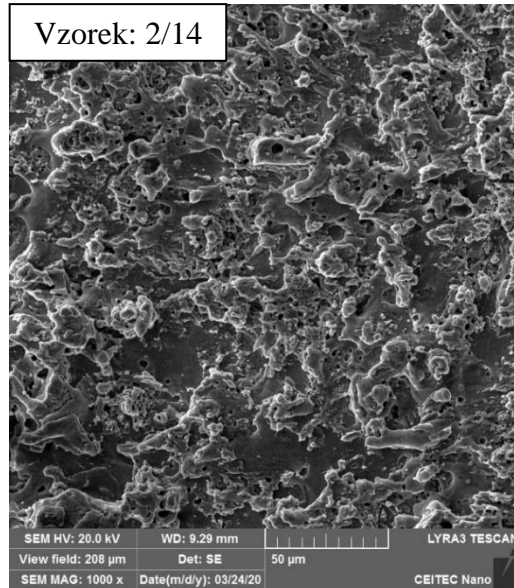
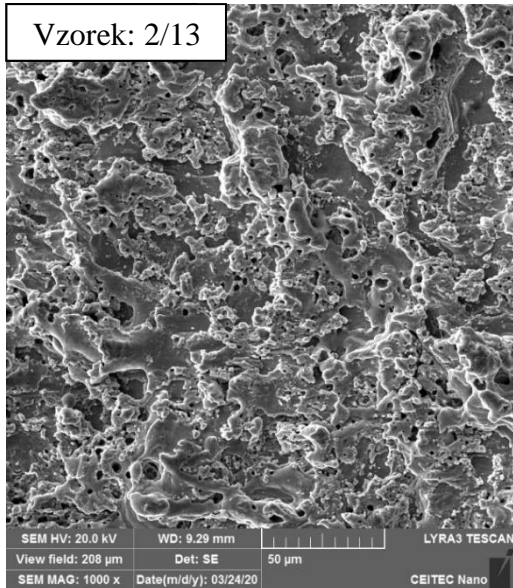


PŘÍLOHA 1, 2/3

Morfologie povrchu vzorků

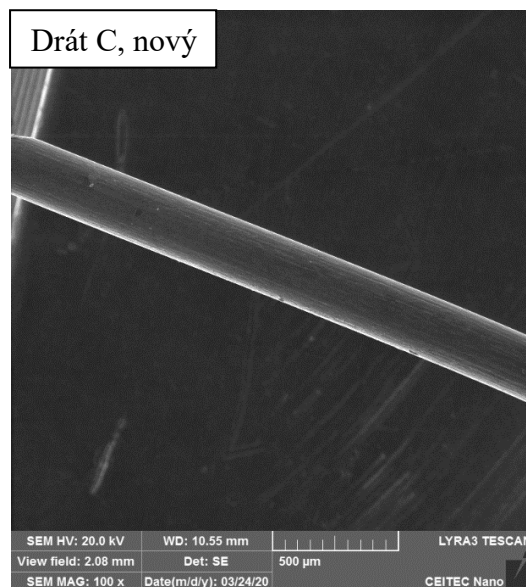
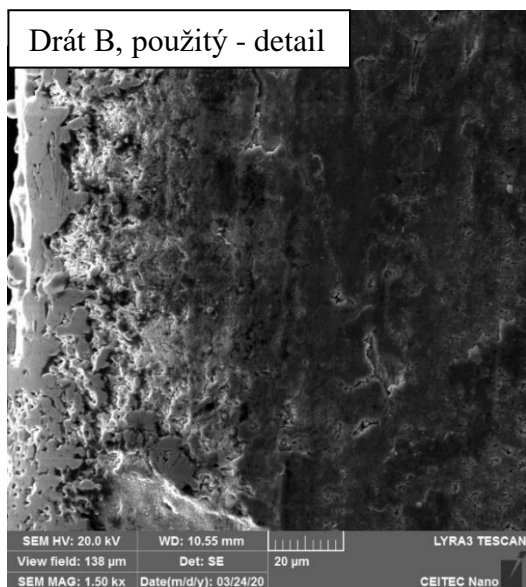
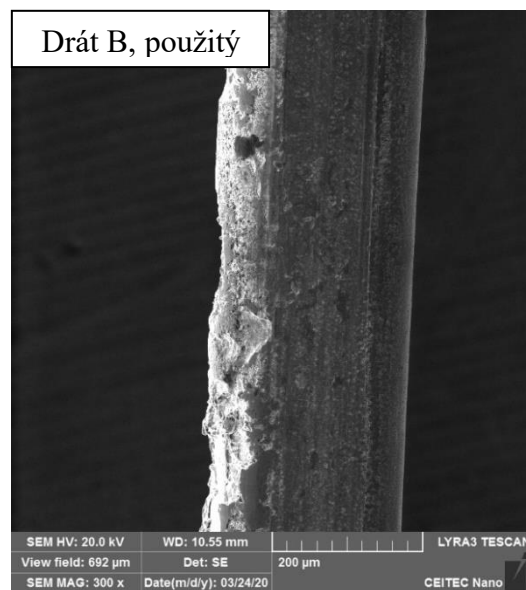
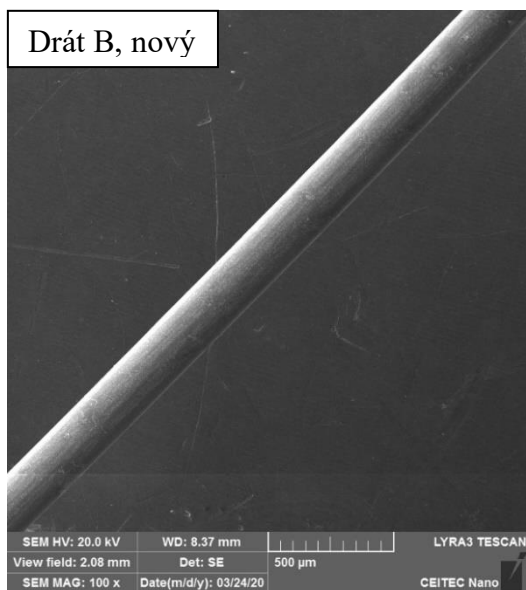
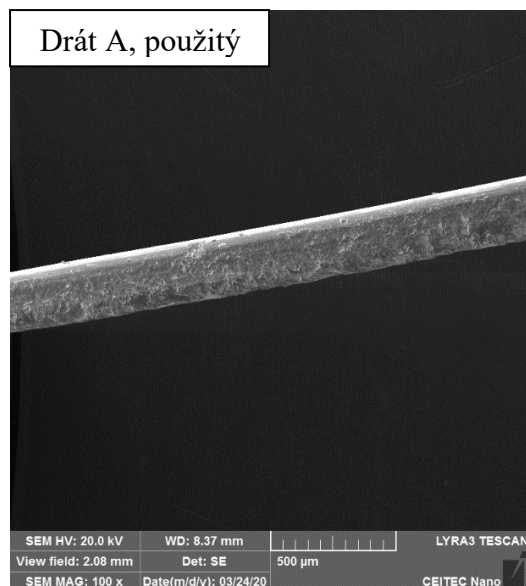
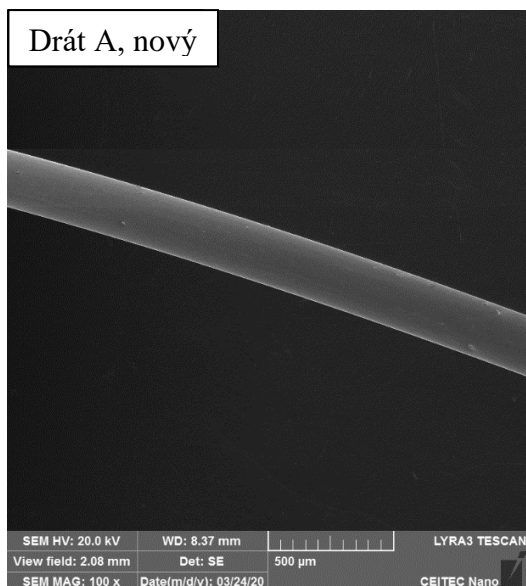


PŘÍLOHA 1, 3/3
Morfologie povrchu vzorků

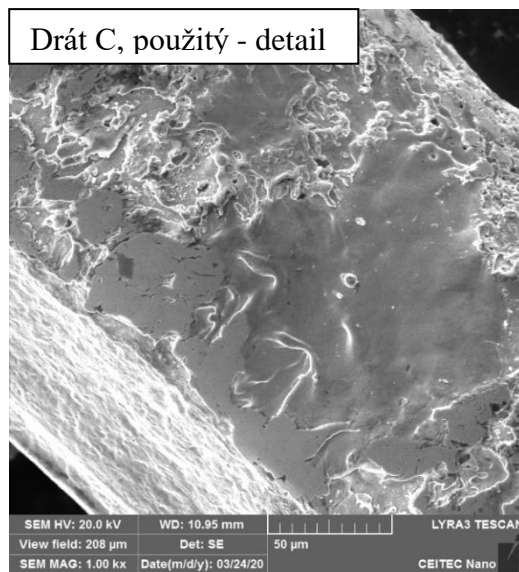
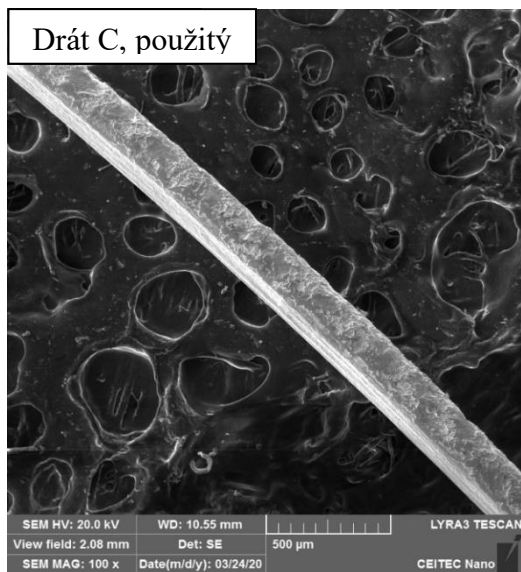


PŘÍLOHA 2, 1/2

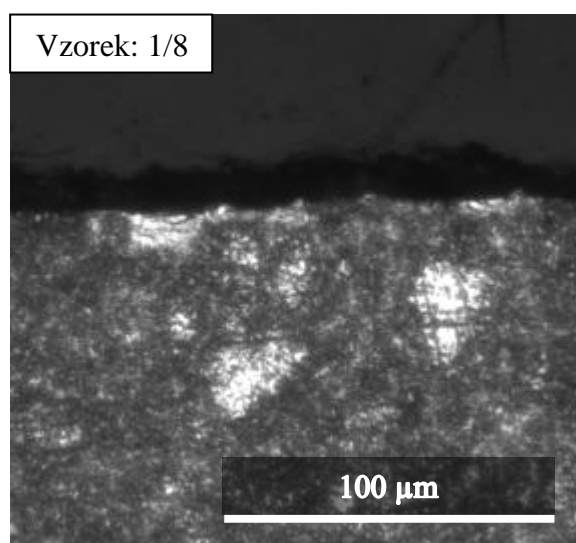
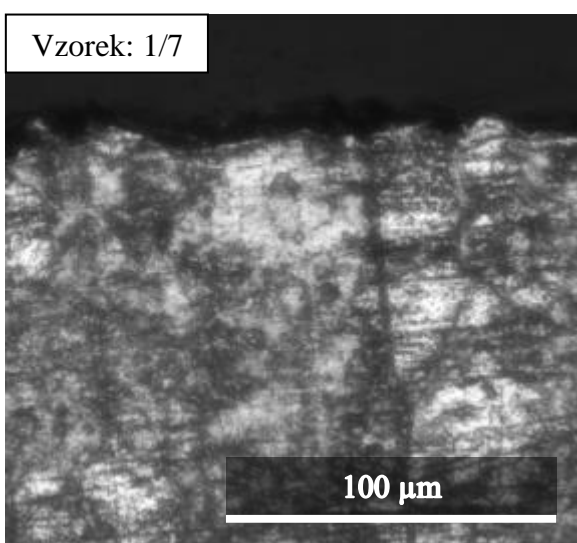
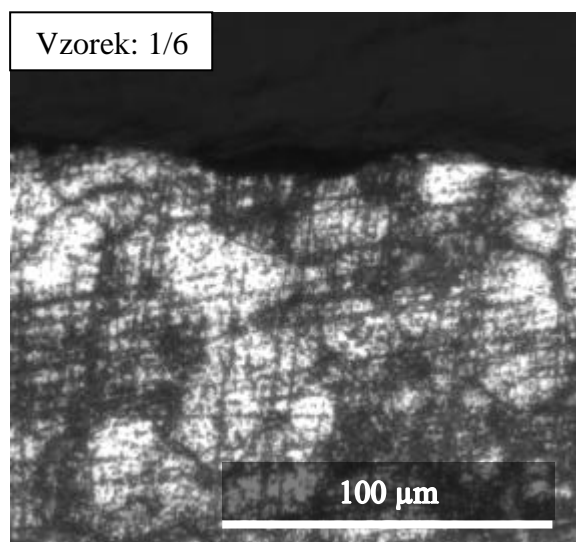
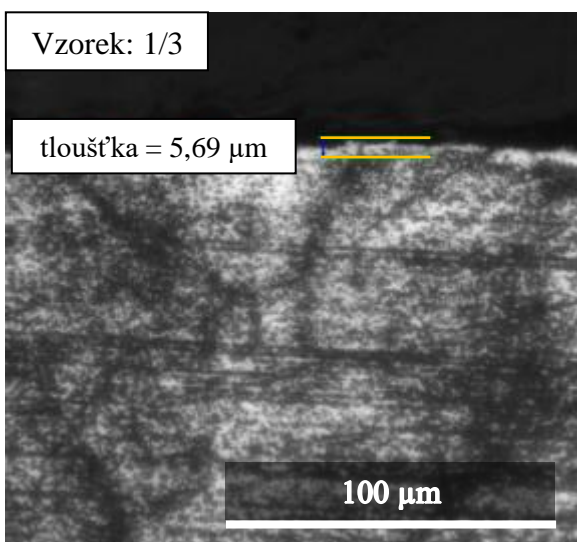
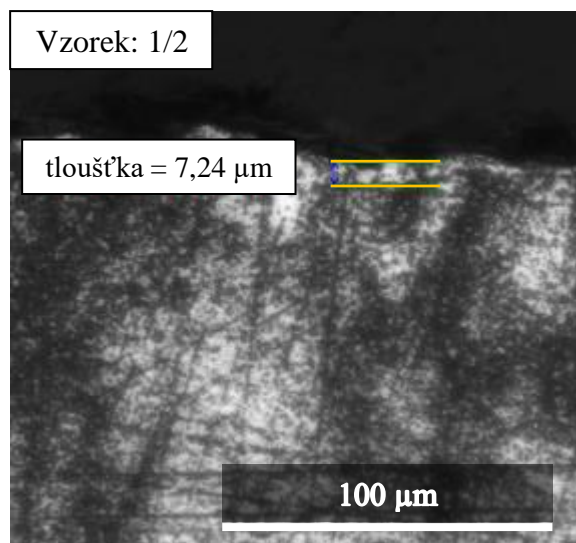
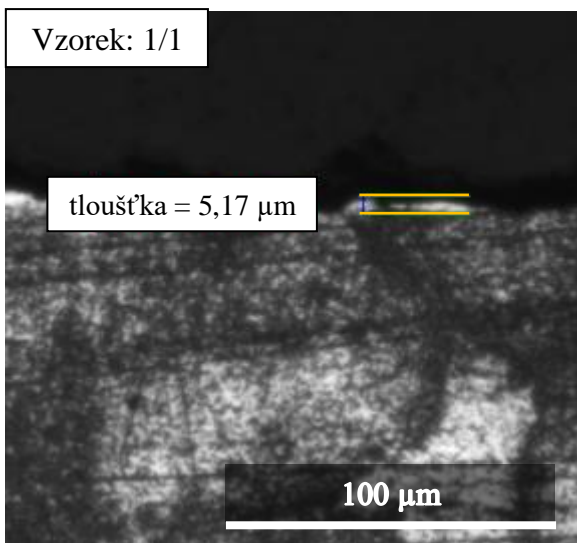
Morfologie povrchu drátů



PŘÍLOHA 2, 2/2
Morfologie povrchu drátů

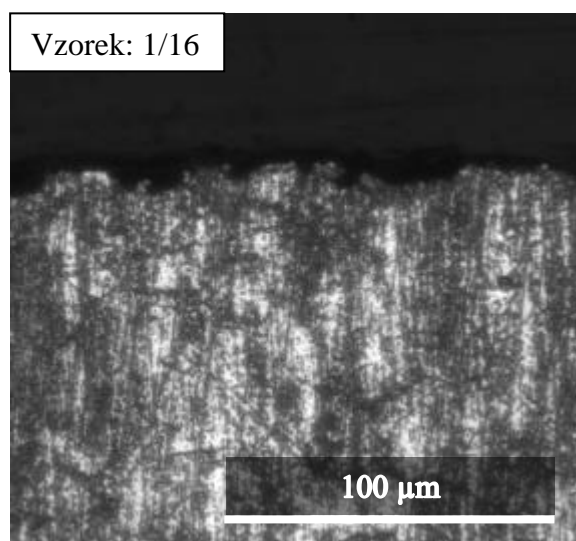
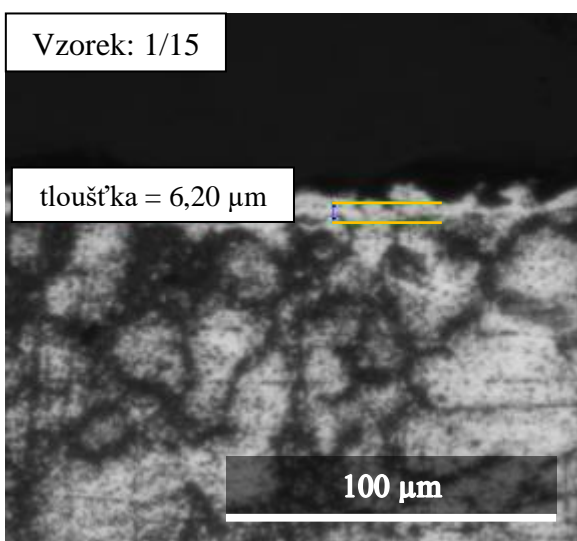
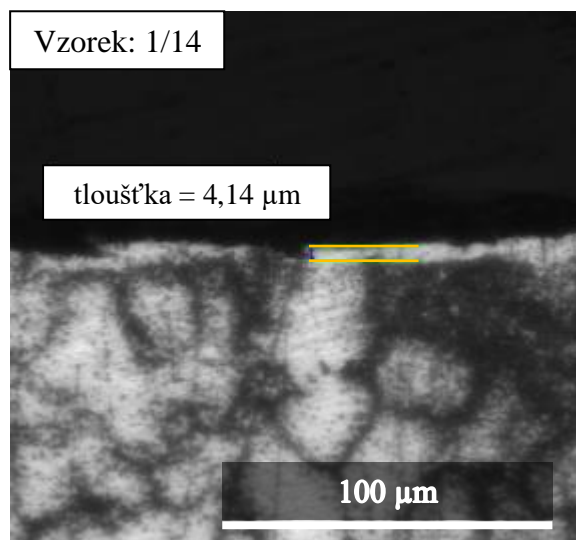
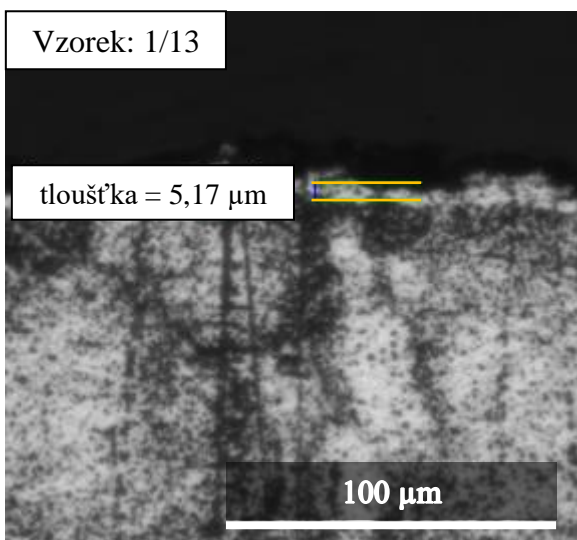
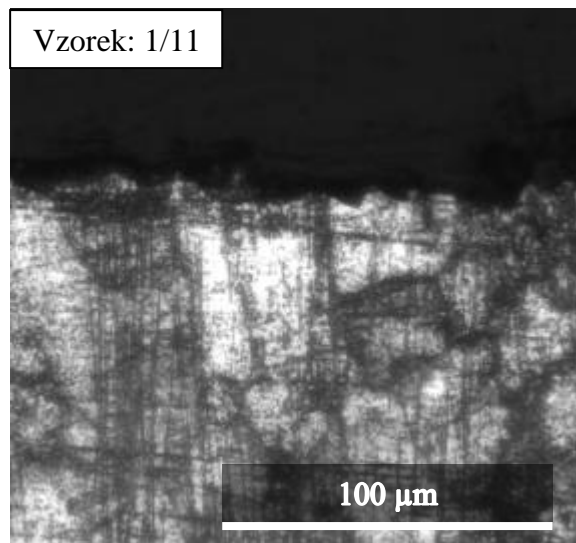
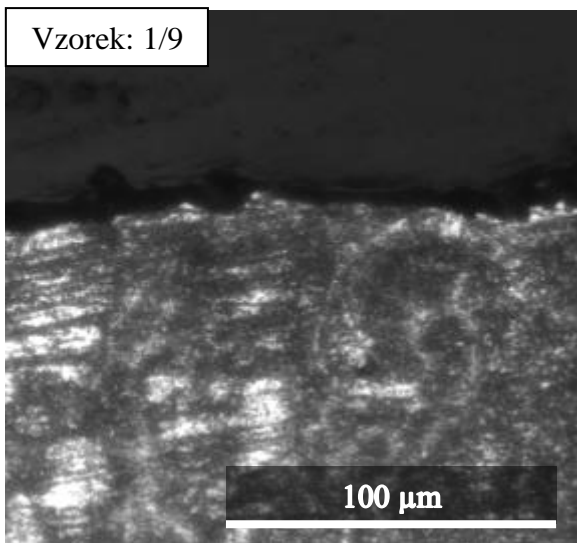


PŘÍLOHA 3, 1/2
Mikrostruktura vzorků



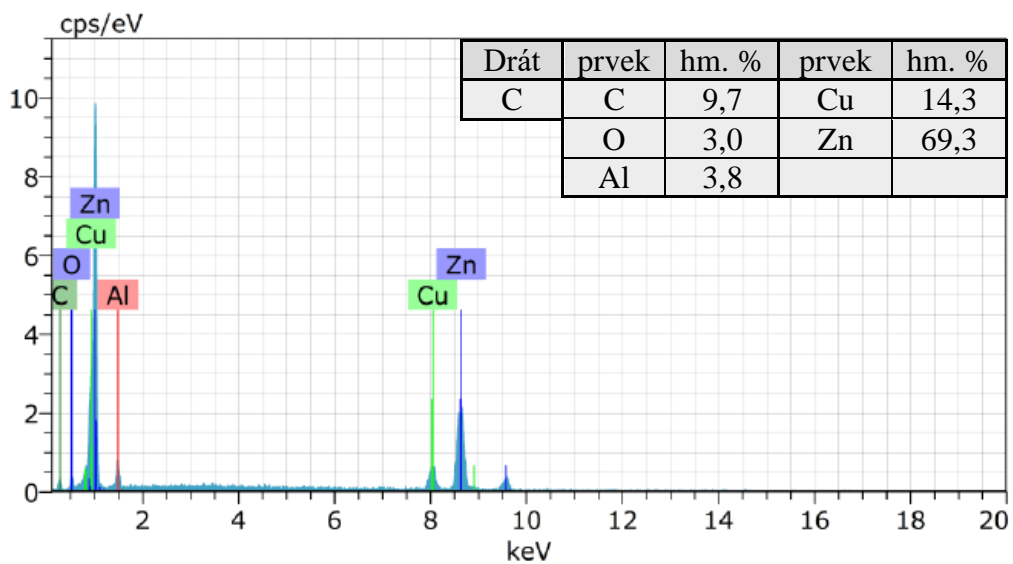
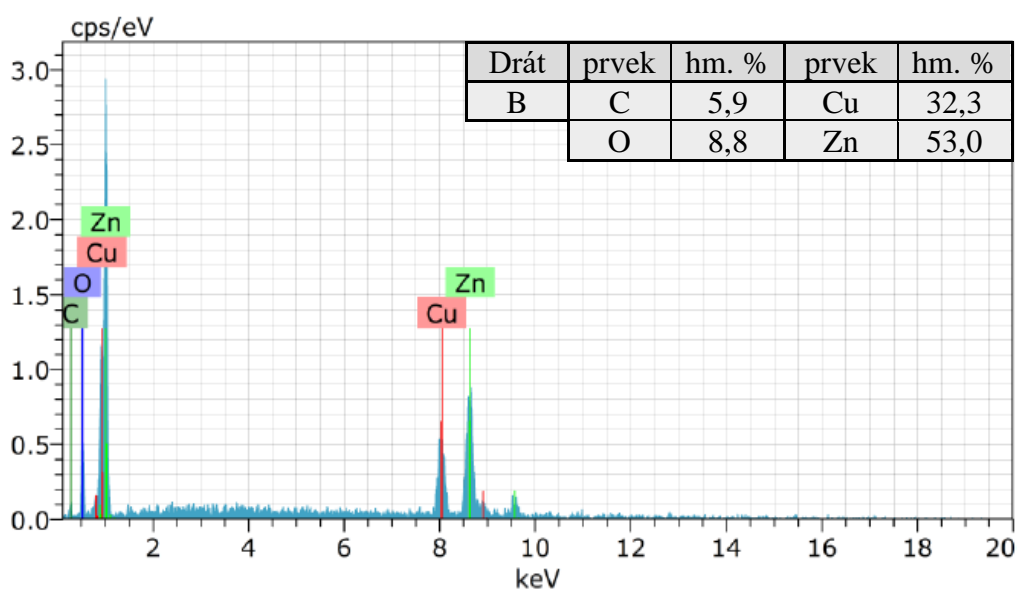
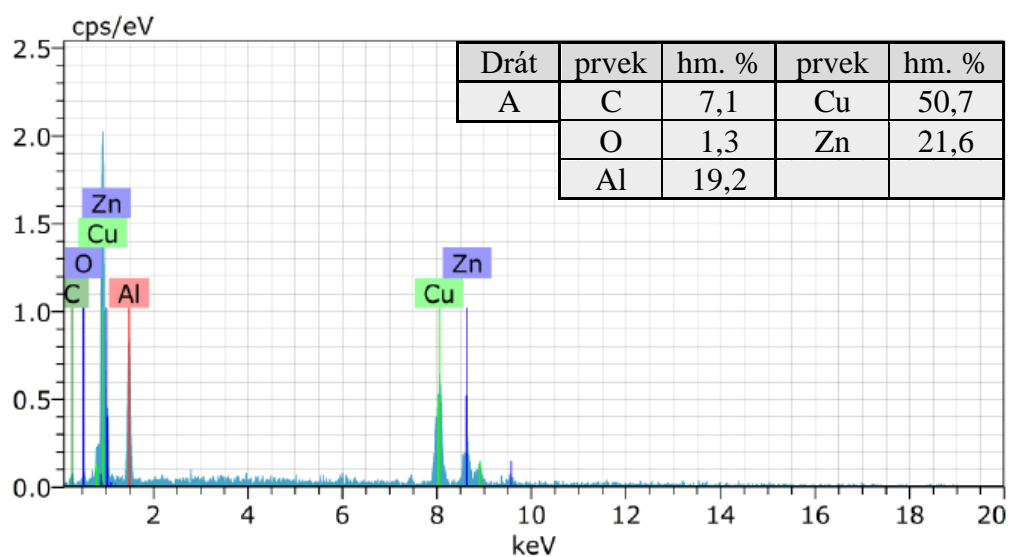
PŘÍLOHA 3, 2/2

Mikrostruktura vzorků



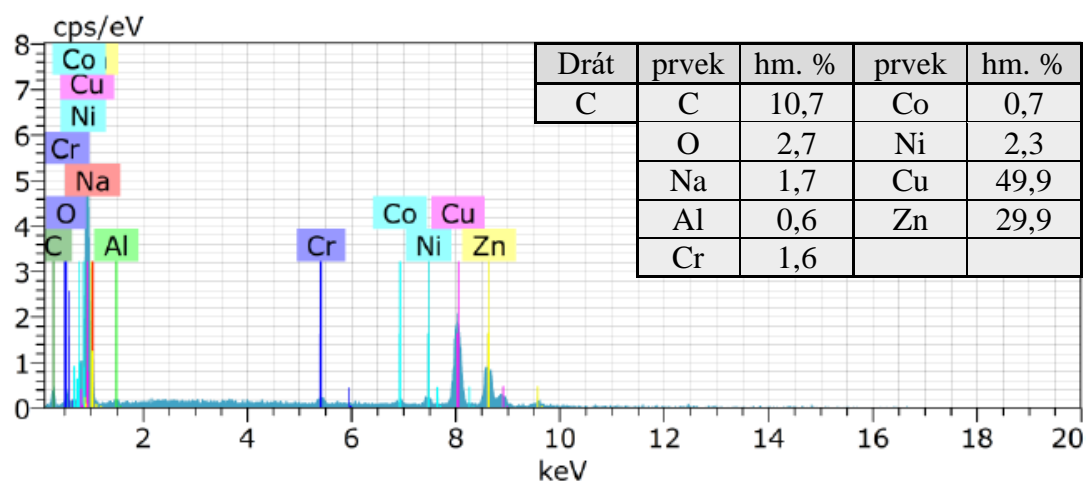
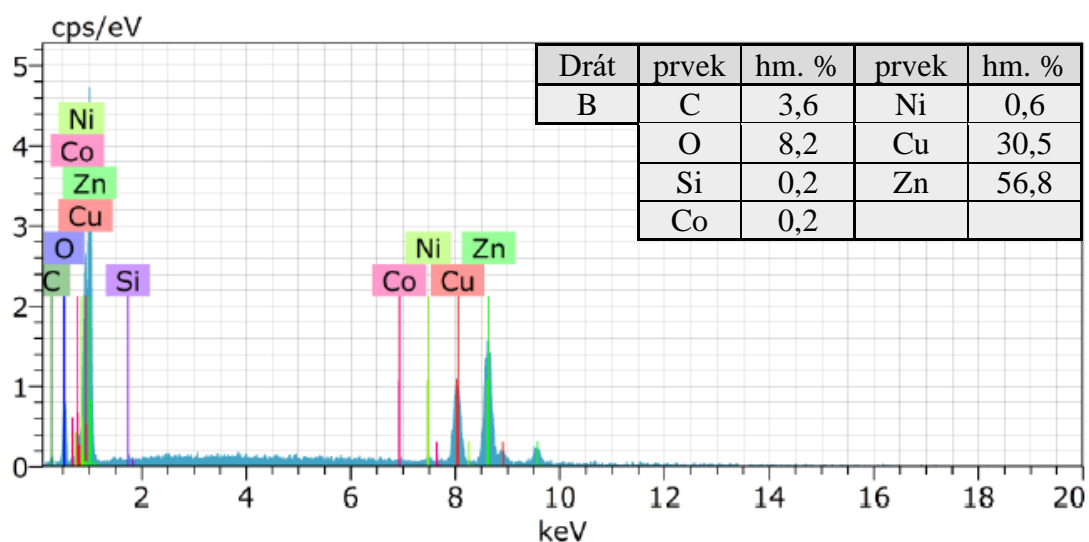
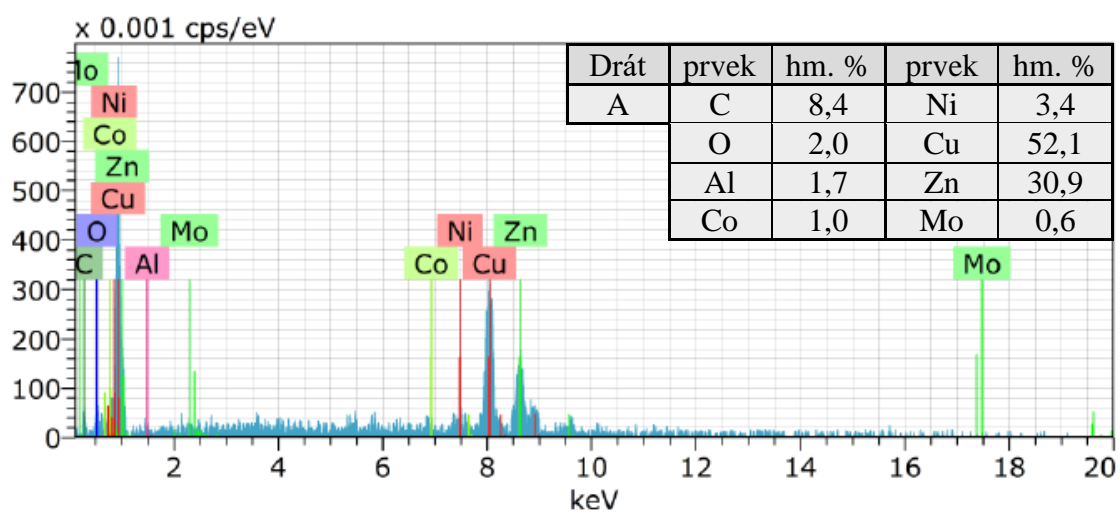
PŘÍLOHA 4

Chemické složení drátů před obráběním

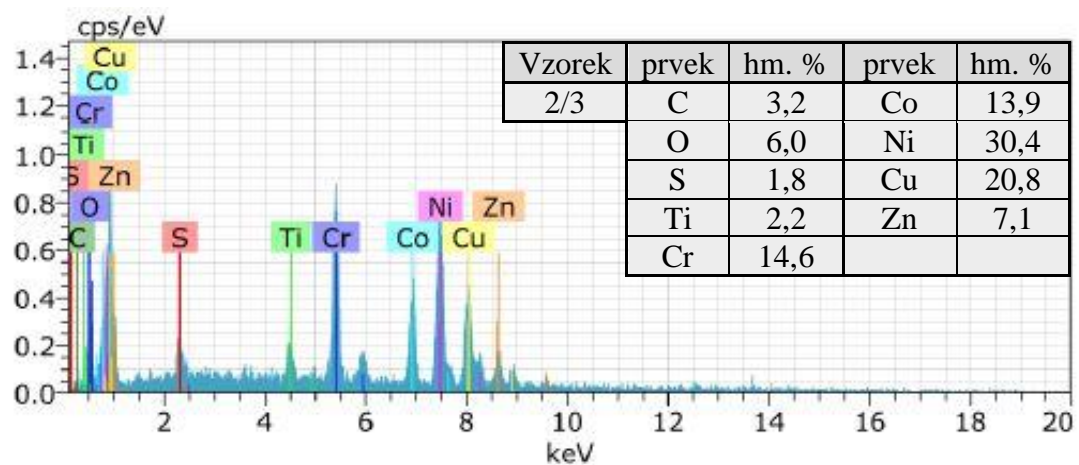
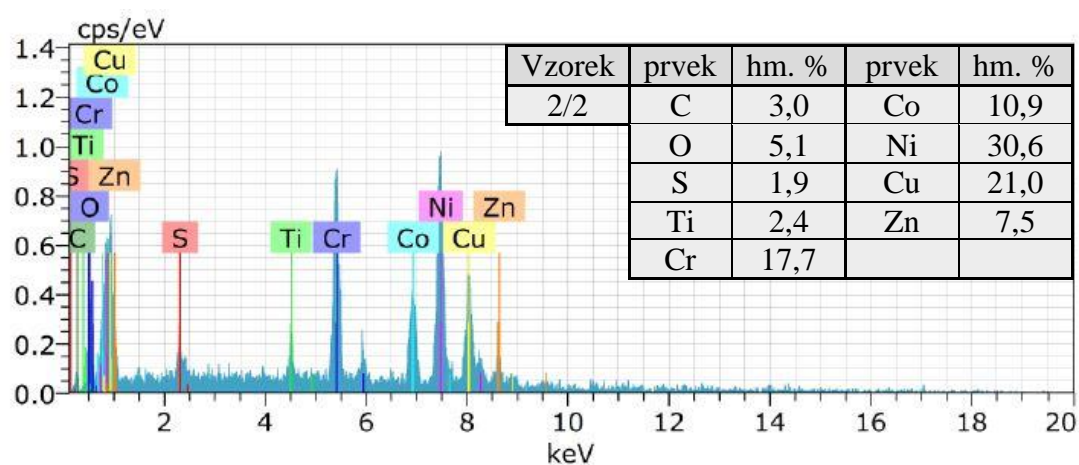
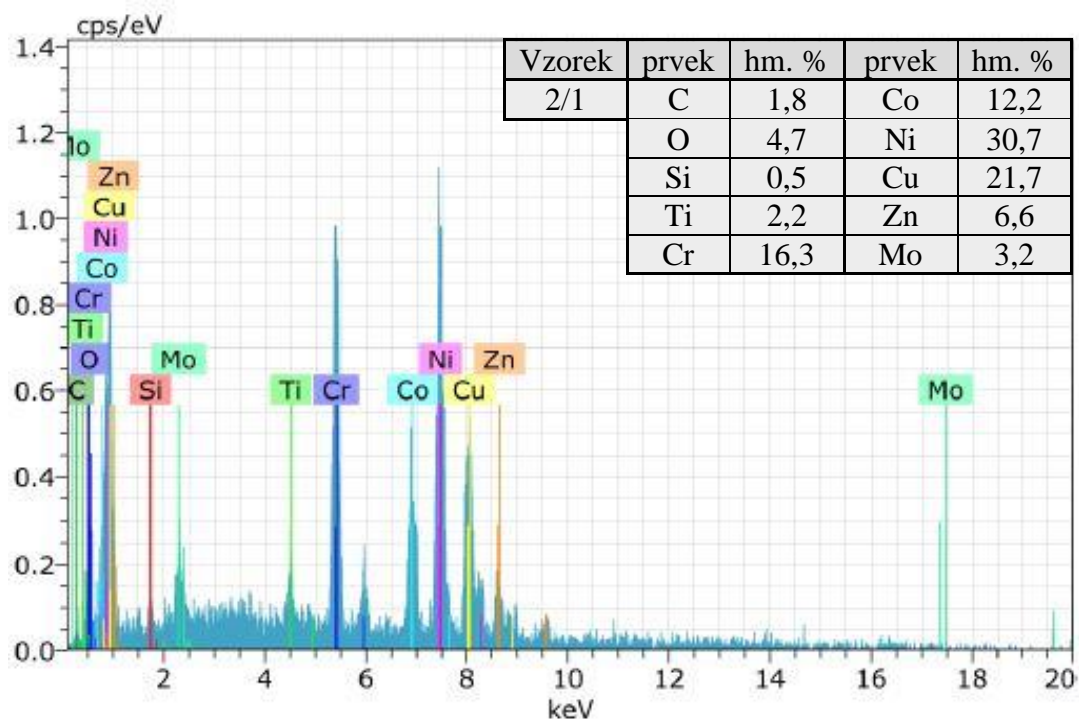


PŘÍLOHA 5

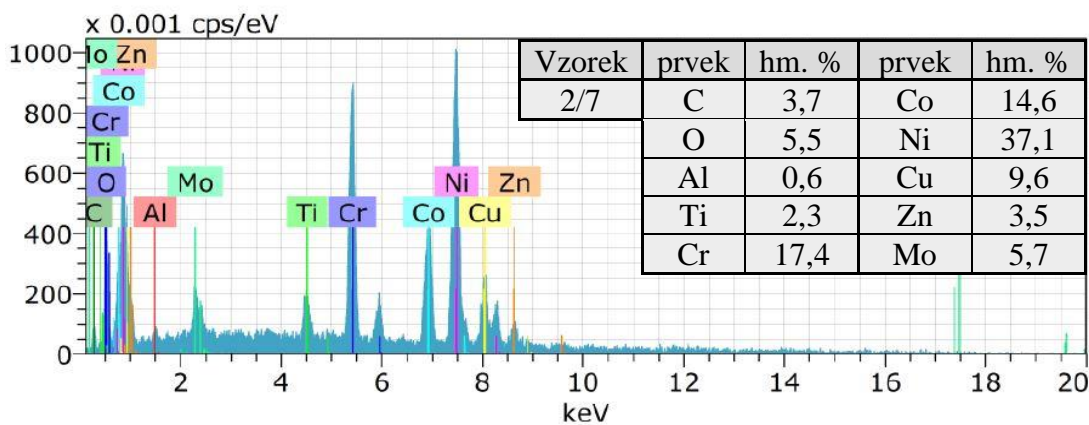
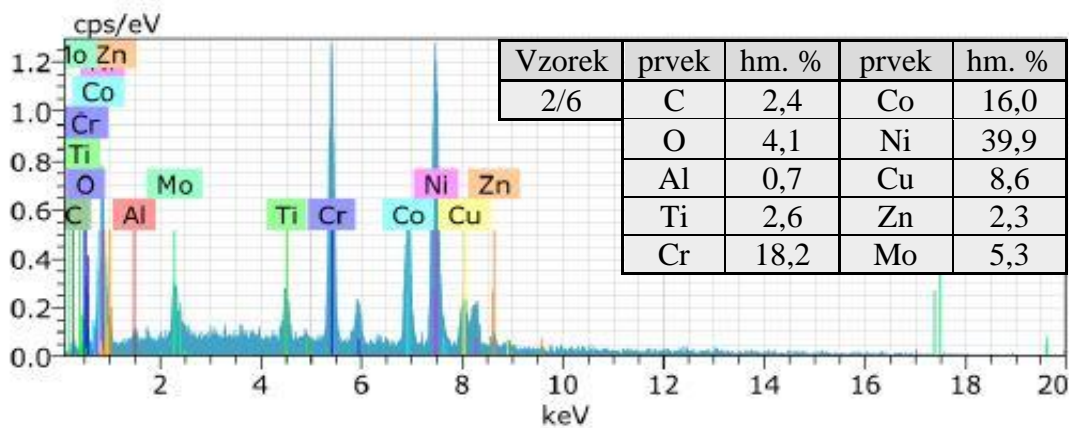
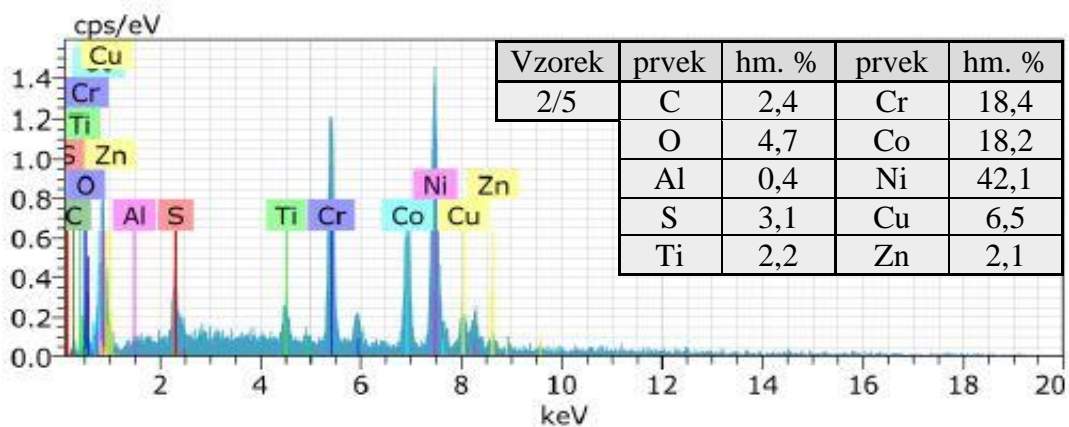
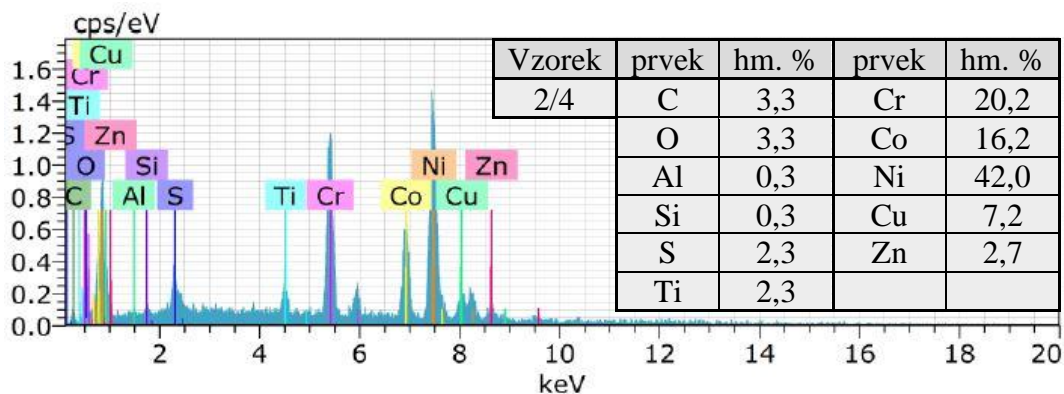
Chemické složení drátů po obrábění



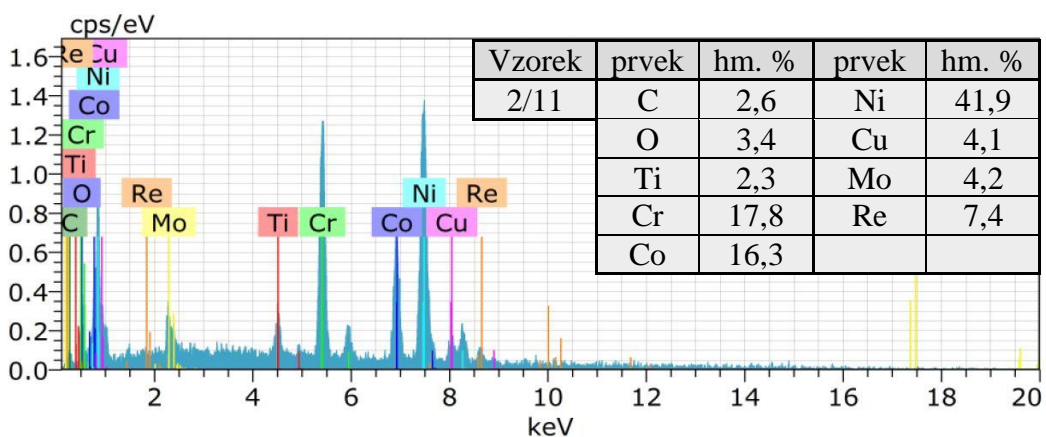
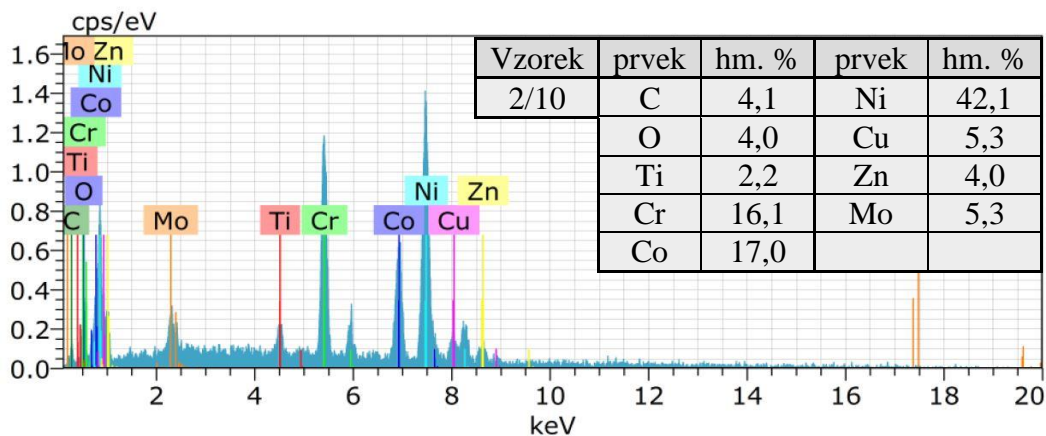
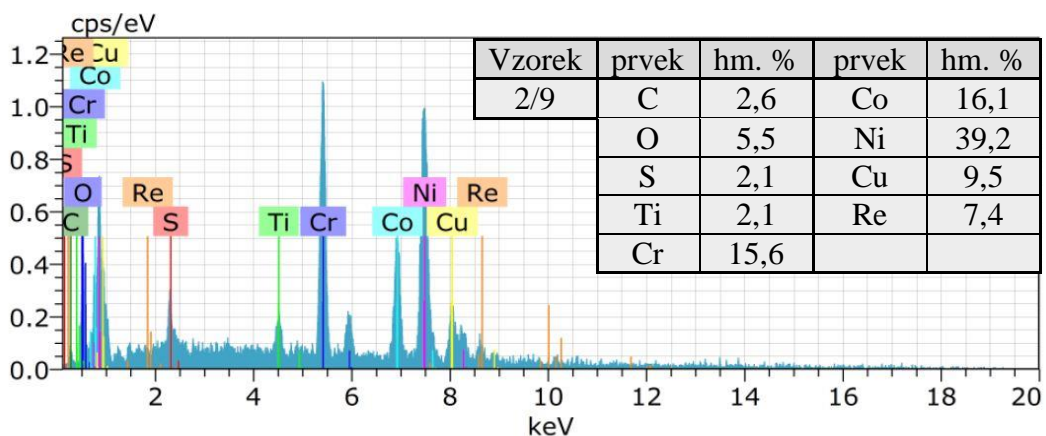
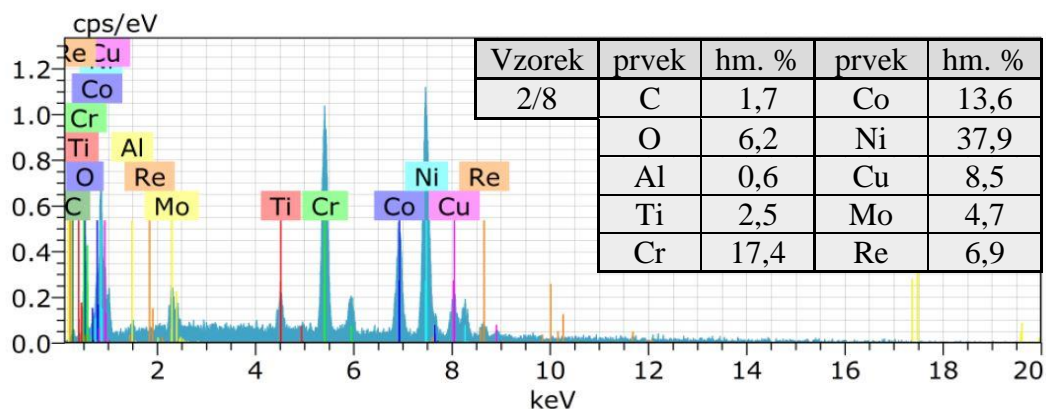
PŘÍLOHA 6, 1/5
Chemické složení vzorků



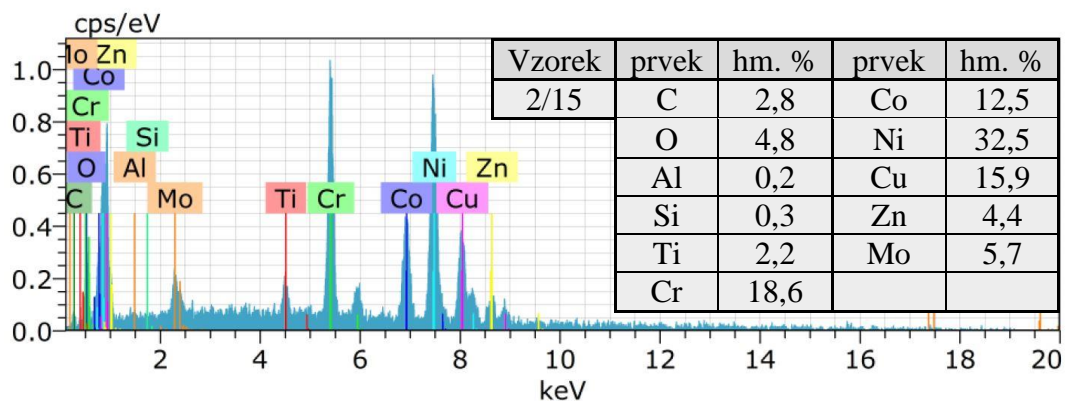
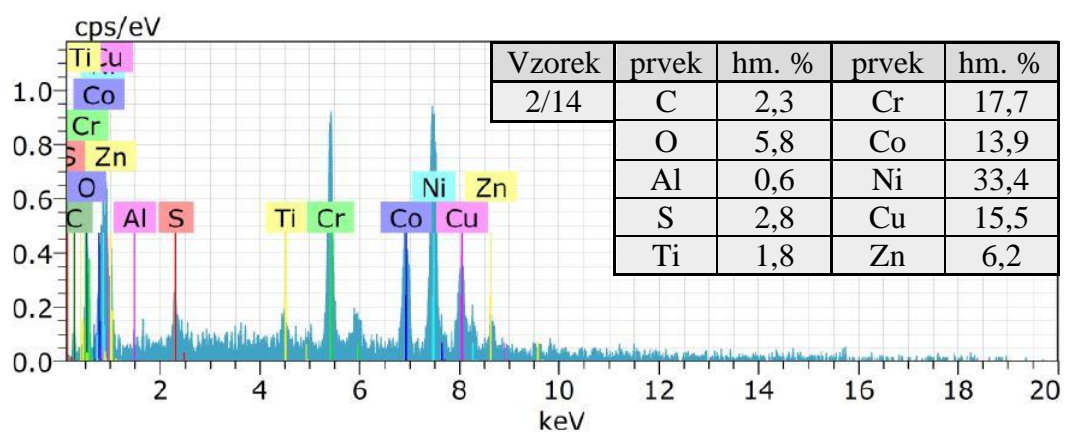
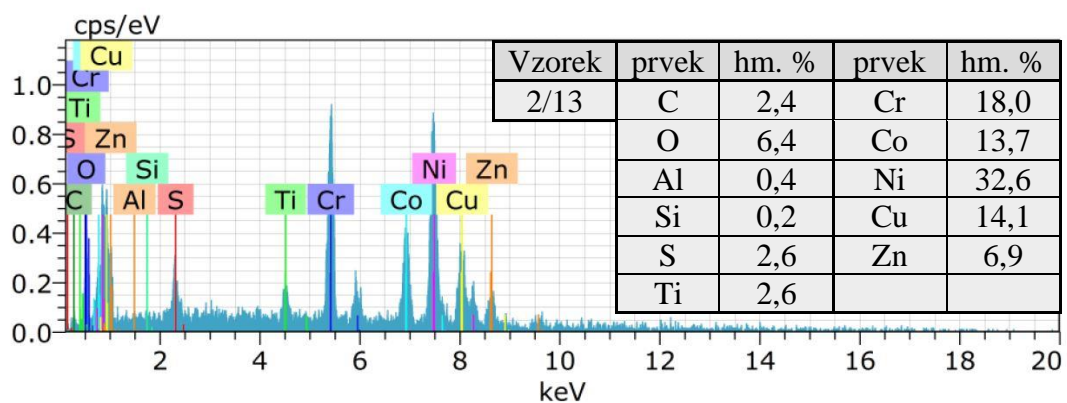
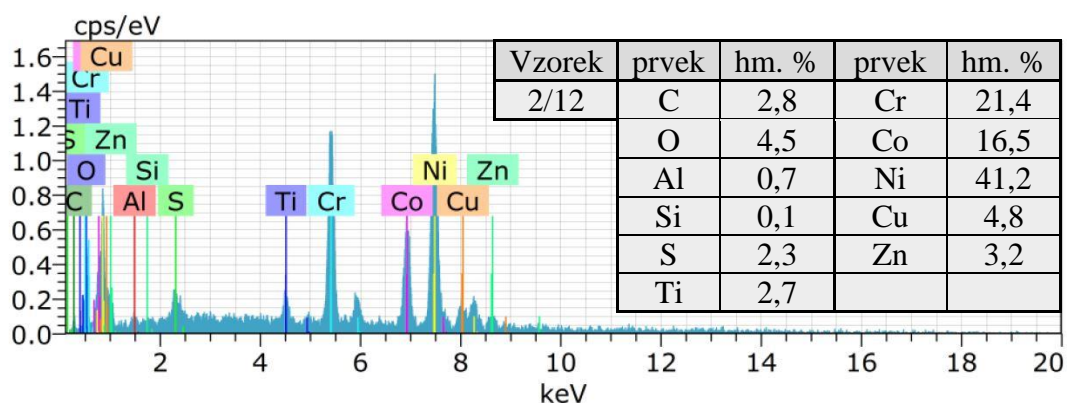
PŘÍLOHA 6, 2/5
Chemické složení vzorků



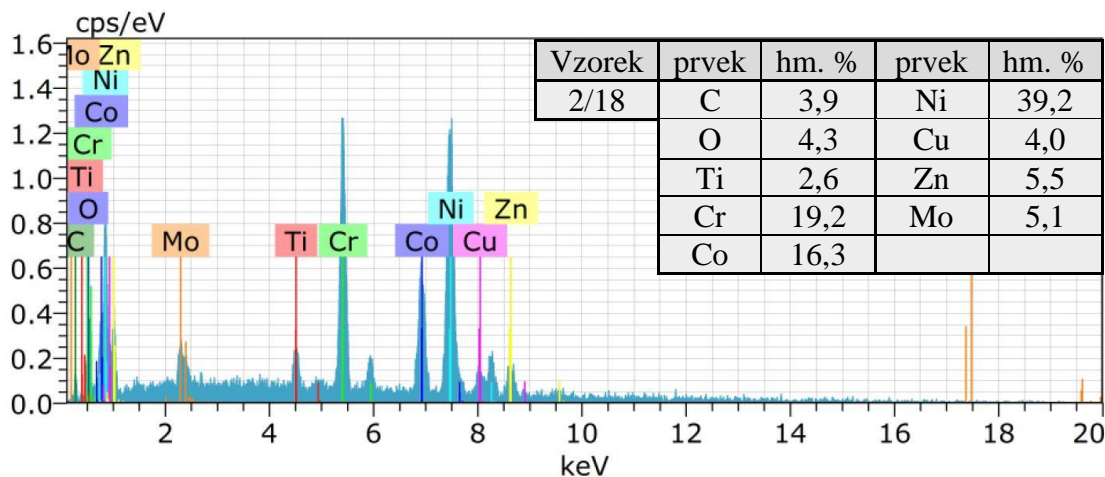
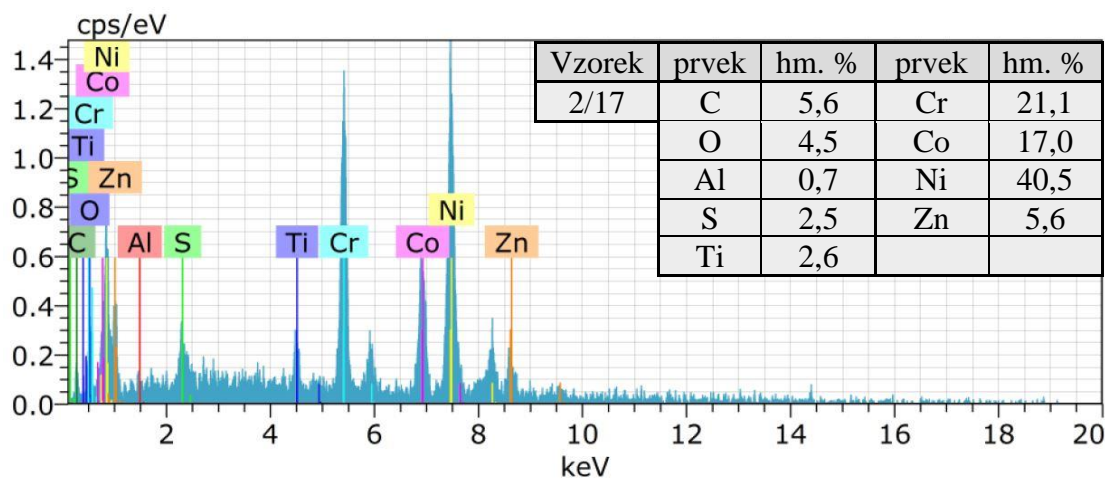
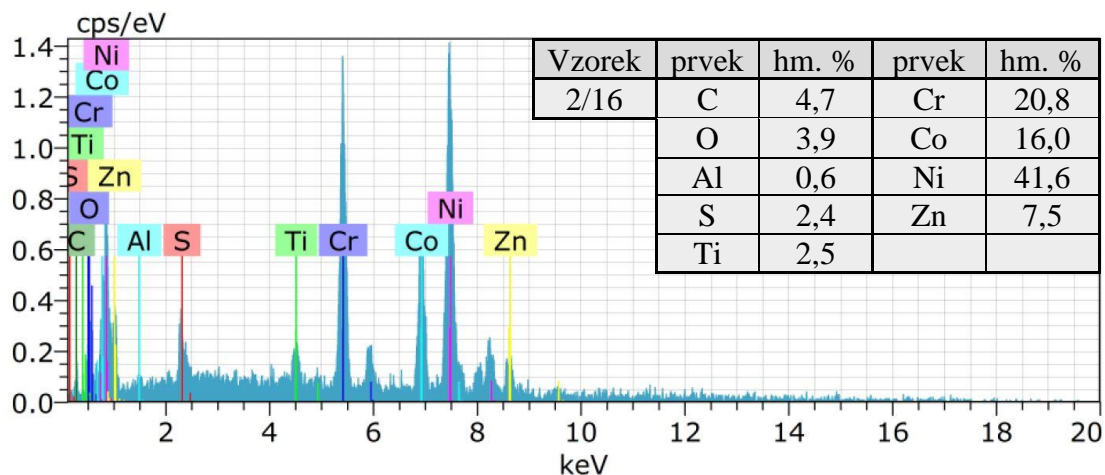
PŘÍLOHA 6, 3/5
Chemické složení vzorků



PŘÍLOHA 6, 4/5
Chemické složení vzorků



PŘÍLOHA 6, 5/5
Chemické složení vzorků



PŘÍLOHA 7

Tabulka chemického složení vzorků

Chemické složení povrchové vrstvy jednotlivých vzorků.

| Označení vzorku | Použitý drát | Použitá technologie | Prvek [hm. %] | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------|---------------------|---------------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | Cu | Zn | Ni | Co | Cr | Ti | Mo | Al | C | O | S | Si | Re |
| 2/1 | A | H1 | 21,7 | 6,6 | 30,7 | 12,2 | 16,3 | 2,2 | 3,2 | – | 1,8 | 4,5 | – | 0,5 | – |
| 2/2 | | H2 | 21,0 | 7,5 | 30,6 | 10,9 | 17,7 | 2,4 | – | – | 3,0 | 5,1 | 1,9 | – | – |
| 2/3 | | H3 | 20,8 | 7,1 | 30,4 | 13,9 | 14,6 | 2,2 | – | – | 0,3 | 3,2 | 6,0 | 1,8 | – |
| 2/4 | | D1 | 7,2 | 2,7 | 42,0 | 16,2 | 20,2 | 2,3 | – | – | 0,4 | 3,3 | 3,3 | 2,3 | 0,3 |
| 2/5 | | D2 | 6,5 | 2,1 | 42,1 | 18,2 | 18,4 | 2,2 | – | – | 0,7 | 2,4 | 4,7 | 3,1 | – |
| 2/6 | | D3 | 8,6 | 2,3 | 39,9 | 16,0 | 18,2 | 2,0 | 5,3 | 0,3 | 2,4 | 4,1 | – | – | – |
| 2/7 | B | H1 | 9,6 | 3,5 | 37,1 | 14,6 | 17,6 | 2,3 | 5,7 | 0,6 | 3,7 | 5,5 | – | – | – |
| 2/8 | | H2 | 8,5 | – | 37,9 | 13,6 | 17,4 | 2,5 | 4,7 | 0,6 | 1,7 | 6,2 | – | – | 6,9 |
| 2/9 | | H3 | 9,5 | – | 39,2 | 16,1 | 15,6 | 2,1 | – | – | 2,6 | 5,5 | 2,1 | – | 7,4 |
| 2/10 | | D1 | 5,3 | 4,0 | 42,1 | 17,0 | 16,1 | 2,2 | 5,3 | – | – | 4,1 | 4,0 | – | – |
| 2/11 | | D2 | 4,1 | – | 41,9 | 16,3 | 17,8 | 2,3 | 4,2 | – | – | 2,6 | 3,4 | – | 7,4 |
| 2/12 | | D3 | 4,8 | 3,2 | 41,2 | 16,5 | 21,4 | 2,7 | – | – | 0,7 | 2,8 | 4,5 | 2,3 | 0,0 |
| 2/13 | C | H1 | 14,1 | 6,9 | 32,6 | 13,7 | 18,0 | 2,6 | – | – | 0,4 | 2,4 | 6,4 | 2,6 | 0,2 |
| 2/14 | | H2 | 15,5 | 6,2 | 33,4 | 13,9 | 17,7 | 1,8 | – | – | 0,6 | 2,3 | 5,8 | 2,8 | – |
| 2/15 | | H3 | 15,9 | 4,4 | 32,5 | 12,5 | 18,6 | 2,2 | 5,7 | 0,2 | 2,8 | 4,8 | – | 0,3 | – |
| 2/16 | | D1 | – | 7,5 | 41,6 | 16,0 | 20,8 | 2,5 | – | – | 0,6 | 4,7 | 3,9 | 2,4 | – |
| 2/17 | | D2 | – | 5,6 | 40,5 | 17,0 | 21,1 | 2,6 | – | – | 0,7 | 5,6 | 4,5 | 2,5 | – |
| 2/18 | | D3 | 4,0 | 5,5 | 39,2 | 16,3 | 19,2 | 2,6 | 5,1 | – | – | 3,9 | 4,3 | – | – |