

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ,  
PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



Diplomová práce

**Optimalizace procesu hloubení děr v  
leteckém průmyslu**

Bc. Tomáš Jílek

2022/2023

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jílek** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **473503**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Optimalizace procesu hloubení děr v leteckém průmyslu**

Název diplomové práce anglicky:

**Optimization of the holes die sinking process in the aerospace industry**

Pokyny pro vypracování:

1. Analýza stávajícího procesu.
2. Návrhy optimalizačních možností.
3. Experimentální ověření návrhů a zvolení optimální varianty.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Pavel Novák, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **31.03.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2023**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Pavel Novák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Anotační list

Jméno autora:	Bc. Tomáš Jílek
Název diplomové práce:	Optimalizace procesu hloubení děr v leteckém průmyslu
Anglický název:	Optimization of the die sinking holes process in the aerospace industry
Akademický rok:	2022/2023
Fakulta:	Fakulta strojní
Studijní program:	Výrobní inženýrství
Obor/specializace:	Bez specializace
Ústav/odbor:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Pavel Novák, Ph.D.
Bibliografické údaje	počet stran: 99 počet obrázků: 69 počet příloh: 6
Klíčová slova:	EDM, elektroerozivní hloubení, elektrojiskrové obrábění, výplach, René 108 DS, niklové superslitiny, chladicí díry, turbovrtulový motor
Keywords:	EDM, electric discharge die sinking, electric discharge machining, flushing, René 108 DS, nickel-based superalloys, cooling holes, turboprop engine
Anotace:	Tato diplomová práce pojednává o možných způsobech optimalizace obráběcího procesu elektrojiskrového hloubení chladicích děr do niklové superslitiny. Návrhy jsou následně experimentálně ověřeny. Data z experimentů jsou v dalším kroku vyhodnocena a porovnána mezi sebou. Výsledkem této práce je doporučení firmě GE Aviation Czech s.r.o.
Abstract:	This masters' thesis discusses possible methods for optimizing the machining process of electro-discharge machining of cooling holes in nickel-based superalloys. The proposed solutions are subsequently validated through experiments, which are evaluated and compared. The outcome of this study provides recommendations for GE Aviation Czech s.r.o.

## **Prohlášení**

Čestně prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury, vědeckých článků a informačních zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze, dne 29.06.2023

.....

podpis autora



## **Prohlášení o spolupráci**

Tato diplomová práce „Optimalizace procesu hloubení dř v leteckém průmyslu“ byla zpracována s použitím důvěrných informací a se souhlasem společnosti GE Aviation Czech s.r.o.

## **Poděkování**

Tímto chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlovi Novákovi, Ph.D. za přihlížení při tvorbě této diplomové práce a zejména za poskytnutí cenných rad pro její vytvoření. Dále chci poděkovat Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi, Ph.D. za dohled a vedení při vytváření metalografických vzorků a následné konzultace týkající se metalografických výbrusů. Za výpomoc při měření drsnosti na konfokálním mikroskopu bych rád poděkoval Ing. Janu Šimotovi. A za dohled při elektrojiskrovém hloubení, prvotní oddělení vzorků a vedení ze strany GE Aviation Czech s.r.o. děkuji Ing. Martinu Miklušovi. V neposlední řadě děkuji přítelkyni a celé rodině za veškerou jejich podporu.

# Obsah

Seznam použitých znaků a zkratk	9
1 Cíle práce	10
2 Úvod	11
3 Teoretická část	13
3.1 Elektrojiskrové obrábění	13
3.1.1 Historie technologie	13
3.1.2 Výboj při elektroerozi	15
3.1.3 Soustava dielektrikum, materiál elektrody a obrobku	21
3.1.4 Dielektrikum	21
3.1.5 Nástrojová elektroda	21
3.1.6 Materiál obrobku	22
3.1.7 Vstupní parametry	24
3.1.8 Výstupní parametry	25
3.2 Technologické aplikace EDM	26
3.2.1 Elektrojiskrové hloubení	26
3.2.2 Elektrojiskrové drátové řezání	27
3.2.3 Elektrojiskrové vrtání	28
3.3 Ekologie EDM	28
3.3.1 Emise při EDM v dielektriku na bázi uhlovodíků	29
3.3.2 Limitní hodnoty škodlivin	29
3.3.3 Emise při EDM v dielektriku na bázi vody	29
3.3.4 Efekty škodlivin vznikajících při EDM v dielektriku na bázi uhlovodíků	30
3.3.5 Možnosti dry EDM a near-dry EDM	30
3.3.6 Porovnání a pohled do budoucna	30
3.3.7 Dopady jednotlivých složek obrábění na životní prostředí	31
3.3.8 Elektromagnetický smog	31
3.4 Materiál obráběného motorového dílu	32
3.4.1 Funkce motorového dílu	32
3.4.2 Žáropevnost	35
3.4.3 Niklové superslitiny	35
3.4.4 René 108 DS	39
4 Experimentální část	40
4.1 Analýza dosavadního řešení	40
4.2 Postupy k optimalizaci	41

4.2.1	Výplach .....	41
4.2.2	Počet současně hloubených děr .....	46
4.2.3	Doporučené parametry.....	46
4.3	Výsledky experimentu.....	48
4.3.1	Rychlost hloubení chladicích otvorů .....	49
4.3.2	Rychlost úběru materiálu v závislosti na volené technologii .....	49
4.3.3	Opotřebenění elektrod v závislosti na volené technologii.....	50
4.4	Metalografie.....	51
4.4.1	Tepelně ovlivněná oblast v příčném řezu .....	53
4.4.2	Drsnost v radiálním řezu .....	58
4.4.3	Ostatní odlišnosti při změně technologických podmínek .....	66
4.5	Diskuse .....	71
5	Závěr.....	74
6	Seznam použité literatury .....	76
7	Přílohy k diplomové práci.....	81
7.1	Seznam příloh.....	81
	Příloha 1.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 1).....	82
	Příloha 2.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 2).....	85
	Příloha 3.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 3).....	88
	Příloha 4.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 4).....	91
	Příloha 5.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 5).....	94
	Příloha 6.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 6).....	97

# Seznam použitých znaků a zkratek

EDM – Electric Discharge Machining (Elektrojiskrové obrábění)

CNC – Computer Numerical Control (Počítačové číslicové řízení)

CAD – Computer Aided Design (Počítačem podporované navrhování)

CAM – Computer Aided Manufacturing (Počítačem podporovaná výroba)

WEDM – Wire-cut Electric Discharge Machining (Elektrojiskrové drátového řezání)

T-on – Čas trvání jednoho pulzu

T-off – Časová prodleva mezi jednotlivými pulzy

C-box – Nastavení přídavné jednotky generátoru

GAP – Napětí v jiskrové mezeře

MRR – Material removal rate (Rychlost úběru materiálu)

TWR – Tool wear rate (Rychlost opotřebení nástroje)

TRGS – Technische Regeln für Gefahrstoffe (Technická pravidla pro nebezpečné látky)

N. AR. – Nízkomolekulární aromatické uhlovodíky

V. AR. – Vysokomolekulární aromatické uhlovodíky

$E_T$  – Modul pružnosti při zvýšené teplotě

$\alpha$  – Součinitel tepelné roztažnosti

$\lambda$  – Součinitel tepelné vodivosti

FCC – Face-centred cubic

FDM – Fused deposition modelling (Modelování metodou taveného nanášení)

DSCM – Disc scanning confocal microscope (Konfokální mikroskop s rotujícím diskem)

# 1 Cíle práce

Cíle práce jsou zadány společností GE Aviation Czech s.r.o. Hlavním cílem by mělo být zefektivnění výroby chladicích otvorů v GT rozvaděči. Toho by mělo být dosaženo především za použití agresivnějších elektrických parametrů při EDM hloubení, další návrhy jsou možné. Tohoto cíle je nutné dosáhnout za použití aktuálního strojního zařízení a za zachování povrchu otvorů bez defektů, či příliš veliké zóny s nataveným materiálem a tepelně ovlivněnou oblastí.

Pro splnění hlavního požadavku a přinesení jisté hodnoty do již zavedeného procesu, je nejprve nutné provést analýzu stávajícího procesu hloubení z hlediska cyklového času, spotřeby nástrojů, metalografického vyhodnocení a opakovatelnosti procesu.

Dalším dílčím cílem je provést návrhy optimalizačních možností, které budou, s ohledem na aktuální strojní zařízení, experimentálně ověřeny.

Posledním cílem je vyhodnocení experimentálně ověřených návrhů a zvolení optimální varianty s ohledem na cyklový čas, spotřebu nástrojů, metalografické vyhodnocení a opakovatelnost procesu.

## 2 Úvod

Obor strojírenství je extrémně rozsáhlým polem svým zaměřením, proto se větví do nejrůznějších oborů. Celá řada z nich je technického charakteru, vycházející z přírodních věd jako je fyzika, matematika, nebo materiálové vědy a jinak tomu není ani u jednoho z nejklassičtějších odvětví, a to obrábění. Jako původ obrábění by se mohla klasifikovat již doba kamenná, protože potřeba úpravy tvaru objektu byla esenciální již pro naše daleké předky. Z definice se jedná o odebírání materiálu z obrobku tak, aby výsledný tvar plnil svou novou funkci. Může se jednat například o funkci estetickou, často se ale jedná o funkci technologickou neboli funkční.

Klasické, resp. konvenční způsoby obrábění jsou nepostradatelnou součástí celosvětového průmyslu kovovýroby. S globálním technologickým pokrokem se začaly rozvíjet i nekonvenční způsoby obrábění materiálu. Většina vznikala v polovině minulého století, mezi tyto metody patří například řezání vodním paprskem, řezání laserem a úběr materiálu na principu elektroeroze.

Světlem vládnou peníze a jediným způsobem, jak se může nová nekonvenční technologie vyrovnat, nebo koexistovat vedle konvenčních je její přidaná hodnota. Nekonenční technologie musí překonat svými výhodami nízkonákladovost známé a odzkoušené technologie. Elektroeroze díky svým kladům generuje nové možnosti v obrábění materiálů. Jendou z výhod je, že mezi nástrojem a obrobkem nepůsobí žádné mechanické síly. Z toho vyplývá, že není rozhodující, jaké mechanické vlastnosti má obráběný materiál. Tím se zároveň eliminuje honba za vytvořením co nejtvrdšího a nejotěruvzdornějšího povlaku konvenčního nástroje, nebo snaha maximalizovat tuhost obráběcích center pro zvyšování přesnosti obráběcího procesu. Další výhodou je maximální možná dosahovaná přesnost, kvalita povrchu či technologická možnost obrábět komplexní tvary v pozicích a místech, kde by bylo nemožné se fyzicky vměstnat do prostorových omezení dané aplikace.

Fyzikálních principů úběru materiálu je mnoho. Nekonenční metody obrábění, na základě toho, že fungují na jiných fyzikálních principech než klasické obrábění, mají obecně jiné parametry, či veličiny, které jsou předmětem studia. Zároveň je právě tato skutečnost potenciálním důvodem volby jedné z nekonvenčních metod obrábění. Tvarová složitost obrobku, mechanické vlastnosti obráběného materiálu, elektrická vodivost, heterogenita obráběného materiálu, požadovaná přesnost, či drsnost a velikost tepelně ovlivněné oblasti jsou typické charakteristiky, které jsou zkoumány při volbě výrobní technologie.

Elektrojiskrové obrábění (EDM - z angl. Electric Discharge Machining) je obráběcí proces, kde se využívá erozivních účinků elektrických výbojů. Tato technologie obrábění se rozšířila do leteckého průmyslu zejména na základě schopnosti obrábět materiály o velmi dobrých mechanických vlastnostech. Obrábět houževnaté a tvrdé materiály konvenčním obráběním představuje značné problémy a v krajních podmínkách je dokonce neproveditelné.

Motivací pro využití technologie EDM ve zkoumané aplikaci je kromě zmíněných omezení z hlediska materiálových vlastností obrobku i jeho tvarová složitost. Využití neobvyklého materiálu, nevšedního způsobu obrábění a zároveň praktické využití mojí práce mě vedlo k výběru tohoto tématu.



## 3 Teoretická část

### 3.1 Elektrojiskrové obrábění

Elektrojiskrové obrábění se řadí do skupiny nekonvenčních technologií obrábění. Nekonenční obrábění se od konvenčního liší ve způsobu, jakým je odebírán materiál z obrobku. Materiál je odpalován periodicky se opakujícími elektrickými výboji, v zásadě jde o podobný princip, jako když se při zkratu v elektrickém oblouku opalují konce drátků, nebo kontakty ve spínačích. V průmyslovém pojetí se, ale jedná o kontrolovaný a cílený děj s jasným úmyslem, odebrat materiál a tím dosáhnout požadovaného tvaru obrobku. Při dělení obráběcích procesů z hlediska využívaných jevů při úběru materiálu se řadí do skupiny využívajících elektro-tepelné principy. Erozivní děj při EDM probíhá v dielektriku, také nazýváno pracovním médiem. Dielektrikum je kapalina s vysokým elektrickým odporem. V prostoru dielektrika dochází mezi elektrodami, k vybuzení elektrických výbojů elektrickým napětím. Obrobek je zapojen jako jeden pól a nástrojová elektroda zapojena jako druhý. Hodnota napětí je závislá na mezielektrodové vzdálenosti, vodivosti a znečištění dielektrika. V místě s maximálním gradientem elektrického napěťového pole dojde k vytvoření ionizovaného kanálu, kudy může protékat elektrický proud, a tak dojde k výboji. Výboj prochází dielektrikem za vzniku plazmy, která má značně vysokou teplotu v rozmezí 3 000 až 12 000 °C, což má za následek natavení a odpaření relativně malého množství materiálu, a to jak na katodě, tak anodě. Odpařený materiál odchází spolu s vyplaveným nataveným materiálem z kráteru, který vytvořil elektrický výboj. Odtavený materiál je posléze zchlazen díky teplotě okolního dielektrika a odchází v podobě kuličkovitých útvarů. [1]

#### 3.1.1 Historie technologie

Počátek této technologie se váže do osmnáctého století k pozorování Sira Josepha Priestleyho. Na praktické využití jím pozorovaného jevu se čekalo více než jedno století. Mezi první využití elektroeroze můžeme zařadit rozklad kovů na koloidní roztoky. Další využití našla tato technologie při odstraňování zlomených závitníků, vrtáků a výstružníků. V roce 1943 B. R. a N. I. Lazarenkovi dostali za úkol zkoumat opotřebenosti kontaktů ve vypínačích. Při pozorování je napadlo, že by tato metoda opotřebenosti materiálu mohla být využita pro cílený úběr materiálu, zejména pro nově vznikající kovové materiály, které se doposud používanými metodami daly obrábět jen se značnými komplikacemi. Lazarenkovi si byli vědomi faktu, že při cíleném využití tohoto principu k odběru materiálu, by bylo potřeba kontrolovat vznikající jiskry pro optimalizaci procesu. Do tohoto okamžiku se využívalo pouze nízkofrekvenčních obloukových výbojů pro výše zmíněné aplikace, ale pro obrábění bylo potřeba proces zefektivnit, urychlit a především zpřesnit. Lazarenkovi přišli s myšlenkou, že pokud využijí výboje trvajících kratší čas a zvýší jeho frekvenci, mohou dosáhnout efektu, který měl potenciál pro průmyslové obrábění materiálů. Navíc využitím dielektrika jako prostoru, ve kterém dochází k výbojům, se obráběná plocha zmenšila.

Redukcí obráběné plochy zkoncentrovali energii do menšího prostoru, čímž ještě více zefektivnili proces elektroeroze. [2]



Obrázek 1.: První AGIETRON AZ 4 (zleva: Farinelli, Wiegand, Dr. Ullmann) [3]

Na Obrázku 1 je zobrazen jeden z prvních elektroerozivních strojů Agietron AZ 4, fotografie pochází ze švýcarského tisku „Schweizerische Mechanikerzeitung“ a byla pořízena mezi lety 1954 a 1960. Firma Agie spolu s firmou Charmilles Technologies SA (viz níže Charmilles Electroda D1) stály u zrodu moderní elektroeroze. Zajímavostí je, že v roce 1996 byly obě švýcarské firmy spojeny pod hlavičku společnosti GF. Dnes jsou obě firmy součástí korporátu GF, kde po spojení s dalšími společnostmi nesou jméno: „GF Machinig Solutions AG“. [4] [5]



Obrázek 2.: Charmilles Electroda D1 [6]

Vývoj technologie EDM pokračoval a v roce 1954 byla představena světu první elektrojiskrová hloubička Charmilles Electroda D1, viz Obrázek 2. Funkce jejího generátoru byla výrazně omezená v rámci možnosti generovat výboje s vysokou frekvencí. Postupným vývojem na konci padesátých a v průběhu šedesátých let bylo dosaženo zlepšení vlastností generátoru díky přechodu na statické pulzní generátory, které jsou založeny na tranzistorových spínačích. Velkým skokem vpřed v oblasti celého strojírenství bylo zavedení počítačů a jejich využití pro řízení strojů. K této revoluci došlo z hlediska EDM strojů na počátku sedmdesátých let. V roce 1972 byl představen CNC řízený stroj Seibu. Další vývoj až do dnešní doby spočívá ve vylepšování generátorů a řídicích systémů, zejména využití CAD/CAM softwarů, případně automatizace procesů. [7]

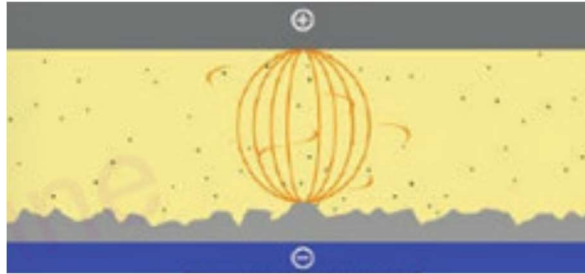
### 3.1.2 Výboj při elektroerozi

Elektrický výboj je možné chronologicky rozdělit na několik časových kroků, zde označeny jako „Fáze I“ až „Fáze IX“. Pochopení a vizualizace dějů na úrovni jednotlivých výbojů a jejich souvislost s přiváděnou elektrickou energií je podstatnou součástí pochopení celého procesu elektroeroze.

Fáze I:

Na Obrázku 3 je zobrazen počátek výbojového cyklu. Vše začíná v místě největšího gradientu napětového pole, které je způsobeno přivedením elektrického napětí na elektrody. Často se jedná o místo, kde je lokálně nejmenší mezielektrodová

vzdálenost a zde se začínají hromadit elektricky nabitě částice. Okamžitý průběh napětí a proudu v jednotlivých fázích je zobrazen vždy na obrázku pod schématickým zobrazením jednotlivé fáze. Na Obrázku 4 je graficky znázorněno, že napětí začíná růst a proud je nulový. [1]



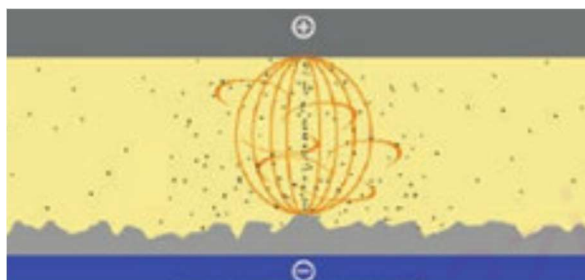
Obrázek 3.: První fáze elektroerozivního výboje [8]



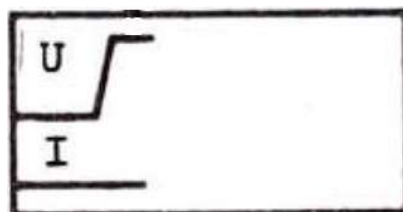
Obrázek 4.: Okamžitý průběh napětí a proudu při první fázi výboje [1]

Fáze II:

Z Obrázku 5 je zřejmý počátek shlukování se elektricky nabitých částic a jejich nárůst. Zároveň se tyto částice uskupují do můstků, které jsou potřebnou predispozicí k zapálení výboje. Jak je vidět z Obrázku 6 napětí dosahuje maxima, ale proud mezi elektrodami stále neteče. [1]



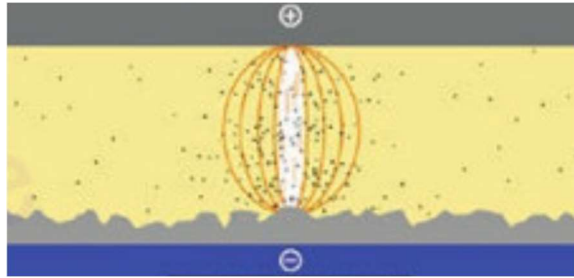
Obrázek 5.: Druhá fáze elektroerozivního výboje [8]



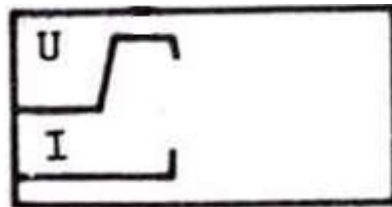
Obrázek 6.: Okamžitý průběh napětí a proudu při druhé fázi výboje [1]

Fáze III:

Za působení elektrického pole se odpoutávají elektrony ze záporně nabitých elektrod a v prostoru dielektrika se srážejí s neutrálními částicemi, tím se prostor ionizuje. Toto je schematicky naznačeno na Obrázku 7. Na Obrázku 8 je naznačen průběh napětí a proudu, kde napětí začíná klesat z maximální hodnoty. V důsledku začátku proudění elektronů, je pozorován prvotní nárůst proudu. [1]



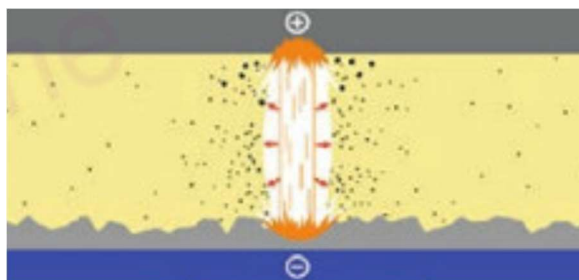
Obrázek 7.: Třetí fáze elektroerozivního výboje [8]



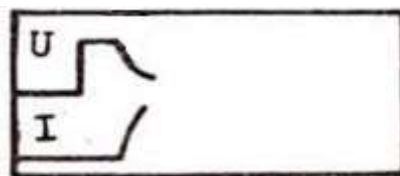
Obrázek 8.: Okamžitý průběh napětí a proudu při třetí fázi výboje [1]

Fáze IV:

Z Obrázku 9 je patrný proces hromadění iontů kolem místa, kde vzniká výbojový kanál. Šipky značí růst výbojového kanálu. Mezi elektrodami začíná protékat vyšší hodnota elektrického proudu, což vyvolává růst proudové hustoty a začíná klesat napětí na elektrodách, viz Obrázek 10. Výbojový kanál již obsahuje plazmu a teplota na povrchu elektrod prudce roste. [1]



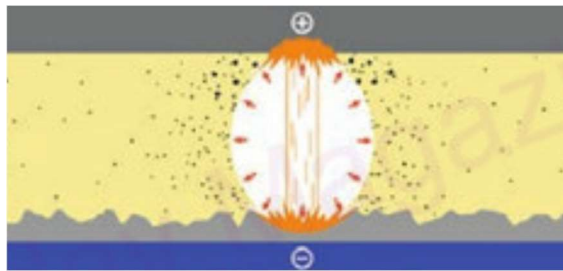
Obrázek 9.: Čtvrtá fáze elektroerozivního výboje [8]



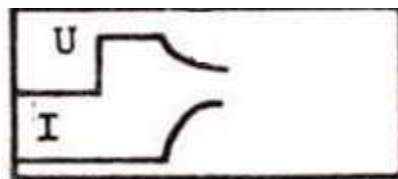
Obrázek 10.: Okamžitý průběh napětí a proudu při čtvrté fázi výboje [1]

Fáze V:

Ve fázi V, která je zobrazena na Obrázku 11, generují nárazy částic vysoké množství tepelné energie, jenž se uvolňuje do blízkého okolí a začíná se vypařovat dielektrikum. Z výparů se generuje plynová bublina. Expandování plynové bubliny je naznačeno šipkami. Proudový kanál je obklopen plynovou bublinou a ta je obklopená dielektrikem. Jak plazmatem proudí elektrony, lokálně se zahřívají elektrody v místě dotyku s výbojovým kanálem. V tomto místě se taví a odpařuje materiál obou elektrod. V tento okamžik dosahuje protékající proud svého maxima, při ustálení hodnoty napětí, viz Obrázek 12. Tato hodnota je známá jako zápalné napětí výboje. [1]



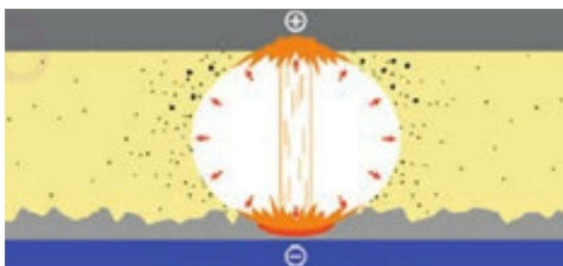
Obrázek 11.: Pátá fáze elektroerozivního výboje [8]



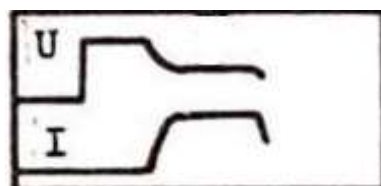
Obrázek 12.: Okamžitý průběh napětí a proudu při páté fázi výboje [1]

Fáze VI:

V tento moment nastává nejintenzivnější tavení a odpařování materiálu za kontinuální expanze bubliny. Tato expanze je na Obrázku 13 znázorněna šipkami směrem ven od vytvořeného proudového kanálu. Z Obrázku 14 je patrné, že ke konci této fáze začínají napětí i proud mírně klesat. [1]



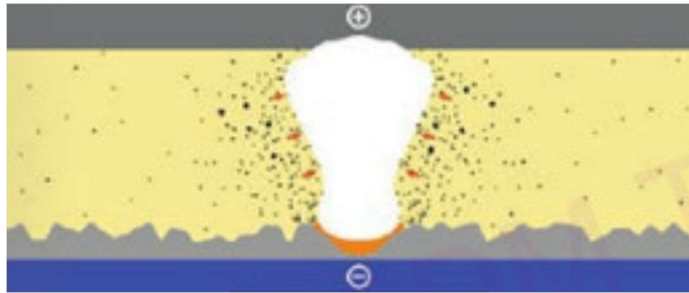
Obrázek 13.: Šestá fáze elektroerozivního výboje [8]



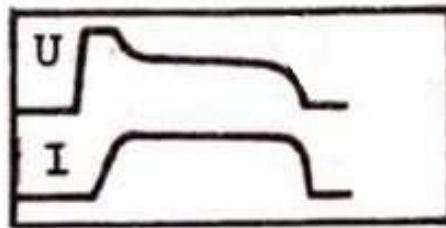
Obrázek 14.: Okamžitý průběh napětí a proudu při šesté fázi výboje [1]

#### Fáze VII:

Proud i napětí pokračují v klesajícím trendu z konce Fáze VI. Nadále klesá i celková elektrická energie přiváděná do systému, proto klesá i teplota v místě vytvořeného kanálu. Bublina imploduje z důvodu nedostatku tepelné energie, viz Obrázek 15, kde je imploze naznačena směrem šipek od dielektrika k okraji bubliny. Pokles tlaku vede ke kavitaci, a to způsobuje odebrání narušeného a nataveného materiálu do okolního prostoru. Na elektrodě vzniká kráter z důvodu úběru nataveného materiálu. Znečištění dielektrika vede ke zvýšení jeho odporu. V této fázi dosahuje kontaminace takové hodnoty, že se proud i napětí blíží nule, viz Obrázek 16. Konečným stavem této fáze je zánik proudového kanálu. [1] [8]



Obrázek 15.: Sedmá fáze elektroerozivního výboje[8]

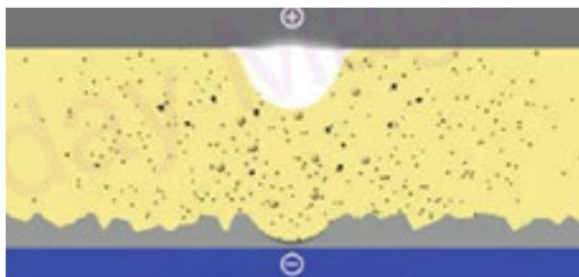


Obrázek 16.: Okamžitý průběh napětí a proudu při sedmé fázi výboje [1]

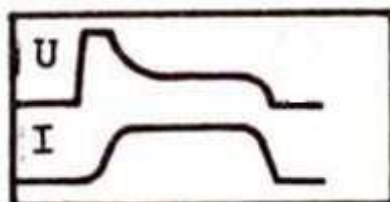
#### Fáze VIII:

Dodávaná elektrická energie je nadále nulová, což je vidět na Obrázku 18. Na Obrázku 17 je naznačen zánik zbytku bubliny. Dielektrikum v této fázi přichází do styku s roztaveným materiálem a ochlazuje jej i materiál pod ním. Rychlým ochlazením rozežháté svrchní vrstvy nástrojové elektrody i obrobku zabraňuje vnikání tepelné energie v normálovém směru k jejímu povrchu. Odebraný materiál setrvává v dielektriku. [1]





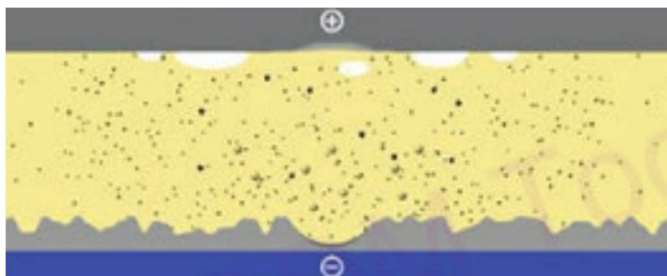
Obrázek 17.: Osmá fáze elektroerozivního výboje [8]



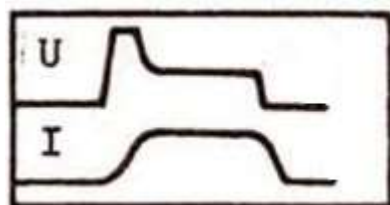
Obrázek 18.: Okamžitý průběh napětí a proudu při osmé fázi výboje [1]

Fáze IX:

Poslední fáze je zobrazena na Obrázku 19. Systém zaujímá stav předcházející novému cyklu výboje, v mezielektrodovém prostoru zůstávají zbytky materiálu v podobě malých zrn, které zvyšují odpor dielektrika, prostor čeká na výplach a novou ionizaci prostředí. [1] [8]



Obrázek 19.: Devátá fáze elektroerozivního výboje [8]



Obrázek 20.: Okamžitý průběh napětí a proudu při deváté fázi výboje [1]

Znečištěné dielektrikum je potřeba odplavit z místa, kde má probíhat další elektroeroze. Odpadní látky procesu se rozptylují v dielektriku různými mechanismy, především prouděním dielektrika. Částečně se odebraný materiál pohybuje i Brownovým pohybem, nebo obecně difuzí, kde je hnací silou gradient koncentrace. Z tohoto důvodu je výplach dielektrika důležitým krokem.



### 3.1.3 Soustava dielektrikum, materiál elektrody a obrobku

Kombinace materiálu elektrody s materiálem obrobku by, pro dosažení ideálního obráběcího procesu, měla mít protichůdné dopady na nástroj a obrobek. Nástroj by měl vykazovat co nejmenší opotřebení, naopak u obrobku by mělo docházet k co nejvyššímu úběru materiálu. Narozdíl od konvenčního obrábění, kde se této "protichůdné" filozofie nechá dosáhnout maximalizováním mechanických vlastností nástroje (zejména otěruvzdornosti povrchové tvrdosti a celkové houževnatosti) a minimalizováním těchto vlastností u obrobku.

Při EDM se pozornost zaměřuje na atributy jako tepelná a elektrická vodivost. Znamená to tedy, že čím vyšší má materiál elektrody elektrickou vodivost, tím má obecně nižší opal. Vysoká integrita materiálu elektrody je v mikroskopickém pohledu také důležitým faktorem. A to i navzdory představě, že při elektroerozivním procesu se s mechanickými silami nesetkáváme. Při mikroskopickém pozorování elektroerozivního procesu je patrný mechanický vliv vznikajících a zanikajících jisker na elektrodu. [9]

### 3.1.4 Dielektrikum

Druh použitého pracovního prostředí hraje v procesu EDM neméně významnou roli. Dielektrikum je obecně látka, která je nevodivá, ale může být polarizována. Díky tomu má při EDM potenciál vystupovat jako médium pro průběh výboje mezi elektrodou (nástrojem) a obrobkem.

Mezi nejpoužívanější dielektrika současnosti se řadí petrolej, olej, destilovaná voda, transformátorový olej, nebo vzduch. Jako pracovní prostředí je možné využít i polovodivé prostředí - solné roztoky, kaolinové emulze, nebo vodní sklo. Použité pracovní prostředí předurčuje průběh procesu elektroeroze a má vliv na procesní i výsledné parametry obrobku. Dielektrikum by mělo být chemicky neutrální, z důvodu zabránění potenciální koroze. Dále by mělo být málo viskózní a dobře smáčivé k materiálu obrobku. Dobrá smáčivost dielektrika je podstatná pro co nejrychlejší obnovení izolace, na čemž je závislé vytvoření dalšího výboje. Potom musí zamezovat vzniku jedovatých výparů a mít vysokou teplotu hoření, aby se zabránilo vzplanutí. Navíc by mělo zabezpečit chlazení místa, kde probíhá elektroeroze a odvod tepla z elektrody samotné. Z ekonomického úhlu pohledu je výhodné, aby bylo levné a lehce vyrobitelné. Žádoucím atributem dielektrika je dobré odstraňování nečistot a zbytků odebraného materiálu z místa výboje. V neposlední řadě musí zajistit správnou mezielektrodovou pracovní vzdálenost. [10]

### 3.1.5 Nástrojová elektroda

Nástrojová elektroda může mít různé tvary od trubiček, používaných pro elektrojiskrové vrtání, přes drát smotaný na cívce určený pro elektrojiskrové řezání (WEDM – Wire-cut Electric Discharge Machining), až po různorodé tvary, elektrod využívaných při elektroerozivním hloubení. Nástrojová elektroda je vyráběna z různých materiálů, či jejich kombinací.

Z ekonomického hlediska je volba materiálu elektrody důležitým prvkem návrhu optimálního procesu z hlediska nákladů, protože se až ze 70 % cena obrobeneho dílu odvíjí od nákladů na elektrodu. Náklady na elektrodu se skládají z ceny samotného materiálu a případné ceny obrábění elektrody do požadovaného tvaru. [11]

Fyzikální vlastnosti elektrody, jako její elektrická a tepelná vodivost, součinitel teplotní roztažnosti, teplota varu a tání a potřebné teplo k sublimaci materiálu při pokojové teplotě mají zásadní vliv na výsledný proces elektroeroze. Tyto fyzikální vlastnosti materiálu elektrody ovlivňují i výstupní parametry procesu a jeho výkonnost, zejména rychlost úběru materiálu, opotřebení elektrody a povrchové integrity obrobku. [12]

Materiály s vhodnými fyzikálními vlastnostmi k použití pro nástrojovou elektrodu jsou měď, grafit, mosaz, wolfram, měď-wolfram, stříbro-wolfram, čisté stříbro, karbid wolframu, tellur-měď a hliník. [13]

Kombinace mědi a wolframu se využívá zejména pro smíšení dobrých teplotních vlastností wolframu, především jeho vysoké teploty tání a dobré elektrické i tepelné vodivosti mědi. Pro výrobu je nutné využít tzv. práškovou metalurgii, protože dané dva prvky nejsou vzájemně rozpustné, a proto není možné vytvořit jejich slitinu.

Prášková metalurgie je název technologie, kdy se atomizované prášky prvků smísí, zkompaktní pod vysokými tlaky a následně sintrují. Sintrování, spékání, nebo slinování je zahřátí práškové hmoty za kontrolované atmosféry pro spojení prášku a vytvoření požadovaných vlastností. Nejčastěji se při sintrování zmenší objem spékaného materiálu a vznikne součást o vyšší hustotě. [14]

V porovnání s čistou mědí, vykazuje kombinace mědi s wolframem menší úběr materiálu, kvůli snížené elektrické vodivosti. Obě tyto skutečnosti jsou negativně ovlivněny obsahem wolframu. Na druhou stranu wolfram snižuje opotřebení elektrody. Cena je v porovnání s grafitovými, nebo měděnými elektrodami vyšší, a tak se používá jen v aplikacích, kde je nutné obrábět hůře obrobiteľné materiály. [13]

### 3.1.6 Materiál obrobku

Před obráběním je důležité se seznámit s vlastnostmi materiálu obrobku, a i podle toho se rozhodnout, jakou technologií bude úběr materiálu realizován. U EDM tomu není jinak, jen oproti konvenčním způsobům obrábění hledíme na jiné materiálové vlastnosti.

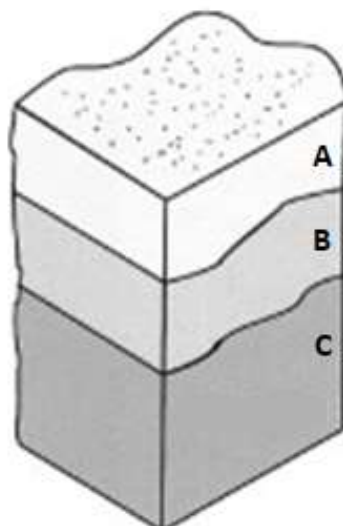
Jedním z důležitých faktorů pro obrobiteľnost materiálu pomocí EDM je, u kovů, jejich čistota. Čistota materiálu obrobku ovlivňuje homogenitu postupného natavování materiálu, a proto i mechanismus úběru materiálu pomocí odtavení. [15]

U slitin je problematika čistoty irelevantní, proto je podstatné se zaměřit na měrnou tepelnou kapacitu, tepelnou vodivost a teplotu tání, jež mají největší vliv na obrobiteľnost materiálu ze všech fyzikálních vlastností materiálu. [16]

Důkladné seznámení s materiálem obrobku a jeho interakcí při procesu elektroeroze je důležité zejména z hlediska predikce možného dosažitelného úběru materiálu. Na druhou stranu, je tato problematika tak komplexní, že není možné přesně a v plném rozsahu predikovat rychlost úběru materiálu. Na obrobitelnost má vliv mnoho parametrů, a i z toho důvodu neexistuje žádný teoretický ani empiricky zjištěný vztah, co by dokázal takto komplexní problematiku předvídat. Rychlost úběru materiálu závisí na, mimo jiné, teplotě tání a velikosti latentního tepla daného materiálu. Vliv na obráběcí proces představuje geometrie obrobku, ale i elektrody.

Za zmínku k teoretickému popisu elektroeroze stojí hypotéza Van Dycka (1969), který dokázal, že eroze materiálu může být vysvětlena s ohledem na termodynamiku a modely tepelných přestupů. Typické hodnoty rychlosti úběru materiálu jsou v rozmezí  $0,1$  až  $10 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ . V praxi se nedá určit, zda je obráběcí proces neefektivní pouze z porovnání hodnoty rychlosti úběru materiálu se zmíněným rozmezím. Zásadním ovlivněním je použitý proud, jehož velikost je úzce spjatá s požadovanou drsností obrobeného povrchu. Na povrchu se po obrobení nachází rozstříknutý materiál, který spolu s krátery, jako zbytky po výbojích, zapříčiňují matný vzhled obrobeného povrchu. Protože se jedná o úběr materiálu založený na elektro-tepelném principu, při kterém se dosahuje lokálně teplot až  $12\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ , objevují se metalurgické změny na a pod povrchem obrobených ploch. [2]

Tepelně ovlivněná oblast se dělí na tři oblasti, které jsou schematicky naznačeny na Obrázku 21. Povrch součásti je roztaven a vytvrzen díky proudícímu dielektriku, které velmi rychle odvádí teplo z povrchu obrobku. Tato vrstva může být až  $1 \text{ }\mu\text{m}$  slabá (při parametrech obráběcího procesu využívajících malé výkony) běžně dosahuje mocnosti až  $40 \text{ }\mu\text{m}$ . Na oblast A navazuje oblast nazývaná se teplem ovlivněná oblast, často o mocnosti méně než  $250 \text{ }\mu\text{m}$  od povrchu. Pravidlem, kterým je možné odhadnout tloušťku oblasti B, je, že odpovídá desetinasobku drsnosti povrchu. Na metalurgickou morfologii oblasti B má dopad opětovné ohřívání a zchlazování z důvodu periodicity procesu a difuze materiálu z oblasti A. Kombinace těchto vlivů způsobuje zvýraznění oslabujících faktorů na hranicích zrn, kde se mohou šířit praskliny. Důsledkem je oslabení materiálu zejména s ohledem na únavovou životnost. Oblast C je nazývána přechodová oblast k základnímu materiálu. [2]



Obrázek 21.: Vrstvy po elektroerozivním obrábění, průřez materiálem [17]

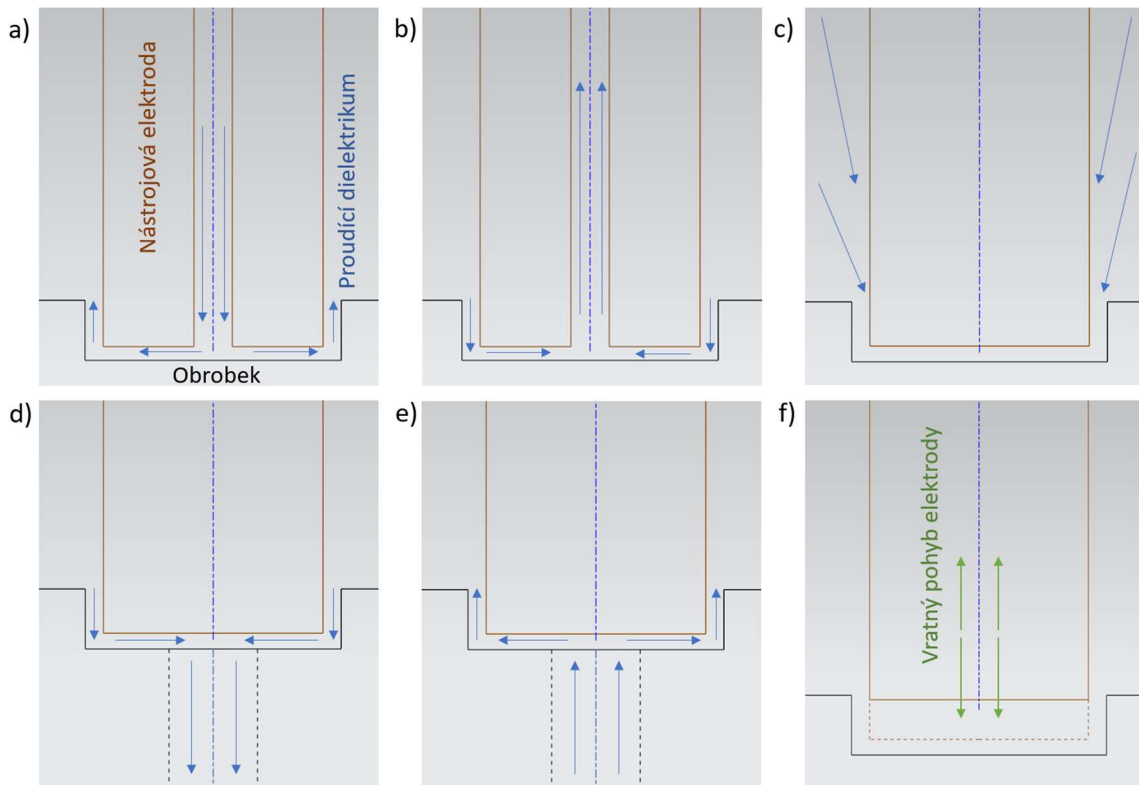
### 3.1.7 Vstupní parametry

Parametry, které vstupují do procesu EDM se dají rozdělit na elektrické a neelektrické. Správné nastavení elektrických parametrů je často založené na zkušenosti operátorů, nebo informacích technologů. Hrubý odhad nastavení elektrických veličin je možné najít v příručkách výrobců EDM strojů. Tyto odhady často vyústí v neoptimální obráběcí proces, který je nutné odladit na daném stroji pro danou aplikaci. [18]

Mezi elektrické parametry se řadí: pracovní proud, zápalné napětí a proud zápalného napětí, čas trvání jednoho pulzu (T-on), časová prodleva mezi jednotlivými pulzy (T-off), nastavení přídavné jednotky generátoru (C-box), napětí v jiskrové mezeře (GAP) a citlivost speciálního obvodu v generátoru sloužící pro ochranu proti zápalům (ochrana).

Jedním z hlavních neelektrických parametrů ovlivňujících proces EDM je výplach a způsob jeho přivedení k místu obrábění. Rozlišuje se šest různých typů výplachu, viz Obrázek 22. [19]

Výplach vnitřkem elektrody je označen písmenky a) a b), v prvním případě se jedná o tlak, písmeno b) naopak představuje sání vnitřkem elektrody. Pod písmenkem c) je znázorněn vnější výplach. Podobně jako u a) a b) je tomu u obrázků pod písmenky d) a e), jedná se o přivedení čistého, respektive odvedení kontaminovaného dielektrika z/do místa obrábění skrz předobrobený otvor. V části f) je zobrazeno cyklické vyjíždění elektrody z hloubené dutiny pro vytvoření podtlaku u paty dutiny, a tím odplavení nečistot z mezielektrodové mezery.



Obrázek 22.: Možné způsoby výplachu znečištěného dielektrika během EDM hloubení, zobrazeno na příkladu použití nástrojové elektrody válcovitého tvaru

Dalším neelektrickým parametrem je rotační pohyb obrobku, či rotace nástrojové elektrody. Relativní rotace jedné elektrody kolem druhé je výhodná z hlediska umožnění cirkulace dielektrika. [18]

Celý obráběcí proces ovlivňuje i design nástrojové elektrody. Pro dosažení požadovaného tvaru elektrody i držáku nástroje jsou používány CAD softwary s funkcemi umožňujícími získávat jejich design z geometrie obrobku. Softwary tohoto typu jsou schopny rozeznat i nežádoucí ostré rohy tak, že měří úhel od povrchu obrobku podél jeho případných hran. [20]

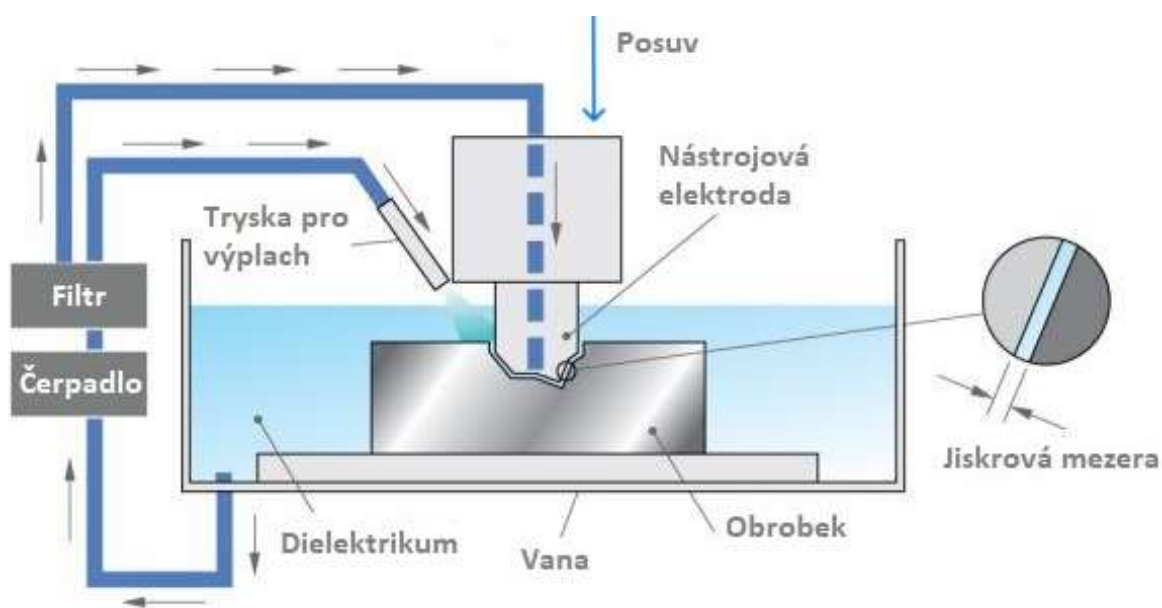
### 3.1.8 Výstupní parametry

Zpětná vazba je důležitá pro nastavení různých systémů, u EDM tomu není jinak. Pro dobré nastavení procesu obrábění a ověření jeho funkčnosti, je zapotřebí vědět, jaký má daný proces výsledek. Měřitelnými parametry výkonnosti procesu EDM jsou vysoký úběr materiálu (MRR - z anglického Material removal rate), nízké opotřebení nástrojové elektrody (TWR - z anglického Tool wear rate) a drsnost obrobeného povrchu.[18] Mezi další měřitelný parametr se řadí i tepelně ovlivněná oblast, která by měla korelovat s výslednou drsností obrobeného povrchu.[2]

## 3.2 Technologické aplikace EDM

### 3.2.1 Elektrojiskrové hloubení

Technologie elektrojiskrového hloubení umožňuje obrábět komplexní tvary za dodržení vysokých přesností, které jsou téměř nedosažitelné konvenčními způsoby. Po takových dílech je enormní poptávka ze zdravotnického, automobilového a leteckého průmyslu. Obzvláště proto se tato technologie rozšířila do strojírenských podniků, které se uchází o místo na trhu ve výše zmíněných odvětvích. Komplikované tvary a hluboké kapsy, které představují velkou výzvu pro konvenční způsoby obrábění, jsou ideálním kandidátem pro aplikování nekonvenční technologie obrábění. Především se pro formy obsahující zmíněné kapsy hodí technologie elektrojiskrového hloubení. [21]



Obrázek 23.: Schéma stroje pro elektrojiskrové hloubení [22]

Technologie elektrojiskrového hloubení spočívá v obtisknutí elektrody do obrobku, viz Obrázek 23. Nástrojová elektroda je v tomto případě negativem cílené drážky, kapsy, nebo tvarové prohlubně. Pro oběh dielektrika a umožnění výplachu, ať už vnějšího končícího tryskou, či vnitřního procházejícího vřetenem stroje, je zapotřebí čerpadla a filtru. Dielektrikem je napuštěná vana stroje a obrobek i elektroda jsou v něm ponořeny. Posuv nástroje je ve směru požadovaném, dle aktuální aplikace. Elektrody se nejčastěji obrábí konvenčními technologiemi, především soustružením a frézováním. Stejně jako u ostatních technologických aplikací elektrojiskrového obrábění, viz níže, vzniká mezi obrobkem a elektrodou jiskrová mezera.

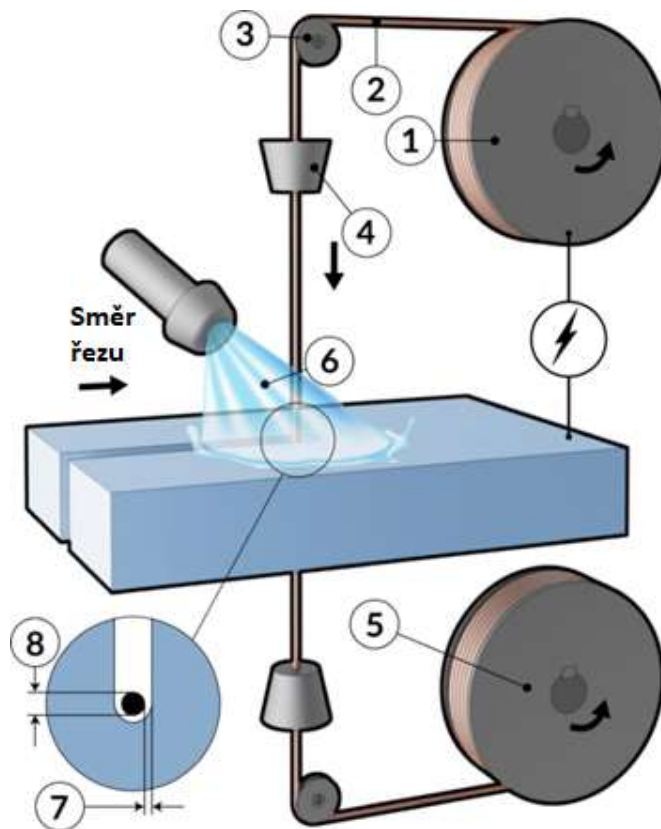
Při výrobě forem se mohou použít i technologie ražení, broušení a protlačování, ovšem běžně se využívá technologie elektrojiskrového hloubení. Právě pro tyto aplikace je výroba tvarově složitých nástrojových elektrod velmi časově náročná. Pokud by bylo možné urychlit výrobu elektrod, výrazně by tím bylo dosaženo zlevnění celé technologie elektrojiskrového hloubení. [13]

Možnými způsoby, jak urychlit výrobu elektrod je využít alternativní způsob, jakým může být lití, galvanoplastika, případně žárové stříkání.[12] Dalším potenciálním směrem, pro snížení nákladů při výrobě, by mohlo být využití některé z aditivních technologií. [23]

### 3.2.2 Elektrojiskrové drátové řezání

Technologie WEDM neboli technologie "drátu", jak se zkráceně nazývá, je pokrokovou úpravou technologie EDM. Díky malému průměru drátu, který je nástrojem a je tedy zapojen jako elektroda se tato metoda pyšní minimální šířkou řezu. Jako všechny obráběcí technologie založené na principu elektroeroze má uplatnění v obrábění konvenčně těžkoobrobitelných materiálů.

Největší uplatnění našla technologie WEDM při výrobním procesu lisovacích a střižných nástrojů. Schéma fungování technologie je zobrazeno na Obrázku 24. Drát, plnící funkci nástrojové elektrody, je označen číslem 2 a je napínán přes vedení (3) cívkami. Stroj pro technologii WEDM obsahuje dva druhy cívek. Jedna obsahuje zásobu drátu nového (cívka 1) a na druhé se navijí drát použitý. Ten je namotáván na cívku (5). Dostatečné vypnutí drátu hraje důležitou roli v přesnosti řezu. K přesnosti napomáhají i vodící pouzdra (4), která jsou často diamantová, aby odolávali abrazi od smýkajícího se drátu. Drát je namotán na cívkách, jelikož se během procesu obrábění opotřebovává, a tak je nutné zajistit jeho cyklický oběh v rámci obráběcího procesu. Celý průběh je podpořen vtékáním dielektrika (6), které proces chladí a odvádí odebraný materiál z obráběcího procesu. Podobně se elektroerozivní řezání může provádět i kompletně pod hladinou dielektrika. Pohyb drátu i posuv stolu s obrobkem je řízen numericky. Mezera mezi drátem a obráběným materiálem se nazývá jiskrová mezera (7) a způsobuje zvětšení obrobené drážky v materiálu obrobku oproti průměru drátu (8). Dosahovaná přesnost při této technologii se pohybuje kolem hodnoty 0,013 mm. To může být kladně i negativně ovlivněno strojem, případně jeho stářím. Podobně je závislá i rychlost úběru materiálu, u starších drátořezů se dosahuje úběru kolem  $1300 \text{ mm}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ , u výkonnějších a novějších strojů může být úběr až desetinásobný. [24] [25]



Obrázek 24.: Schéma fungování stroje pro WEDM [25]

### 3.2.3 Elektrojiskrové vrtání

Technologie elektrojiskrového vrtání je používána k elektroerozivnímu obrobení děr malých průměrů, rámcově 0,1 až 0,5 mm. K tomuto účelu se používají nástrojové elektrody trubičkovitého tvaru, kdy se vnitřním průměrem elektrody přivádí dielektrikum ke dnu hloubeného otvoru. Toto vyfiltrované dielektrikum slouží jako výplach nečistot a odebraného materiálu. Pokud je nutné použít plné elektrody, pak je vhodné mít díru již předvrtanou menším průměrem, aby bylo možné zajistit odvádění znečištěného dielektrika z místa, kde probíhá elektroeroze. To lze provést sáním, nebo vstřikováním dielektrika do, resp. z předvrtaného otvoru. Narozdíl od konvenční technologie vrtání nástroj nemusí konat rotační pohyb. Posuv nástroje se běžně pohybuje kolem hodnoty  $0,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Nejčastěji se tato technologie využívá v leteckém průmyslu, například pro vrtání chladicích kanálků v lopatkách turbín, které bývají vyrobeny z velmi tvrdých materiálů, zejména z niklových superslitin. [2]

## 3.3 Ekologie EDM

Ekologie se stává větším a palčivějším tématem ve společnosti a je potřeba jí věnovat náležitou pozornost i v průmyslových odvětvích. U technologie EDM je tato potřeba neméně nutná ve srovnání s ostatními průmyslově používanými technologiemi.



Na výstupu z procesu EDM jsou plyny, odpadní dielektrikum, kal, použité elektrody a filtrační vložky. Nejvíce problematické jsou plyny, dle typu dielektrika se liší, ale zejména se jedná o O<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>. Filtry se používají mechanické, chemické a elektrostatické. Od velikosti filtrovaných částic se odvíjí volba typu filtru. Pro větší částice než 0,1 μm jsou vhodné filtry mechanické, pro 0,01 až 1 μm jsou používány elektrostatické a pro menší částice než 0,1 μm je nezbytné použití chemických filtrů. [26]

### 3.3.1 Emise při EDM v dielektriku na bázi uhlovodíků

Při použití dielektrika na základě uhlovodíkových kapalin, vznikají během procesu výpary na bázi polycyklických aromatických uhlovodíků, benzen, výpary minerálních olejů, minerální aerosoly a další vedlejší produkty zapříčiněné rozkladem olejů a jejich aditiv. Velký vliv na generování výparů a aerosol má lokální stav dielektrika, jeho skladba a viskozita, to je zapříčiněno velmi vysokými teplotami a tlaky v prostoru jiskry. [27]

Poměrně veliký environmentální vliv má i konečné nakládání s dielektrikem. Během EDM se asi 70 % energie spotřebuje na čerpání kapalin a jen 10 % generátorem jisker, zbylých 20 % spotřebovávají ostatní dílčí procesy. Dielektrikum jako takové reprezentuje 23 % celkové environmentální zátěže při procesu obrábění EDM. [28]

### 3.3.2 Limitní hodnoty škodlivin

V Tabulce 1, jsou vypsány škodlivé látky, jejich limitní hodnoty, jak se filtrují a jak se zjišťuje jejich přítomnost. TRGS je zkratka z německého „Technische Regeln für Gefahrstoffe“, jedná se o technická pravidla pro nebezpečné látky. Za povšimnutí stojí extrémně nízká limitní hodnotu u nejnebezpečnější ze zmíněných látek - Benzoapyrenu.

Tabulka 1.: Limity škodlivin dle TRGS 560 [29] [15]

Škodlivá látka	Limit [mg/m <sup>3</sup> ]	Filtrační nosič	Analýza
Alifatické uhlovodíky	5	Skelná vlákna	Spektroskopie
Uhlovodíky N.AR.	200 [ml/m <sup>3</sup> ]	Aktivní uhlí	Plynová chromatografie
Uhlovodíky V.AR.	50 [ml/m <sup>3</sup> ]		
Benzol	3,2		
Benzoapyren	0,002	Skelná vlákna	Vážení
Uhlík	6	Skelná vlákna	

### 3.3.3 Emise při EDM v dielektriku na bázi vody

Použití vody jako dielektrika by mělo zmírnit ekologickou zátěž při průběhu EDM díky redukci škodlivin vznikajících při procesu EDM. Zároveň pokud je zavedený efektivní filtrační systém je možné použité dielektrikum bezpečně odvézt do komunálního odpadu. Obecně by environmentální zátěž při použití vody jako dielektrika měla být nižší. [30]

Nepřímý ekologický vliv má ale i toto řešení, a to z důvodu větší spotřeby energie pro obrábění EDM. Způsobeno je to rozdíly v attributech dielektrika na bázi vody, jako

hustota, viskozita, elektroizolační vlastnosti a jiný ionizační mechanismus. Systém dielektrika na bázi vody spotřebuje 50 % celkové elektrické energie dodané do procesu. Tento nepříznivý nepřímý ekologický důsledek znamená, že je dielektrikum na bázi uhlovodíků přívětivější k životnímu prostředí. [31]

### 3.3.4 Efekty škodlivin vznikajících při EDM v dielektriku na bázi uhlovodíků

Alifatické uhlovodíky působí na lidský organismus jako narkotika, potlačují centrální nervový systém, s tím, že čím vyšší je molekulová hmotnost, tím vyšší je narkotická účinnost. Při dlouhém a výrazném kontaktu, mohou alifatické uhlovodíky způsobovat komatózní stavy s útlumem šlachových reflexů. Jestli jsou karcinogenní, není dosud jistě prokázáno. [32]

Benzol je směs benzenu, toluenu, xylenů a dalších sloučenin. Benzen zasahuje centrální nervový systém, může vyvolat srdeční arytmií, způsobuje zvracení a ztráty rovnováhy. Při dlouhodobé expozici dochází k napadení kostní dřevě, přičemž účinky na imunitní systém jsou evidentní již při nízkých koncentracích. Benzol je prokazatelně karcinogenní látka.[33] Toluén dráždí oči, dýchací cesty, působí narkoticky a vyvolává bolesti hlavy, na rozdíl od benzenu není karcinogenní.[34] Xyleny způsobují podráždění sliznice očí, trávicího ústrojí, pokožky, mohou zapříčinit poruchy rovnováhy, zpomalovat reakční čas a ovlivňovat EEG.[35]

Benzoapyren je zdraví nejškodlivější ze všech výše zmíněných sloučenin, je toxický, mutagenní, ohrožuje vývoj plodu, prostupuje i pokožkou, koncentrace vyšší než 1 nanogram v m<sup>3</sup> prokazatelně poškozuje DNA. Je karcinogenní. U plodů způsobuje růstové retardace, v dospělosti vyšší pravděpodobnost vyvinutí kardiovaskulárních onemocnění, či diabetu, disfunkce ledvin a obezity. [36]

### 3.3.5 Možnosti dry EDM a near-dry EDM

Dry EDM využívá jako dielektrikum stlačený vzduch, nebo kombinaci plynů se vzduchem za proměnlivých tlaků tak, aby se přiblížilo vlastnostem dielektrika. Nespornou výhodou této metody je i jednoduchost obráběcího stroje v porovnání s EDM v dielektriku. Near-dry EDM je přechodem mezi suchým a mokrým EDM, jedná se o elektrojiskrové obrábění v mlze, která slouží jako dielektrikum. To vyvolává ale další technologické problémy, například s čištěním a recirkulačním mechanismem. [27]

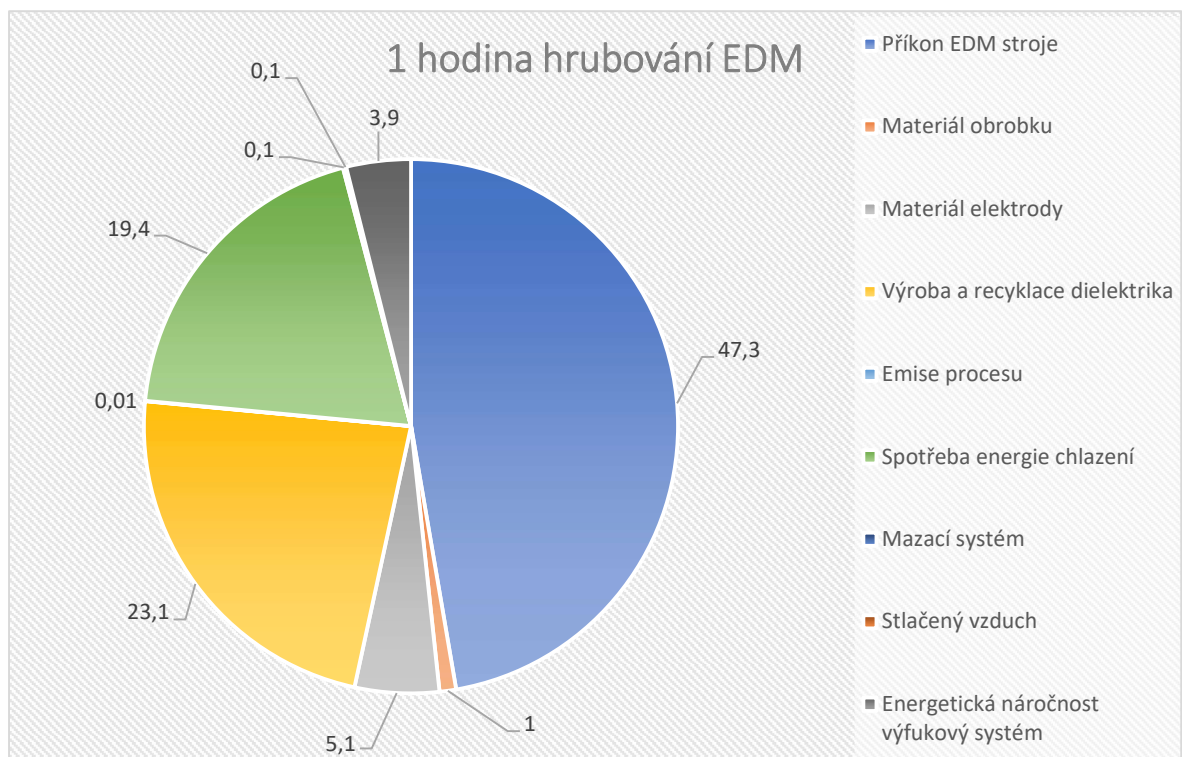
### 3.3.6 Porovnání a pohled do budoucna

Pro zajištění udržitelného vývoje a průmyslu týkajícího se EDM je nutné vytvořit a implementovat udržitelné výrobní postupy. EDM v dielektriku přináší již zmíněné problémy s velkým množstvím odpadního dielektrika a nakládání s ním. Škodlivé emise vznikající při procesu obrábění také nejsou výhodou tohoto typu EDM obrábění. Z důvodu horších nedostatků u ostatních metod, je EDM obrábění v dielektriku prozatím nejpoužívanější metoda. Tzv. dry EDM, neboli suché elektrojiskrové obrábění, by mělo nabízet ekologicky přívětivější možnost. Nicméně, se u něj stále vyskytují technologické

nedostatky s odvodem vysoce koncentrovaných nebezpečných aerosolů, toxických výparů a kovových částic rozptýlených v prostředí stroje. Prostředím stroje je vzduch. Operátor stroje, jakožto lidská bytost vzduch vdechuje, tím vzniká nebezpečí, že cokoliv z výše zmíněného se pravidelně dostává operátorovi do plic. U near-dry EDM, což představuje přechod mezi EDM v dielektriku a EDM suchým, jsou hlavním úskalím koncertované a nestabilní vznikající směsi, kde je riziko hořlavosti plynů a kapalinových médií vzniklých jako nežádoucí emise po EDM procesu. Při tomto typu EDM obrábění se musí brát v úvahu i potencionální nebezpečí výbuchu. Navíc jak bylo popsáno výše, u Near-dry EDM není zcela zvládnutá technologie čištění mlhy. [27]

### 3.3.7 Dopady jednotlivých složek obrábění na životní prostředí

Na Obrázku 25 je v koláčovém grafu znázorněno rozložení celkového dopadu na životní prostředí pro jednu hodinu hrubování EDM obráběním. Z grafu je zřejmé, že většinový vliv má samotný příkon obráběcího stroje. Dalšími nezanedbatelnými částmi jsou výroba a recyklace dielektrika a těsně za ním se nachází spotřeba energie na chlazení. Ještě menší environmentální vliv má s 5,1 procenty výfukový systém, potom s 3,9 procenty získání materiálu elektrody. Další složky jsou zanedbatelně malé. Nejzajímavější z pohledu potenciálního zmenšení ekologického dopadu je právě optimalizace dopadu na životní prostředí plynoucí z výroby a recyklace dielektrika.



Obrázek 25.: Rozdělení dopadu na životní prostředí jednotlivých složek při 1 hodině EDM hrubování [17]

### 3.3.8 Elektromagnetický smog

Nejvyšší přípustné hodnoty stanovuje "Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2013/35/EU ze dne 26. června 2013 o minimálních požadavcích na bezpečnost a ochranu zdraví před expozicí zaměstnanců rizikům spojeným s fyzikálními činiteli

(elektromagnetickými poli) (dvacátá samostatná směrnice ve smyslu čl. 16 odst. 1 směrnice 89/391/EHS) a o zrušení směrnice 2004/40/ES". Tyto hodnoty jsou k nahlédnutí v Tabulce 2. [37]

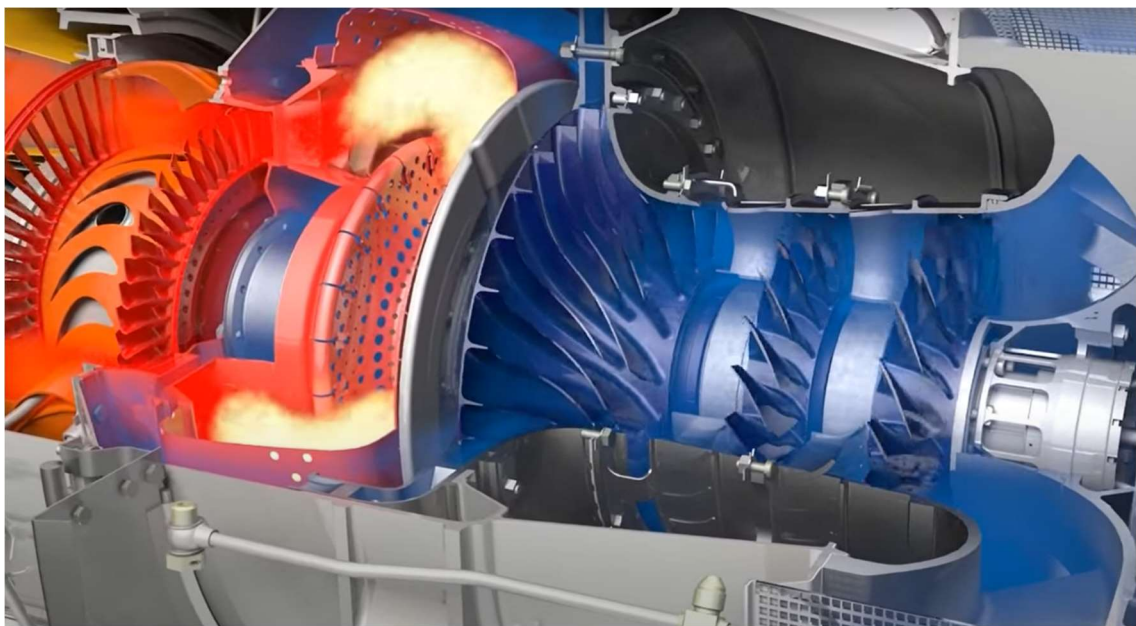
Tabulka 2.: Nejvyšší přípustné hodnoty dle [37]

Veličina	Lokální expozice končetin	Kontrolované pracovní podmínky	Běžné pracovní podmínky
	Kmitočet f [Hz]		
Statické magnetické pole (Hodnoty magnetické indukce) [T]	<1		
	8	8	2
Intenzita elektrického pole indukované v těle [ $V \cdot m^{-1}$ ]	Kmitočet f [kHz]		
	1 - 3	3 - 10 000	
	1,1	$3,8 \cdot 10^{-4} \cdot f$	
Intenzita elektrického pole na smyslové vnímání [ $V \cdot m^{-1}$ ]	Kmitočet f [Hz]		
	1 - 10	10 - 25	25 - 400
	$0,7/f$	0,07	$0,0028 \cdot f$

Intenzita elektrického pole na smyslové vnímání, jehož limitní hodnoty jsou zobrazeny jako třetí veličina v posledním řádku Tabulky 2, ovlivňuje centrální nervovou soustavu, především oční sítnice čili zrak a některé přechodové změny v mozkových funkcích. [37]

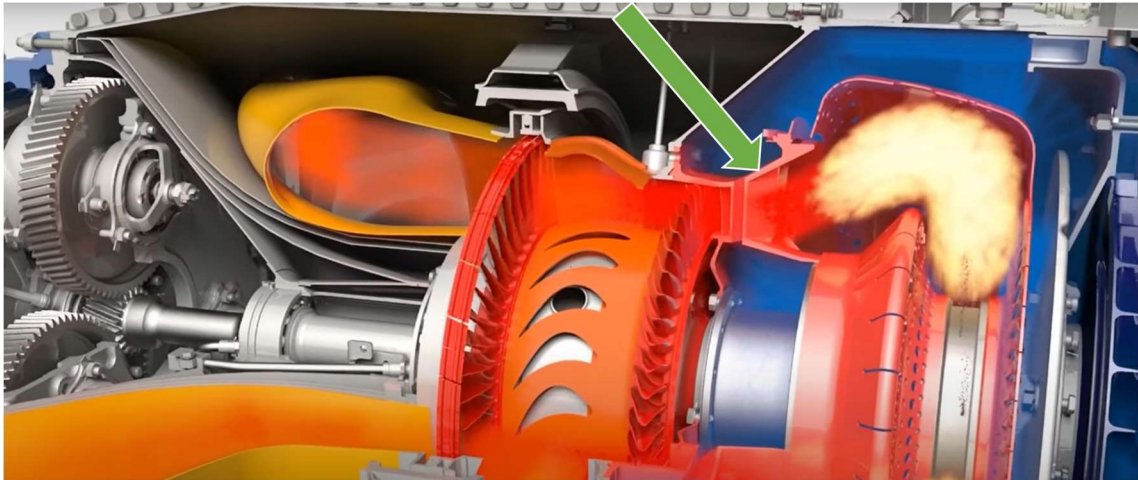
## 3.4 Materiál obráběného motorového dílu

### 3.4.1 Funkce motorového dílu



Obrázek 26.: Pohled na rozmezí kompresorové části a spalovací komory - částečný řez turbovrtulovým motorem H-series od GE Aviation [38]

Na Obrázku 26 je znázorněn tok plynů skrz turbovrtulový motor a všechny jeho součásti. Modrá barva reprezentuje chladný plyn nasátý z okolní atmosféry, naopak červenou barvu má plyn v místě, kde dosahuje nejvyšších teplot. Při cestě ven z motoru teplota plynu klesá, což je zobrazeno přechodem červené barvy plynu, přes tmavě oranžovou až po jantarovou na výstupu z turbovrtulového motoru, viz Obrázek 27. Základními částmi motoru jsou kompresor, spalovací komora a generátorová část. Kompresor nasává a stlačuje vzduch do spalovací komory. Používá se víceústupňový kompresor, kde se mezi každým rotačním stupněm nachází stator, který nasměruje proud vzduchu na lopatky následujícího rotačního lopatkového kola.



Obrázek 27.: Pohled na rozmezí spalovací komory a generátorové části - částečný řez turbovrtulovým motorem H-series od GE Aviation [38]

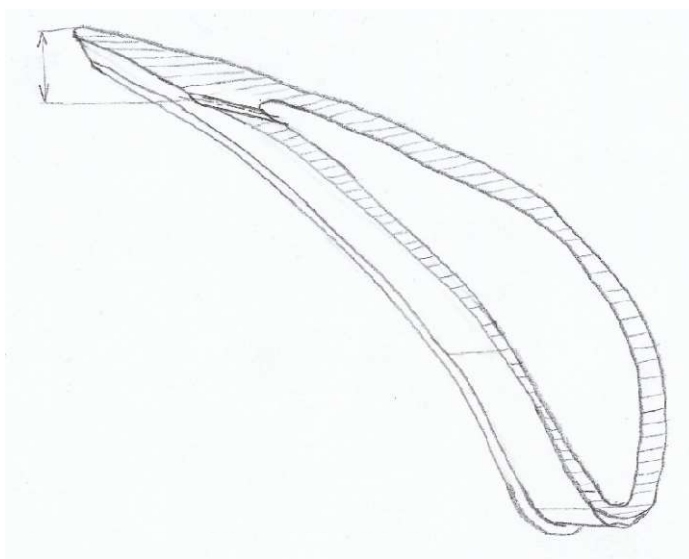
Posléze je se stlačeným vzduchem smícháno palivo, nastává hoření směsi a expanze plynů, která je na obrázku naznačena žlutým plamenem, což se odehrává těsně před státorem generátorové turbíny, tzv. GT rozvaděč viz Obrázek 28. Umístění je naznačeno šipkou na Obrázku 27. GT rozvaděč je právě jedním z nejvíce tepelně namáhaných dílů celého motoru. Plyny, díky nasměrování od GT rozvaděče, předávají svou expanzí nabytou energii generátorové turbíně, která pohání rotory kompresoru. Zbytek své energie po průchodu přes GT turbínu předávají poslednímu rotačnímu lopatkovému kolu, jež pohání vrtuli motoru.



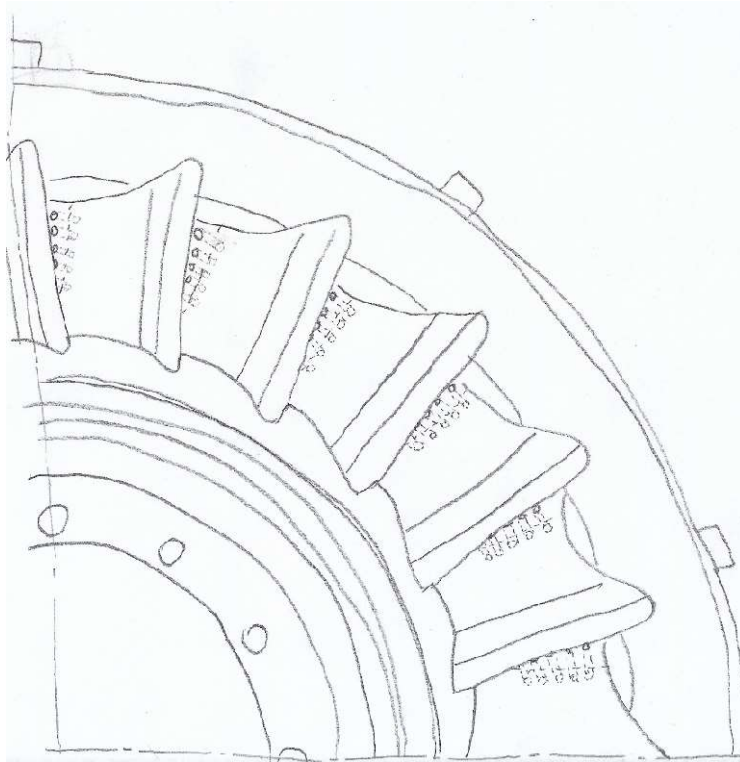


Obrázek 28.: Fotografie GT rozvaděče [39]

Chlazení odtokových hran lopatek GT rozvaděče je jedním z důležitých faktorů pro prodloužení jeho životnosti. Jak je možné vidět na Obrázku 30, případně v řezu na Obrázku 29, v každé lopatce se nachází pět děr o průměru 0,5 mm, které ústí poblíž odtokové hrany lopatky. Tyto otvory by měly zapříčinit vytvoření tenké vrstvičky chladnějšího vzduchu a zabránit tak přímému kontaktu velmi horkých spalin s povrchem lopatek. Celý GT rozvaděč je navíc pokryt tzv. alitační vrstvou, která plní funkci přídatné teplotní bariéry. Z důvodu chlazení lopatek za provozu je žádoucí, aby díry zůstaly průchozí i po aplikaci alitační vrstvy.



Obrázek 29.: Skica lopatky GT rozvaděče v řezu, v místě osy posledního (při pohledu do středu) z pěti otvorů



Obrázek 30.: Skica GT rozvaděče, se zvýrazněnými chladicími otvory

### 3.4.2 Žáropevnost

Žáropevnost je schopnost materiálu odolávat tečení a relaxaci. Obrobek je vyroben z materiálu René 108 DS, jehož předností je výborná žáropevnost. René 108 DS se řadí mezi žáropevné slitiny neželezných kovů, což je podskupinou kovových žáropevných materiálů, mezi které patří i žáropevné slitiny železa (feriticko-perlitické a bainitické oceli, vysokopopuštěné martenzitické oceli, žáropevné austenitické oceli). Tepelné gradienty vyvolávají v materiálu napětí. Velikost těchto napětí způsobených změnami teplot se dá vyjádřit vztahem (1) a závisí na modulu pružnosti při zvýšené teplotě  $E_T$ , součiniteli tepelné roztažnosti  $\alpha$  a na tepelné vodivosti  $\lambda$ . [40]

$$\sigma \approx E_T \cdot \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \text{grad } T \quad (1)$$

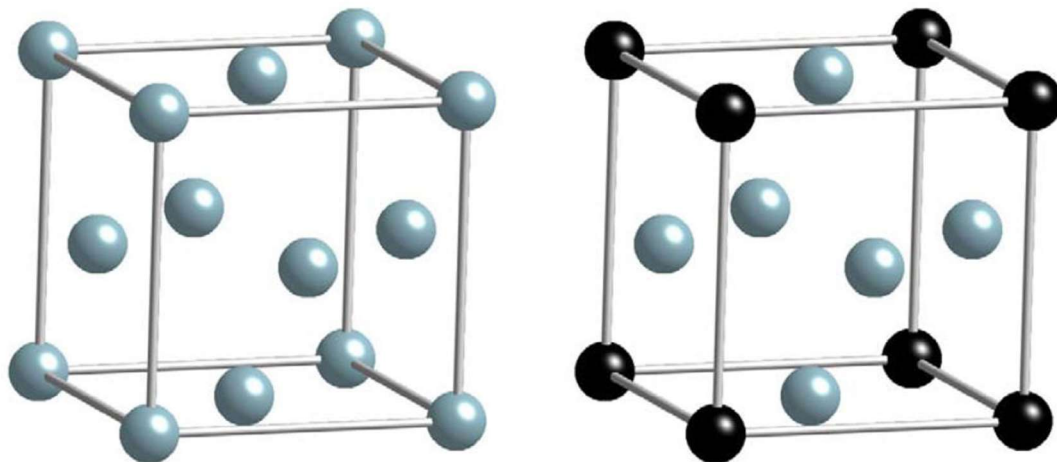
Konstanta  $E_T \cdot \frac{\alpha}{\lambda}$  je možným hlediskem pro komparaci odolnosti materiálu proti tepelné únavě. [40]

### 3.4.3 Niklové superslitiny

Jedním z nejvyspělejších konstrukčních materiálů jsou niklové superslitiny. Jejich jedinečnost spočívá v kombinaci jejich technologických vlastností. Tato synergie dělá tuto skupinu materiálů nenahraditelnou v mnoha odvětvích, zejména v letectví a kosmonautice, nebo energetice a jaderných aplikacích. Za kombinaci těchto vlastností vděčí niklové superslitiny legujícím prvkům v daných poměrech a výslednému fázovému složení materiálu, které vytváří jedinečnou vnitřní stavbu. [41] [42]

Mikrostruktura typické niklové superslitiny je složena ze tří základních fází. Fáze  $\gamma$  tvořící matici, je nejměkčí ze všech tří fází. Krystalizuje v krychlové plošně středěné mřížce (tzv. FCC, z anglického Face-centred cubic). Do této fáze se vylučuje velká část částých legujících prvků, zejména kobalt, chrom, wolfram, ruthenium, molybden a rhenium. Jedná se tedy o tuhý roztok fáze  $\gamma$ . Fáze, označována jako  $\gamma'$ , je fází precipitačně vytvrzující. Právě této fázi vděčí niklové superslitiny za dobré mechanické vlastnosti i za zvýšených teplot. Podobně jako u matrice, krystalizuje i fáze  $\gamma'$  v krychlové plošně středěné mřížce. Jedná se o koherentní precipitát obsahující vysoké zastoupení titanu, hliníku a tantalu. Třetí nejtypičtější fází, jež nalezneme v niklových superslitinách jsou karbidy kovů a boridy na hranicích zrn. Zejména se jedná o karbidy titanu, tantalu a hafnia. Boridy tvoří bór ve vazbě s chromem, nebo molybdenem. Boridy precipitují na hranicích zrn fáze  $\gamma'$ . [43]

Vývoj prvních niklových superslitin začal před více než sto lety. Stalo se tak v roce 1918 patentováním slitiny Ni-20Cr (Nichrome). Jež se stala základem všech po ní následujících superslitin, zejména tedy řad materiálů s názvem Nimonic a Inconel. V roce 1929, Bedford, Pilling, a Merica vyšli se studií zaměřenou na vliv hliníku a titanu na mechanické vlastnosti Nichromové superslitiny. Objevili korelaci jejich existence v superslitině s její zvýšenou odolností proti tečení. [44][45]



Obrázek 31.: Porovnání krystalové mřížky fáze  $\gamma$  a vytvrzující fáze  $\gamma'$  (šedou barvou jsou znázorněny atomy Ni a černou barvou atomy Al) [43]

Výše zmínění vědci nebyli schopni rozeznat samotné precipitáty, dnes označované jako  $\gamma'$  (viz Obrázek 31). O vlivu hliníku a titanu na odolnost proti tečení niklových superslitin nepochybovali. Na základě jejich poznání byly vyvíjeny, v té době nové, niklové superslitiny. Dnes je již známý fakt, že vytvrzující fáze  $\gamma'$  je hlavním důvodem jejich zpevnění. [46]

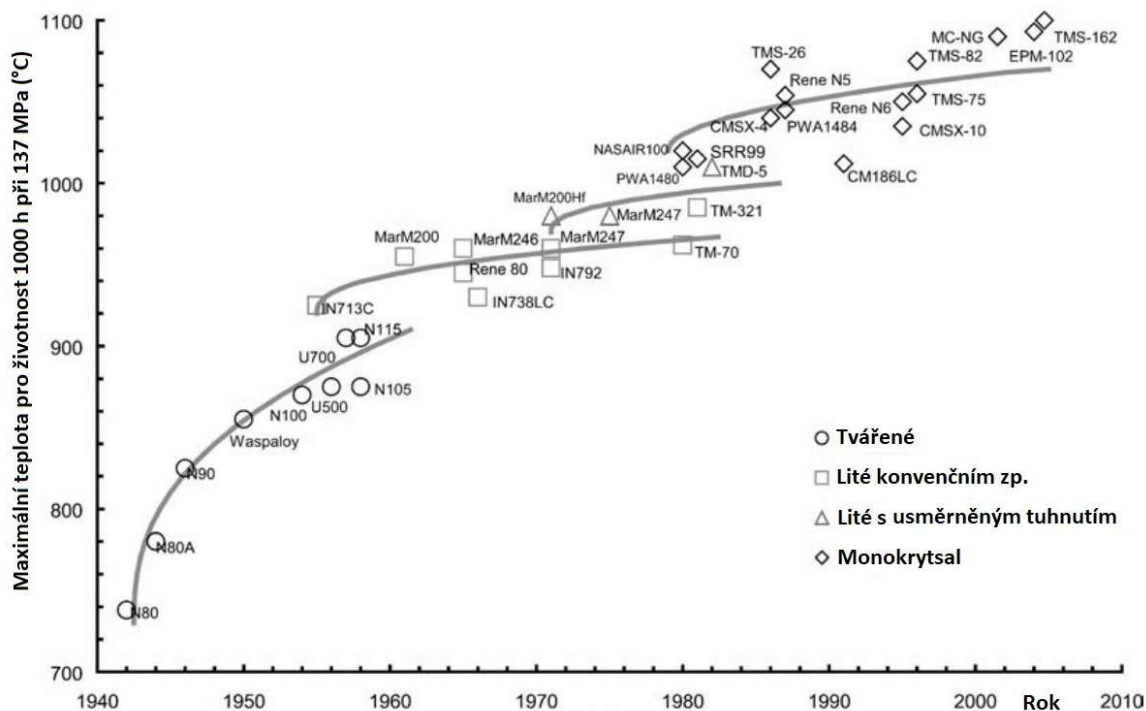
V dalších letech byl vysoký podíl niklu částečně nahrazen kobaltem, čímž došlo ke zvýšení odolnosti proti vysokoteplotní korozi. V této době byl hlavním zástupcem Ni-Cr-Co slitin Nimonic 90, který obsahoval 20 % kobaltu. [47]



Během druhé světové války byly superslitiny ještě vylepšeny zvýšením obsahu hliníku a titanu. Na konci čtyřicátých let bylo zjištěno, že dolegováním superslitiny prvky jako molybden, wolfram, niob, tantal, či rhenium, se přispívá k výraznému substitučnímu a intersticiálnímu, nebo precipitačnímu zpevnění karbidy. Další velký krok ve zlepšení čistoty a mechanických vlastností nastal na základě objevu technologie vakuového lití v roce 1952. Možnost odlévat kovy ve vakuu přineslo inovaci nejen ve vývoji niklových superslitin, ale obecně v metalurgii. Před nástupem vakuového lití nebyla napříč leteckým průmyslem přijata možnost využít niklové superslitiny jako materiál pro lopatky turbín. Jedna z prvních vakuově litých slitin byl Inconel 713C a použití této technologie se nadále rozšířilo napříč leteckým průmyslem. Na konci padesátých let minulého století, H.L. Eiselstein vyvinul Inconel 718, který byl precipitačně zpevněn intermetalickou fází  $\gamma''$  (Ni<sub>3</sub>Nb), a spolu s Waspaloy, se začal okamžitě produkovat. V šedesátých letech se objevila myšlenka, že částečné nahrazení obsahu chromu by mohlo ještě více zlepšit odolnost proti tečení. Nicméně, tato legura byla nezbytná pro ochranu materiálu před vysokoteplotní korozi. Proto se staly všechny materiály, založené na myšlence snížení obsahu chromu, ve prospěch jiných legur, jevu vysokoteplotní koroze více náchylné. Díky tomu se, ale začala důkladněji zkoumat mikrostruktura a její vliv na mechanické vlastnosti. [42] [48]

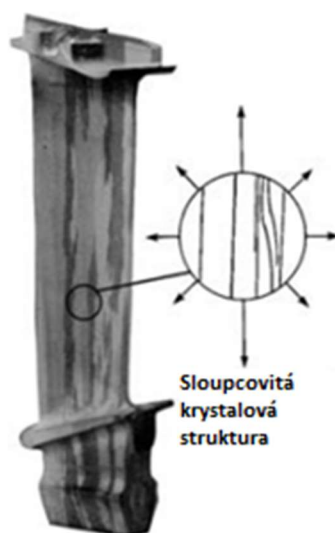
Nespočet nových chemických složení a poměrů legujících prvků se rozšířilo mezi metalurgy a umožnilo vytvářet nové typy superslitin. Tento postup ale vedl i k nevyhnutelnému množství chyb. Využití počítačových softwarů se nabízí jako prostředek pro rozklíčování komplexnosti problematiky chemického složení a následného poměru skladby fází materiálu. Z konečného chemického složení a tím pádem fázové skladby materiálu vychází jeho mechanické vlastnosti. [49]

Na úkor titanu a hliníku se začalo zvyšovat procentuální zastoupení molybdenu a tantalu, jejichž hlavním přínosem je zpevnění  $\gamma$ -fáze (matrice). Předpoklad náhrady molybdenu za wolfram byla aplikována při vývoji slitiny MAR M200. Tato slitina ale vykazovala přílišnou náchylnost k tečení. Dalším krokem bylo dolegování slitiny MAR M200 hafniem, a tak byla stvořena slitina s názvem MAR M002. Legování hafniem vede k jemnému a rovnovážnému formování karbidů typu MC (obecně karbid kovu). Tento poznatek měl za následek změny v různých již dříve představených slitinách, jako Inconel 713C (změna na MM-004) a B1900 (změna na MM-007). [42] [50]



Obrázek 32.: Přehled evoluce niklových superslitin [44]

Z Obrázku 32 je patrný pokrok ve vývoji niklových superslitin z hlediska jejich creepové životnosti. Odolnost vůči vysokoteplotnímu tečení je velmi závislá na způsobu, jakým krystalizuje struktura a jak veliké je výsledné zrnno. Od tvářených materiálů se poměrně rychle přešlo k materiálům odlévaným. Následný pokrok v technologii slévání umožnil usměrňovat tuhnutí odlitého materiálu tak, aby ve struktuře vznikl co nejmenší počet příčných hranic zrn, viz Obrázek 33. Struktura tohoto typu se nazývá sloupcovitá. Možnost kontrolovat tuhnutí materiálu, přirozeně pomohla vývoji struktur úplně bez hranic zrn, tzv. monokryсталů. [44]



Obrázek 33.: Sloupcovitá struktura zrn [44]

### 3.4.4 René 108 DS

Při volbě materiálu pro funkční prvek je nutné vědět, při jakých podmínkách bude pracovat a jaká jsou možné scénáře, které mohou v materiálu nastat. Často se jedná zejména o zamezení ztráty stability, v dalších aplikacích ale může jít o rozměrovou stálost, zamezení cyklové únavy čili šíření trhlin, potlačení vysokoteplotní oxidace apod. Při aplikaci v leteckých motorech, existují lokální stavy s extrémními podmínkami, které se nachází uvnitř motoru a těmto podmínkám jsou vystavovány funkční části motorů. Materiál proto musí odolávat vysokým teplotám, tečení, vysokoteplotní korozi a materiálové únavě.

Z tohoto důvodu byl vyvinut materiál René 108 DS, jedná se o niklovou superslitinu. V Tabulce 3 je zobrazeno chemické složení materiálu René 108 DS. Slitina je precipitačně vytvrzená vysokým podílem (kolem 63 %)  $\gamma'$  precipitátů. U niklových superslitin je vyžadováno tepelné zpracování, které zapříčiní částečné rozpouštění precipitátů. Vlastnosti materiálu jsou dány především jeho fázovou stavbou. [51]

Tabulka 3.: Chemické složení René 108 DS (hmotnostní procenta) [52] [53]

Co	Re+W	W	Cr	Al	Hf	Ni	Mo	Ta	Ti	Re
9-10	Max 9,7	9,3- 9,7	8,0- 8,7	5,25- 5,75	1,30- 1,70	Matrice	0,5	3	0,7	0,2

Většina zmíněných prvků z kapitoly 3.4.3 je obsažena i v materiálu René 108 DS, viz Tabulka 3. Chrom substitučně zpevňuje materiál a zvyšuje jeho odolnost proti vysokoteplotní oxidaci. Zároveň může být kovem ve výše zmíněných karbidech. Rhenium, wolfram, tantal, kobalt a molybden se podílí na vytvoření intersticiálního, či substitučního tuhého roztoku ve fázi  $\gamma$ . Wolfram zároveň ovlivňuje vznik fáze  $\gamma'$  a karbidů kovů, stejně tak kobalt. Kobalt navíc zvyšuje protikorozi odolnost za zvýšených teplot. René 108 DS obsahuje jen malé množství titanu, což vede ke zlepšení slévatelnosti. Vysoký vliv na slévatelnost má poměr legujících prvků Al:Ti, pokud je tento poměr vysoký, pak je slévatelnost výrazně zlepšena. [54] Zároveň to ale znamená, že majoritním prvkem tvořícím fázi  $\gamma'$  je hliník. Hafnium, jak je také popsáno v kapitole 3.4.3 (v odstavci nad Obrázkem 32), je důležitým legujícím prvkem pro potlačení náchylnosti k tečení, pokud se ve slitině vyskytuje vysoký podíl wolframu.

## 4 Experimentální část

Z funkčního hlediska celého motoru je velmi podstatné zajistit vytvoření filmu chladnějšího vzduchu na odtokových hranách GT rozvaděče a tím chránit alitační vrstvu i samotný materiál rozvaděče před vysokými teplotami spalin. Rozvaděč GT je zejména z důvodu vysokých pracovních teplot vyroben z niklové superslitiny René 108 DS. Problematika funkce motorového dílu v rámci celého turbovrtulového motoru je stručně popsána v kapitole 3.4.1.

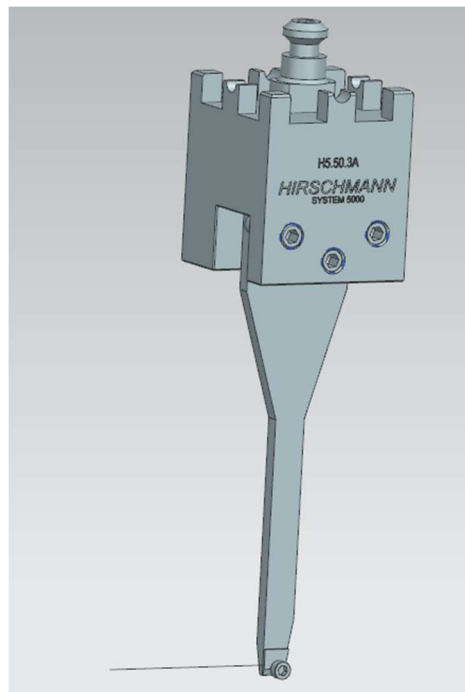
Rozvaděč GT obsahuje 23 lopatek, což celkově představuje 115 chladicích otvorů. Díry mají přesně danou polohu od odtokové hrany lopatky. Jejich zakótování je vidět na skice, viz Obrázek 29. Po několika desetiletích došlo k výměně formy pro odlévání polotovaru GT rozvaděče. Změna formy s sebou přinesla neidenticky vyrobenou novou formu, a proto se změnilo průtokové číslo rozvaděče. Tento problém bylo nutné řešit, a proto bylo zavedeno nápravné opatření, což zachovalo průtok, ale zároveň způsobilo vyšší rozptyl v délce jiskření jednotlivých otvorů. Což je zřejmé z náčrtku, že i malé příhnutí, nebo odchylka ve směru rovnoběžném s kótou vyvolá relativně veliký nárůst v tloušťce materiálu, který je nutné elektroerozivně odebrat.

### 4.1 Analýza dosavadního řešení

Hloubení se provádí na hloubičce Penta 1060 CNC. Zprvu bylo hloubení otvorů o malých průměrech na lopatkách rozvaděče prováděno na dvou menších tříosých hloubičkách. Nemožnost získat podporu od výrobce, nedostatek náhradních dílů v kombinaci se zastaralostí strojů a požadavky na zlepšení automatizace procesu hloubení ze strany firmy GE Aviation, zapříčinilo potřebu investovat do novějšího stroje. Faktorů přesahující možnosti obou starších strojů bylo více, a proto byly vyměněny za plně automatickou hloubičku od firmy Penta. V ideálním případě by obsluha stroje měla provádět pouze zakládání a vykládání rozvaděče. Veliký důraz je tedy kladen na co největší omezení lidské práce a opakovatelnost procesu.

Opakovatelnost procesu hloubení celého kola rozvaděče a omezení lidské práce jsou atributy procesu, které se nedaří dostat do stavu, kdy by GE Aviation bylo spokojeno. Opakovatelnost selhává na proměnlivé tloušťce erodovaného materiálu. Vyjiskření všech sto patnácti otvorů na konkrétním rozvaděči může, pokud se sejdou nepříznivé okolnosti, trvat i dvakrát déle, než je běžné. Okolnostmi, které prodlužují proces hloubení, jsou geometrické odchylky lopatky, nevodivé vměstky z licího procesu, případně další nehomogenity v lité struktuře. Samozřejmě se tyto okolnosti i kombinují, a to vede ještě k delším obráběcím časům. Během jiskření děr na jednom rozvaděči je nutná výměna elektrody, to představuje další překážku k požadovanému stavu. Z hlediska racionalizace výroby a zefektivnění vytížení operátora stroje se nutnost výměny elektrody během procesu jiskření stává problémem. Z tohoto úhlu pohledu by ideálním scénářem bylo, aby jedna elektroda vyjiskřila jedno celé kolo rozvaděče a měnila se spolu s obrobkem.

Momentálně se k hloubení používají následující technologické podmínky. Požívané elektrické parametry nastavené na stroji se považují za „know-how“ firmy GE Aviation s.r.o., a proto jsou zobrazeny v Tabulce 4, jen jako referenčních 100 % pro vyjádření relativních hodnot experimentálně ověřovaných elektrických parametrů. Jako materiál nástrojové elektrody je využit wolfram. Elektroda je válcového tvaru o průměru 0,5 mm. Proces hloubení je realizován bez přivedení výplachu k obráběnému místu. Za výplach by se dalo považovat automatické rychlé vyjetí elektrody z hloubené díry, v případě, že procesor stroje rozpozná přílišný odpor dielektrika způsobený odpadními látkami z procesu hloubení. Rychlé vyjetí způsobí podtlak v hloubeném otvoru a po vyjetí elektrody je část kontaminovaného dielektrika rozptýlena do okolí. Elektrojiskrové hloubení probíhá v syntetickém petroleji, který je použit jako dielektrikum. Uspořádání elektrody a její upevnění v upínací kostce je vyobrazeno na Obrázku 34. Kolem elektrody není během hloubení v podstatě žádné místo kromě vnitřního pravého úhlu mezi plochým držákem a elektrodou.



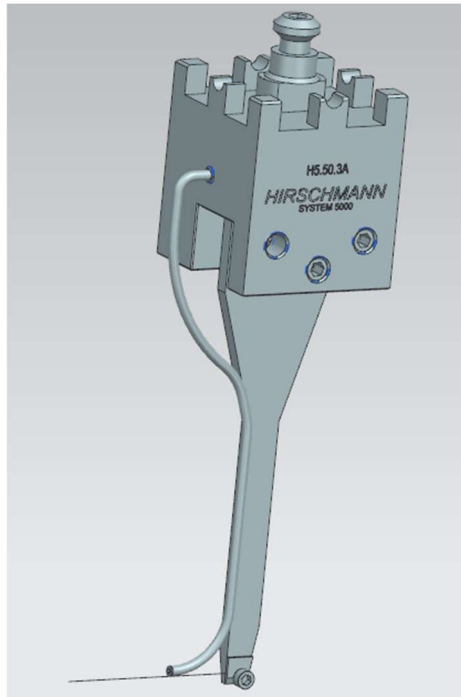
Obrázek 34.: Původní sestava elektrody s upínacím zařízením

## 4.2 Postupy k optimalizaci

### 4.2.1 Výplach

Jedná se o hloubení otvorů s vysokým poměrem délky, k průměru. Poměr je zhruba 6:1. Pro takovéto aplikace je klíčovým faktorem zajistit dobrý odvod oderodovaného materiálu. V kapitole 3.1.2 je podrobněji popsáno, z jakého důvodu je důležité zajistit kontinuální výplach v místě, kde probíhá elektroeroze. Z tohoto důvodu

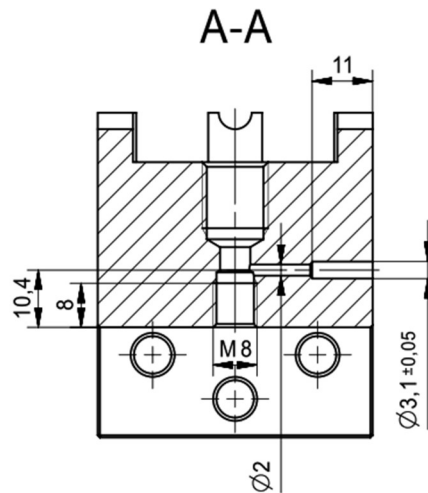
byl nejprve navržen vnější výplach. Viz Obrázek 35, kde je zobrazena původní sestava upínacího zařízení nástrojové elektrody s přidanou trubičkou pro vnější výplach.



Obrázek 35.: Přidaná trubička pro přivedení vnějšího výplachu k hloubenému místu

Díky jednoduché úpravě upínací kostky, bylo možné tento způsob výplachu vyzkoušet i za provozu, během jiskření, a to na celém díle GT rozvaděče. Jak je vidět z Obrázku 36, úprava spočívala pouze ve vytvoření závitu, pro zaslepení šroubem stavěcím plochým DIN 913 M8x8, v místě vyústění původního kanálu pro vývod dielektrika a vyvrtání osazené díry pro vývod zepředu upínací kostky. Do vytvořeného osazení se zapájela trubička, která byla následně tvářena ohybem do přibližného tvaru, dle výkresu. Trubička měla vnější průměr 3 mm a vnitřní průměr 1,5 mm. Osazení proto mělo rozměr  $3,1 \pm 0,05$  mm, pro spolehlivé spojení součástí pájením. Tato poměrně jednoduchá úprava neměla žádné měřitelné zlepšení výsledků obráběcího procesu

z hlediska strojního času, a tak bylo potřeba přistoupit k sofistikovanějším metodám úpravy obráběcího procesu.



Obrázek 36.: Řez upravenou upínací kostkou, kótovány jen prvky relevantní pro úpravu

Jak je zmíněno výše, výplach je neefektivnější, pokud směřuje přímo do místa, kde probíhá elektroerozivní děj. Dopravit čisté dielektrikum až k místu, kde probíhají výboje, se vnějším výplachem nepodařilo. Vnější výplach byl příliš daleko od místa elektroeroze a v poměrně viskózním prostředí syntetického petroleje neměl potřebný unášející účinek na erodovaný materiál. Vnější výplach by mohl fungovat při začátku procesu hloubení, kde je ale i samovolný odvod znečištěného dielektrika dostačující. Výrazné zpomalení obráběcího procesu a problém s přílišným lokálním znečištěním dielektrika nastává při „zavrtání“ elektrody hlouběji od povrchu, kde má vnější výplach zanedbatelný, či žádný vliv na odplavování kontaminovaného dielektrika.

Další možností kontinuálního výplachu je zavést výplach vnitřní. Jedná se o přivedení čistého dielektrika skrz elektrodu, tím se vytlačují odpadní látky ven z hloubeného otvoru a vyfiltrované dielektrikum může proudit přímo k čelu válcové díry. Právě dno hloubeného otvoru je kritické z hlediska odplavení nečistot pro umožnění dalších elektroerozivních cyklů. Na Obrázku 37 je vidět, že průřez elektrody je mezikružší, kdy elektroda s vnějším průměrem 0,5 mm má vnitřní průměr 0,17 mm. Materiál duté elektrody je wolfram s příměsí 30 % mědi. Jak je zmíněno na konci kapitoly 3.1.5, díky vyšší elektrické vodivosti elektrody je možné očekávat zvýšený úběr materiálu. Během experimentu se do konečného úběru materiálu promítne i změna dalších okrajových podmínek procesu. Zejména vnitřní výplach, proto bude vhodné jiskřit pro porovnání danou elektrodou i bez výplachu. Nicméně, se změnou průřezu elektrody, se do procesu elektroerozivního obrábění promítne i změna proudové hustoty. Zajímavé bude také

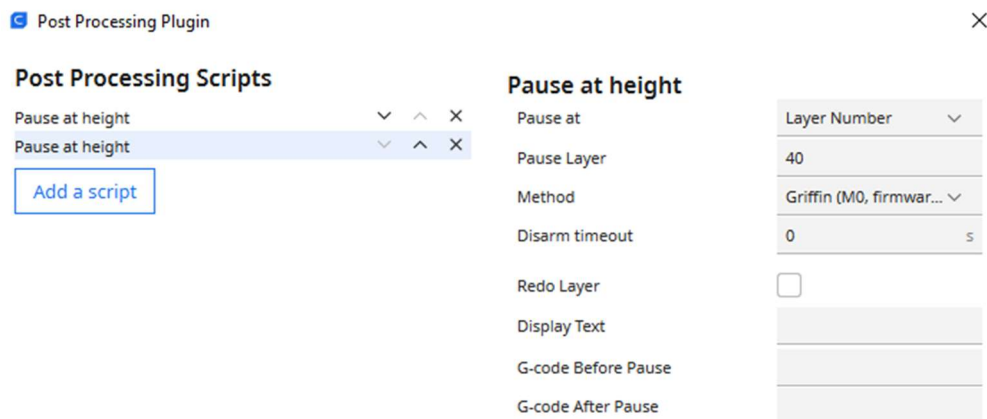
sledovat, jak se změní tepelně ovlivněná oblast, díky intenzivnějšímu chlazení od proudícího dielektrika.



Small hole drilling		Tungsten Copper Tubes Single hole			
Outerdiameter	Length	Type	Innerdiameter	Specification	Packing
0.15mm	200mm	⊙	0.07mm	70% Tungsten - 30% Copper	10 pcs.
0.20mm	230mm	⊙	0.07mm		
0.25mm		⊙	0.10mm		
0.30mm		⊙	0.12mm		
0.35mm		⊙	0.10mm		
0.40mm		⊙	0.17mm		
0.45mm		⊙	0.17mm		
0.50mm		⊙	0.17mm		
0.60mm		⊙	0.25mm		
0.70mm		⊙	0.25mm		
0.80mm		⊙	0.33mm		
0.90mm		⊙	0.33mm		
1.00mm	⊙	0.41mm			
1.10mm	⊙	0.41mm			
1.20mm	⊙	0.48mm			
1.30mm	⊙	0.48mm			
1.40mm	⊙	0.56mm			

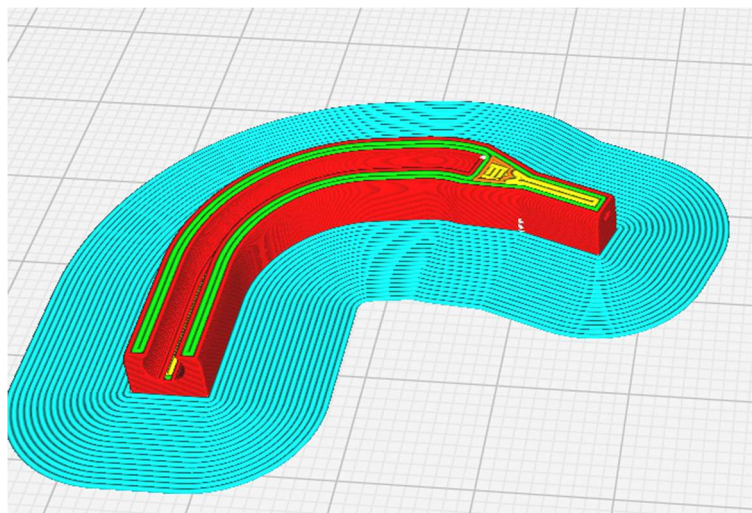
Obrázek 37.: Výstřižek z katalogu výrobce s vyznačenou elektrodou použitou pro testy [55]

Pro experiment bylo potřeba navrhnout co nejméně invazivní řešení z hlediska předělávání dostupného vybavení. Nejsnazším řešením, jak přivést dielektrikum do nitra elektrody bylo s využitím technologie plastového 3D tisku, konkrétně metodou Fused deposition modelling (FDM) na tiskárně UltiMaker S5.



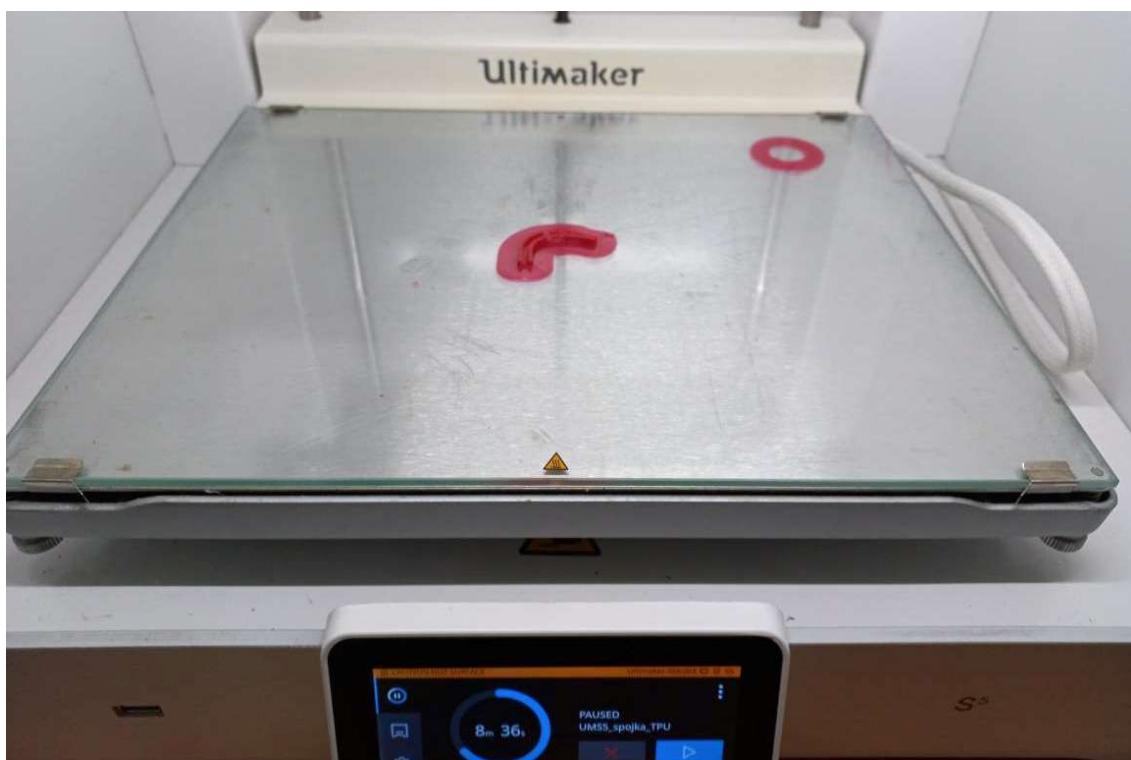
Obrázek 38.: Náhled okna post processingu ze softwaru Cura





Obrázek 39.: Zobrazení náhledu vrstveného modelu spojky při zastavení tisku ve vrstvě č. 40

Software tiskárny umožňuje po nahrání modelu a vygenerování G-kódu jeho editaci pro speciální potřeby. Tato funkce byla využita pro zastavení tisku v hladinách 29 a 40, viz Obrázek 38, kde je zobrazen vrstvený model právě při druhém zastavení tisku. Zastavení tisku polymerní spojky v daných hladinách bylo zvoleno pro umožnění vložení přívodu dielektrika tvářené trubičky a na druhý konec samotné nástrojové elektrody a jejich zatisknutí. Stav před vložení trubičky je zobrazen na Obrázku 39. Stav zastavené tiskárny před vložení nástrojové elektrody je zobrazen na Obrázku 40.



Obrázek 40.: Automaticky zastavená tiskárna během tisku polymerní spojky

Zvolený materiál pro tisk byl termoplastický polyuretan (TPU), jakožto jeden z pružnějších termoplastů vhodných k tisku metodou Fused deposition modelling

(FDM). Vysoká elasticita materiálu byla důležitá pro těsnost spojení mezi přívodní trubičkou, respektive elektrodou a tištěnou spojkou. Správná funkce spojky byla ověřena, před spuštěním obráběcího cyklu, vyjetím elektrodou nad hladinu dielektrika. Vytékající dielektrikum z konce nástrojové elektrody lze pozorovat na Obrázku 41.



Obrázek 41.: Proudící dielektrikum z trubičkovité nástrojové elektrody

#### 4.2.2 Počet současně hloubených děr

Teoretická možnost zrychlení strojního času spočívá v nahrazení jedné elektrody vícero elektrodami. Toto řešení by znamenalo hloubení všech pěti děr současně. K efektivnímu hloubení všech otvorů naráz je, ale důležité zachovat proudovou hustotu. Při přechodu, od hloubení jedné díry k pěti, je nutné zvýšit výkon generátoru stroje. Další velkou překážkou v tomto přístupu by byla menší možnost automatizace. Při neprojiskření jedné z děr vzniká zmetek a oprava je časově náročnější. Čímž dochází k ještě větší časové ztrátě. Dalším problémem tohoto řešení je nemožnost softwarově hlídat podmínky jiskření. Při jiskření každého otvoru zvláště lze jednodušeji rozpoznat pokles proudu a nějak zareagovat, např. rychlým vyjetím z hloubené díry, zmíněno v kapitole 3.1.7. Jedním z dalších těžko realizovatelných atributů takového řešení je, že by všechny konce elektrod měly být v jedné rovině, resp. stejně dlouhé. Tato podmínka se nedá jednoduše zaručit, kvůli nehomogenní struktuře odlévaného materiálu obrobku.

Jelikož se toto řešení používalo na hloubičkách, které byly v podniku předchůdkyněmi současné, jsou tyto problémy dobře zmapované, ovšem v automatizované podobě jen těžko reprodukovatelné. Dříve na obou menších tříosých hloubičkách pracoval zkušený operátor, který musel všechny výše zmíněné problémy operativně řešit a ručně korigovat.

#### 4.2.3 Doporučené parametry

Testované parametry byly voleny dle doporučení kolegů v italském Avio Aero, s přihlédnutím k experimentům Fabrizia Caiazza, Luigiho Cuccara, Ilaria Fierra, Giuseppe

Petroneho a Vittoria Alfieriho [53] a vlastnímu uvážení. Původní parametry jiskření jsou zobrazeny v prvním sloupci Tabulky 4 pouze jako hodnoty sloužící k porovnání experimentálně volených parametrů. V dalších sloupcích jsou vypsány relativní hodnoty experimentálně ověřovaných technologických podmínek EDM hloubení.

*Tabulka 4.: Relativní parametry experimentu [v % vůči současně používané technologii]*

<b>Elektrické parametry</b>	<b>Původní</b>	<b>Test 1</b>	<b>Test 2</b>	<b>Test 3</b>	<b>Test 4</b>	<b>Test 5</b>	<b>Test 6</b>
<b>Proudový stupeň</b>	100	125	138	138	100	100	100
<b>T-on</b>	100	100	100	100	111	100	100
<b>T-off</b>	100	59	35	35	78	100	100
<b>Ochrana</b>	100	100	100	89	95	100	100
<b>Zápalné napětí</b>	100	200	100	200	100	100	100
<b>Elektroda (materiál)</b>	Válec (W)	Válec (W)	Válec (W)	Válec (W)	Válec (W)	Dutý válec (WCu)	Dutý válec (WCu)
<b>Kontinuální výplach</b>	x	x	x	x	x	Tlak vnitřkem elektrody	X

## 4.3 Výsledky experimentu

Délka oderodované elektrody byla měřena na horizontálním profil projektoru Starrett 400 series, viz Obrázek 42. Tento velmi jednoduchý, ale účinný přístroj umožnil přesné měření rozměrů elektrody. Na základě provedeného měření na tomto přístroji bylo možné rychle a přesně měřit délku elektrody, což zajišťovalo spolehlivé výsledky a umožnilo sledovat změnu v délce elektrody před a po elektroerozivním procesu. Pro zajištění stejné geometrie konce elektrody byla vždy před dalším testem zkrácena nejméně o 2 mm.

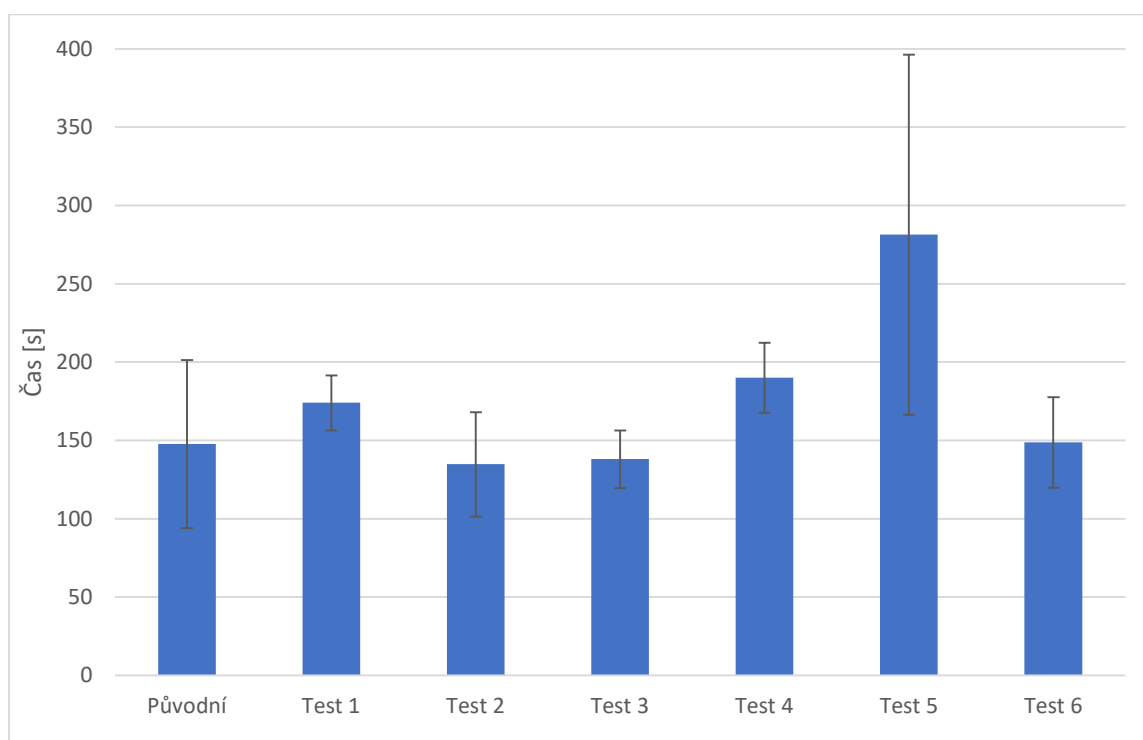
Vzhledem k potřebě znát čas pouze elektroerozivního procesu pro hodnocení dalších veličin z postupného hloubení děr byly použity ruční stopky k jeho měření. Tento přístup k měření mohl být proveden díky znatelné změně v hluku generátoru stroje při jeho zapnutí a vypnutí pro každou jednotlivou díru. Zvýšení hluku bylo spojeno i se zapnutím automatického odsávání během procesu elektroeroze, což umožnilo ještě lépe odhadnout dobu, po kterou docházelo k hloubení děr do materiálu.



Obrázek 42.: Horizontální profil projektor Starrett 400 series s aktuálně měřenou elektrodou

### 4.3.1 Rychlost hloubení chladicích otvorů

Na Obrázku 43 jsou zobrazeny průměrné časy potřebné k vyhloubení díry hluboké 2 mm do materiálu René 108 DS výše zmíněnými technologickými podmínkami. Každou technologií bylo hloubeno 10 děr. Chybové úsečky jsou nastaveny jako  $\pm 3\sigma$ . Dle normálního rozdělení by pak 99,7 % všech časů mělo vyjít do daného intervalu. Jediné testy s rychlejšími časy, než původní technologie jsou testy 2 a 3. Srovnatelný čas vyšel u testu 6, kde byla použita dutá elektroda bez zapnutého vnitřního výplachu. Nejdelší čas k vyhloubení otvoru potřebovala technologie s vnitřním výplachem a původními elektrickými parametry. Předpoklad zrychlení technologie se tedy tímto testem, s původními elektrickými parametry, nenaplnil.



Obrázek 43.: Čas potřebný k hloubení jednoho chladicího otvoru různými technologickými podmínkami

### 4.3.2 Rychlost úběru materiálu v závislosti na volené technologii

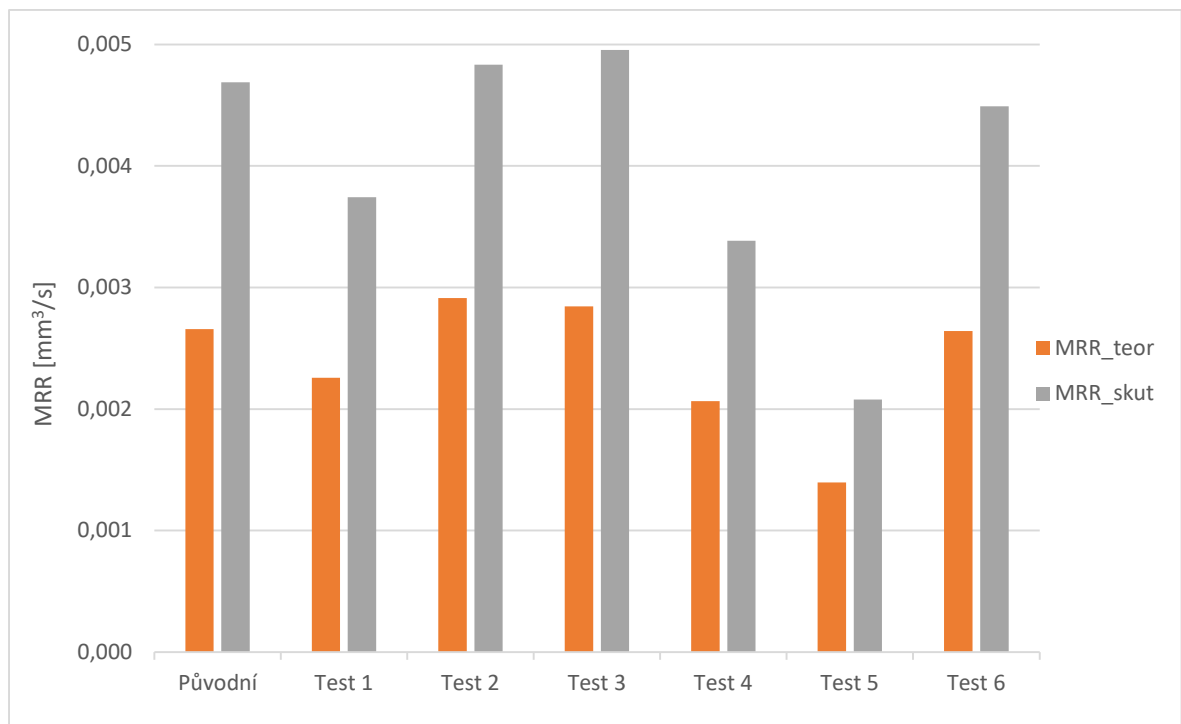
Rychlost úběru materiálu byla vyhodnocena dvakrát, jednou pro teoretickou díru o průměru 0,5 mm (dle výkresu) a podruhé pro skutečnou velikost díry vzniklé po použití různých technologických podmínek. Průměrné průměry děr jsou zobrazeny v Tabulce 5. Porovnání teoretických hodnot koresponduje s časem hloubení jednotlivých otvorů, protože se objem nemění, tzn. jedinou proměnnou je čas. Na Obrázku 44 je pro porovnání se skutečnými hodnotami znázorněna rychlost úběru materiálu.

Tabulka 5.: Průměrné hodnoty průměrů vyjiskřených děr

	Původní	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6
$\bar{d}$	0,664	0,664	0,664	0,666	0,64	0,61	0,652

Průměrné hodnoty průměrů děr byly získány pomocí aplikace ImageJ, která vypočte procentuální zastoupení určitého odstínu pixelů z celkové velikosti obrázku. Díky využití tmavé pryskyřice, která vtekla do nitra otvorů, bylo možné touto metodou vypočítat z plochy průřezu díry její průměr.

Na Obrázku 44 jsou šedivými sloupci znázorněny skutečné rychlosti úběru materiálu (MRR), vypočteny z reálných velikostí děr. Ve výkresové dokumentaci je ale požadován pouze otvor o průměru 0,5 mm, proto je nutné vztáhnout časy hloubení i vůči teoretickému rozměru otvoru (oranžové sloupce). Relativní rozdíl těchto hodnot má význam sledovat zejména u Testu 5, kde byl otvor nejmenší. U ostatních otvorů byly velikosti podobné, proto jsou i poměry MRR teoretického ku MRR skutečnému téměř shodné.



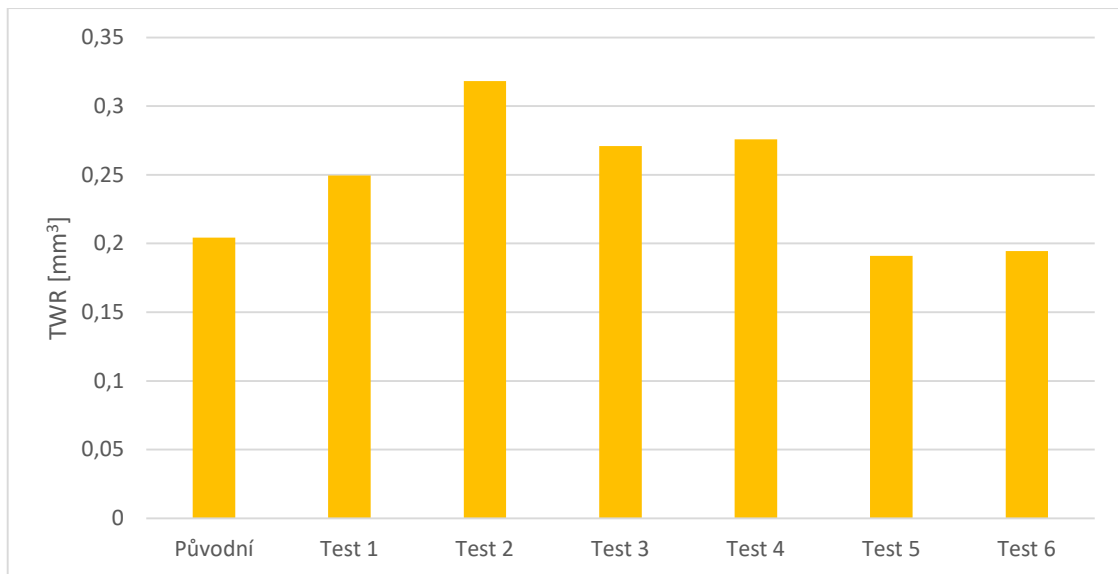
Obrázek 44.: Rychlosti úběru materiálu

#### 4.3.3 Opotřebení elektrod v závislosti na volené technologii

Obrázek 45 představuje údaje o opotřebení nástroje po provedení výše definovaných testů. Z výsledků je patrné, že největší opotřebení nástroje bylo zaznamenáno po provedení testu číslo 2. Tento výsledek naznačuje, že daný test vyvolal výrazné tepelné namáhání nástroje, což bylo pravděpodobně způsobeno nízkým časem T-off a nižším zápalným napětím. Další testy, konkrétně testy 1, 3 a 4 dosáhly podobných hodnot opotřebení. To naznačuje, že tyto testy měly podobnou míru tepelného namáhání nástroje. Na druhé straně testy 5 a 6 se ukázaly jako nejuspěšnější, s nižším stupněm opotřebení než původní technologie. Tento výsledek je pozitivní, protože naznačuje, že při těchto testech byl efektivněji využit materiál nástroje. Zvláště test číslo 5 vykázal nejnižší hodnotu opotřebení, což je v souladu s očekáváním. Tento test využil chladicího účinku dielektrika na nástrojovou elektrodu, což pravděpodobně přispělo



k snížení teploty a tím i k menšímu opotřebení nástroje. Testy 5 a 6 přinesly pozitivní výsledky a ukázaly potenciál pro zlepšení obráběcího procesu, zejména z hlediska snížení opotřebení nástroje.

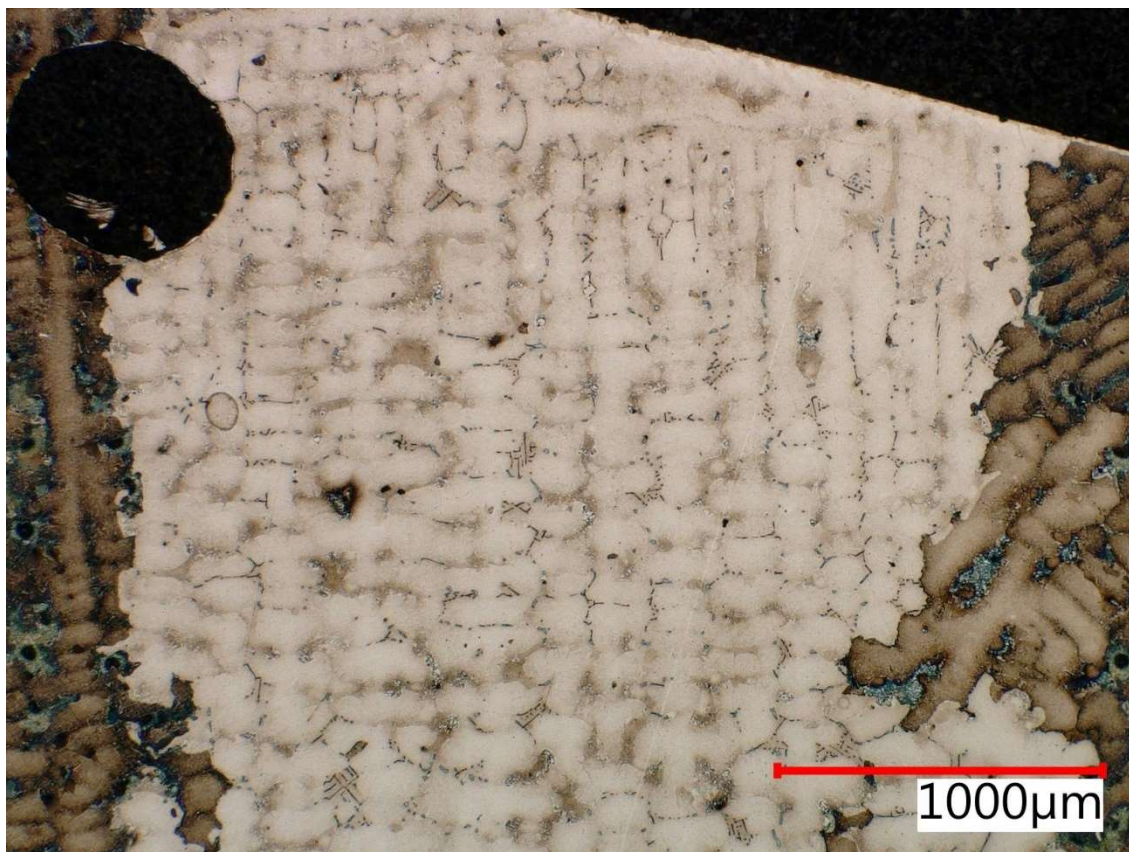


Obrázek 45.: Opotřebení elektrody pro všechny testované podmínky elektroeroze

## 4.4 Metalografie

Příprava metalografických vzorků započala nadělením rozvaděče technologií WEDM. Řezy byly voleny tak, aby od hrany kvádrů byl kraj díry vzdálen alespoň 1 mm. Nadále byly tyto kvádry popsány číslem identifikujícím číslo vzorku. Pro získání dvou různých pohledů na řez otvorů, bylo potřeba rozdělení vzorků napůl. Přepůlení vzorků proběhlo na metalografické kotoučové pile. Pohled v příčném řezu na osu díry je vhodný pro pozorování nataveného materiálu na hraně otvoru. K získání kvalitního řezu a možnost rozlišení natavené vrstvy při příčném pohledu je klíčová ostrá hrana na rozmezí mezi materiálem a ztvrdlou pryskyřicí uvnitř. Pro umožnění vtečení pryskyřice do nitra děr byly z čela vzorků vytvořeny kanálky jehlovým diamantovým pilníkem. Druhá polovina vzorku byla použita pro zobrazení radiálního a tangenciálního řezu. Takovéto otevření díry umožnilo měření drsnosti na dně vzniklé prohlubně.

Při pohledu na vzorky v příčném řezu byla pozorována typická struktura niklových superslitin, viz Obrázek 46. Pro dosažení kýžené vizualizace struktury vzorků byla provedena řada kroků, které zahrnovaly broušení, leštění a leptání povrchu. Broušení bylo realizováno pouze jednostupňové, zatímco leštění se skládalo ze dvou stupňů. V prvním kroku byly vzorky podrobeny broušení s využitím brusného papíru SiC o zrnitosti 320, při přítlaku 25 N, a to po dobu 2 minut. Brusný papír byl nastaven na rychlost rotace 320 ot./min, zatímco držák vzorků se otáčel rychlostí 150 ot./min, přičemž obě rotace sdílely stejný smysl otáčení.



Obrázek 46.: Materiálová struktura pozorovaná na vzorku 1

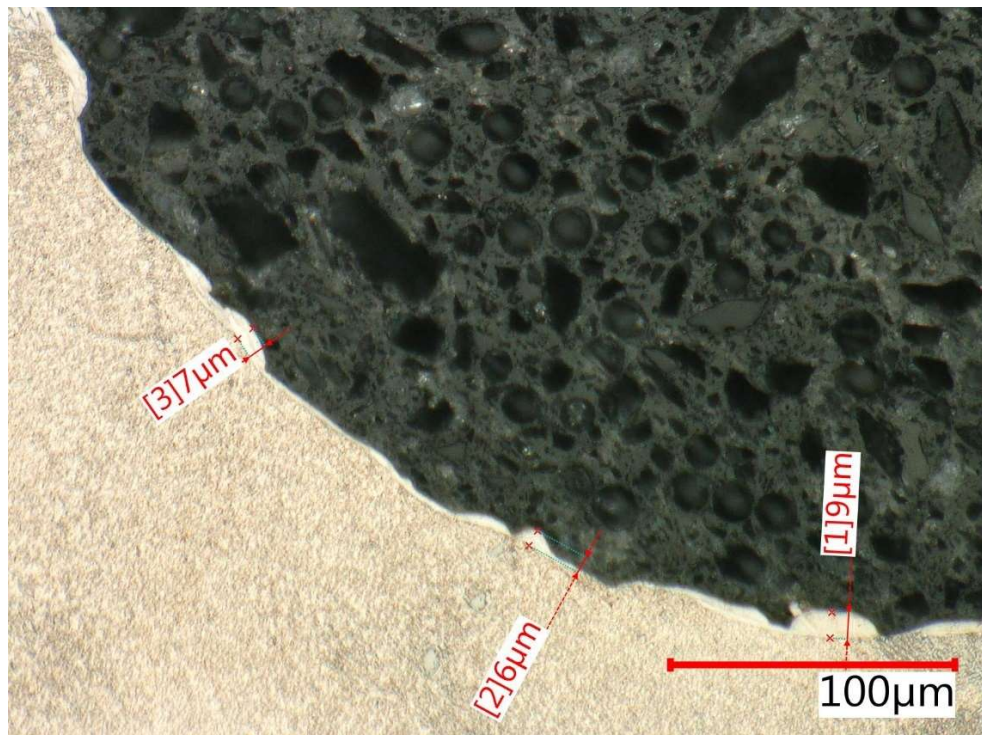
Leštění vzorků bylo rozděleno do dvou fází. Nejprve byly použity diamantové částice o velikosti 9 μm, které byly aplikovány po dobu 5 minut. Tento krok byl proveden s cílem dosáhnout požadovaného povrchového lesku a odstranění případných nežádoucích škrábanců a nedokonalostí z předchozího broušení. Následně byly na lešticí plochu aplikovány diamantové částice o velikosti 3 μm, kterými byly vzorky leštěny po dobu 6 minut. Pomocí dané posloupnosti od hrubého broušení k jemnějšímu leštění se podařilo dosáhnout dostatečně vyleštěného povrchu.

Posledním krokem v procesu přípravy metalografických vzorků bylo jejich leptání s cílem zvýraznění struktury slitiny. Pro tento účel byla zvolena směs kyselin a peroxidu. Leptadlo obsahovalo kyselinu chlorovodíkovou (HCl), kyselinu dusičnou (HNO<sub>3</sub>), kyselinu fluorovodíkovou (HF), peroxid vodíku (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) a vodu (H<sub>2</sub>O). Poměry jednotlivých složek ve směsi byly následující 7:2:2:4:5 (HCl:HNO<sub>3</sub>:HF:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O). Leptání vzorků ve směsi probíhalo po dobu 13 sekund, čímž se zvýraznily strukturní detaily v povrchové vrstvě vzorků, jež byly následně připraveny pro mikroskopickou analýzu. Kvalitní příprava metalografických vzorků je nezbytným krokem pro studium struktury kovů a jejich slitin. V tomto případě bylo cílem analýzy identifikovat tepelně ovlivněnou oblast a natavený materiál na samém okraji otvoru.



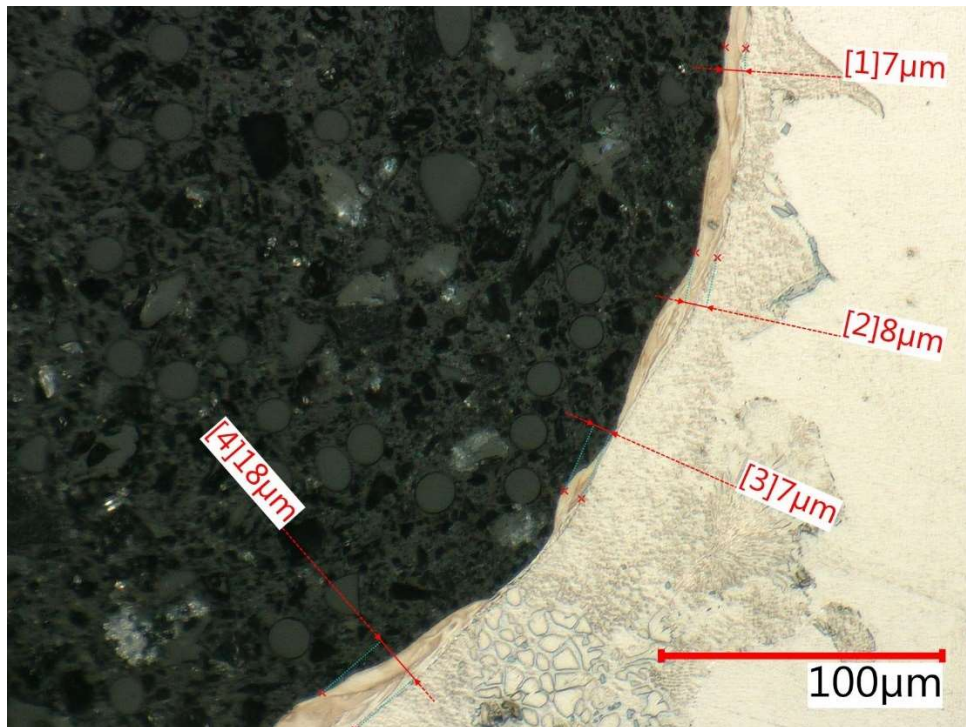
#### 4.4.1 Tepelně ovlivněná oblast v příčném řezu

Z pohledu teorie (jak je zobrazeno na Obrázku 21) a rešeršní části této práce se předpokládala přítomnost velmi malé oblasti nataveného materiálu. Nicméně tepelně ovlivněná oblast, která by se měla nacházet právě vně oblasti s nataveným materiálem, nebyla jednoznačně identifikovatelná. To znamená, že v materiálu nedošlo k žádným významným strukturním změnám s výjimkou samotného nataveného materiálu. Kvůli nepravidelné povaze této oblasti a jejímu místy dokonce absentujícímu výskytu je obtížné vyjádřit číselnou hodnotou, například průměrnou tloušťkou této vrstvy, její mocnost. Proto pro porovnání byly zvoleny maximální hodnoty nataveného materiálu a proveden odhad převažující mocnosti nataveného materiálu na hraně otvoru.



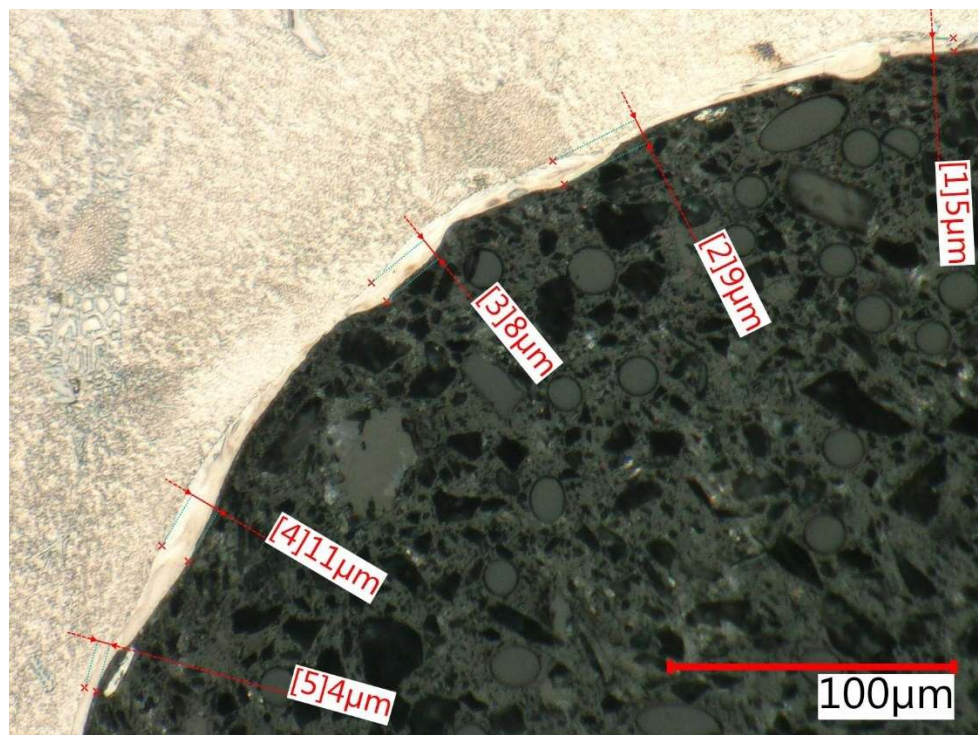
Obrázek 47.: Detail natavené vrstvy na hraně otvoru po EDM hloubení dle původních technologických podmínek

Metalografický vzorek č. 1 odpovídá v praxi používaným podmínkám jiskření. Na Obrázku 47 se nachází lokální maxima nataveného materiálu v rozsahu 6 až 9  $\mu\text{m}$ . Po velkou část obvodu výbrusu je tato vrstva relativně úzká, pouze 2 až 3  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 48.: Detail natavené vrstvy na hraně otvoru po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 1“

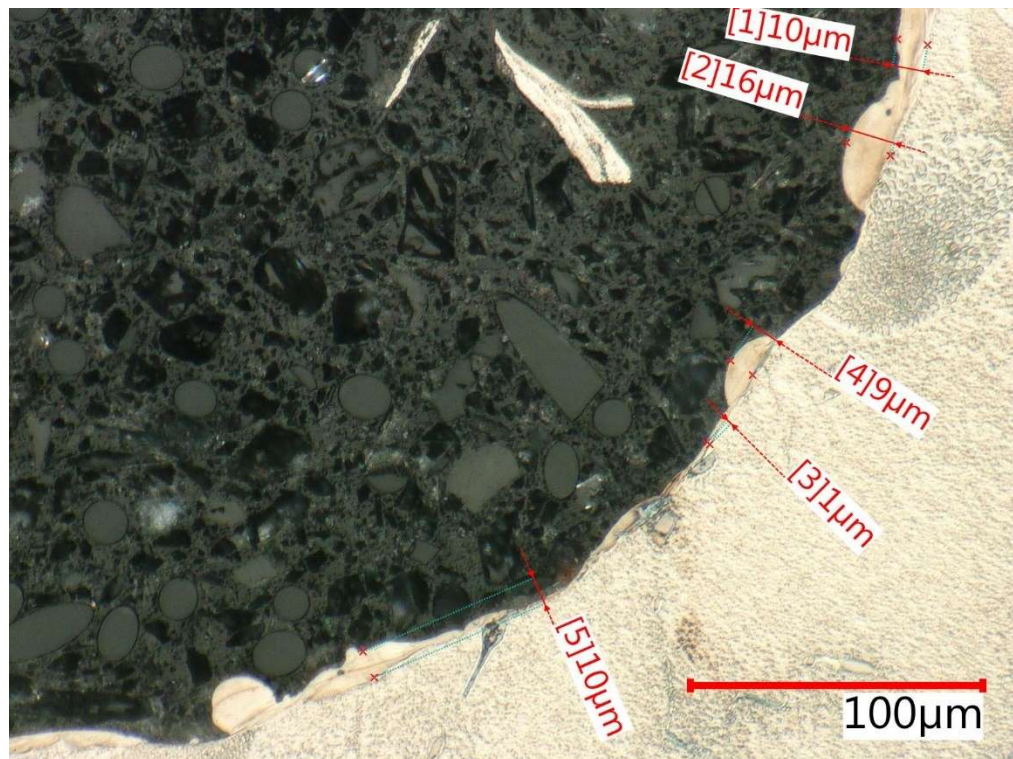
Pro metalografický vzorek č. 2 byly zvoleny technologické podmínky EDM hloubení, které odpovídají Testu 1. Na Obrázku 48 je patrný výskyt lokálních maxim nataveného materiálu v rozsahu 7 až 8  $\mu\text{m}$ . Tato vrstva je po většinu okraje otvoru zhruba 6  $\mu\text{m}$  silná.



Obrázek 49.: Detail natavené vrstvy na hraně otvoru po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 2“

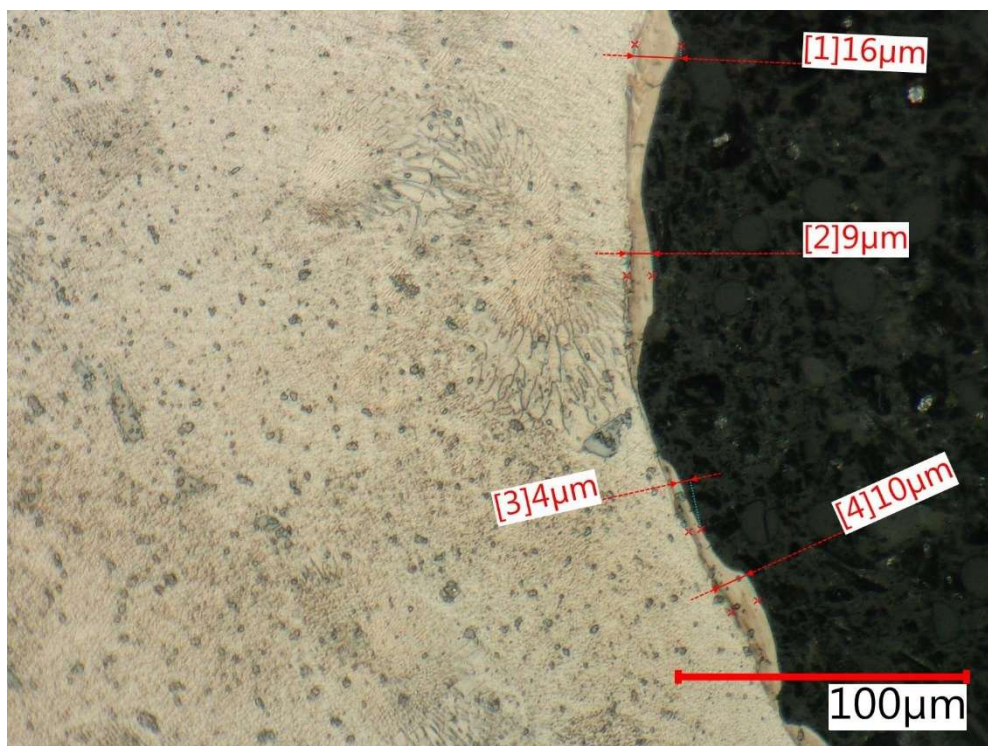


Metalografický vzorek č. 3 byl připraven po využití technologických podmínek hloubení dle Testu 2. Vizualizace detailu hrany díry tohoto vzorku na Obrázku 49 ukazuje výskyt lokálních maxim nataveného materiálu v rozsahu 8 až 11  $\mu\text{m}$ . Většina obvodu výbrusu vykazuje šířku této vrstvy zhruba 5  $\mu\text{m}$ .



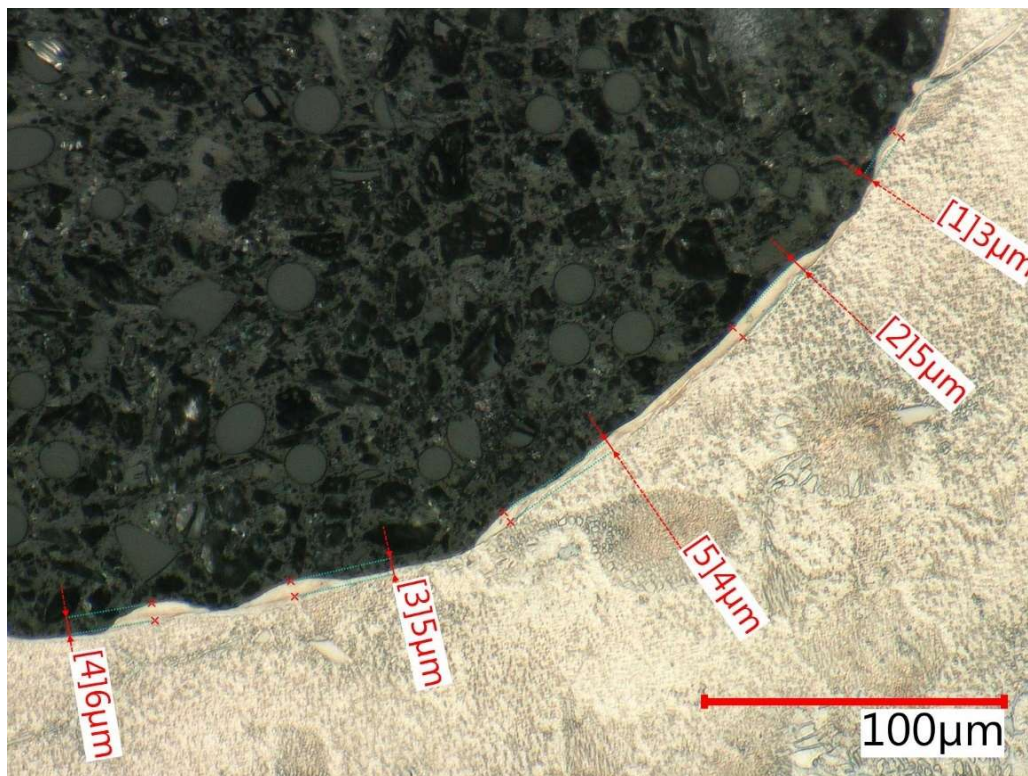
Obrázek 50.: Detail natavené vrstvy na hraně otvoru po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 3“

Metalografický vzorek č. 4 byl připraven s ohledem na experimentální podmínky jiskření dle technologických podmínek „Test 3“. Na Obrázku 50 lze pozorovat lokální maxima nataveného materiálu o velikosti 9 až 16  $\mu\text{m}$ . Většina obvodu výbrusu vykazuje přibližně 6  $\mu\text{m}$  širokou vrstvu nataveného materiálu.



Obrázek 51.: Detail natavené vrstvy na hraně otvoru po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 4“

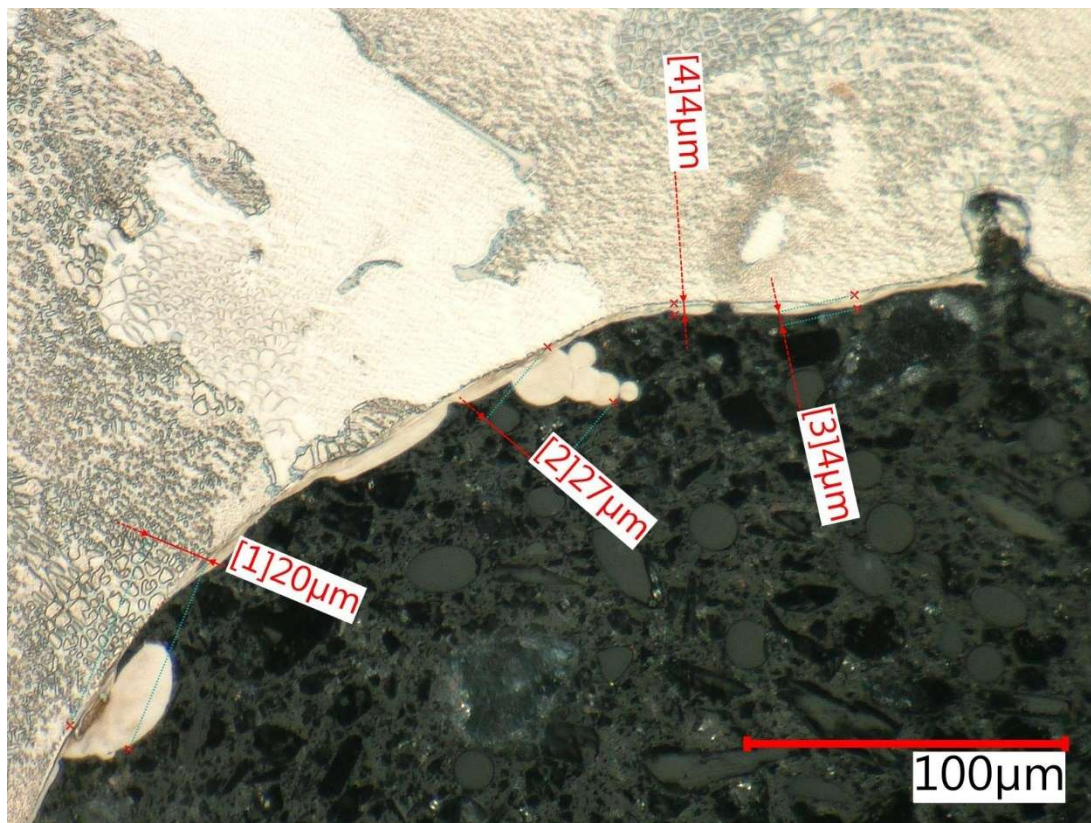
Pro získání metalografického vzorku č. 5 byly zvoleny podmínky jiskření, které jsou v souladu s technologickými podmínkami pod názvem „Test 4“. Na Obrázku 51 je viditelné, že okraj otvoru obsahuje lokální maxima nataveného materiálu v rozmezí 9 až 16  $\mu\text{m}$ . Šířka této vrstvy je po většinu obvodu díry z výbrusu 3 až 4  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 52.: Detail natavené vrstvy na hraně otvoru po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 5“

Metalografický vzorek č. 6 byl připraven s ohledem na technologické podmínky jiskření, dle experimentu označeného jako „Test 5“. Výsledek zobrazení tohoto metalografického vzorku je vidět na Obrázku 52, zde jsou vidět lokální maxima nataveného materiálu v rozmezí 4 až 6  $\mu\text{m}$ . Většina obvodu výbrusu vykazuje pouze zhruba 2  $\mu\text{m}$  širokou vrstvu nataveného materiálu.





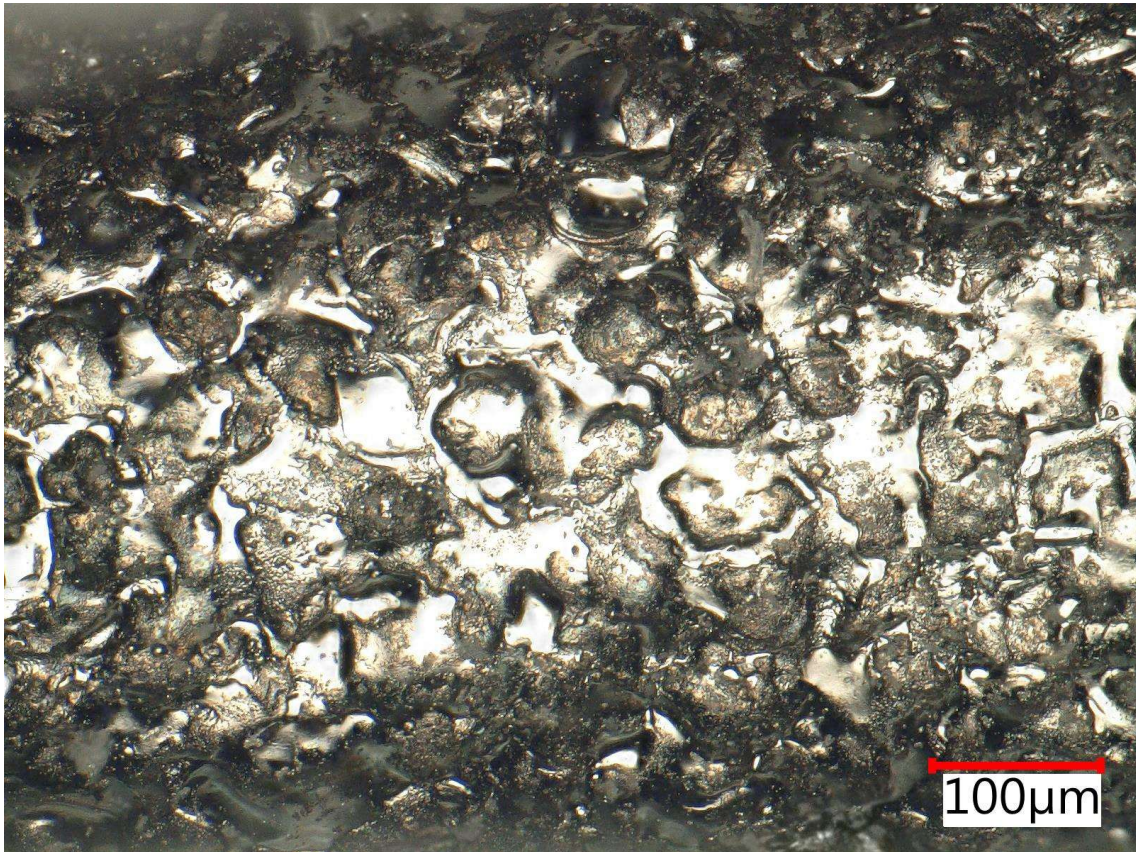
Obrázek 53.: Detail natavené vrstvy na hraně otvoru po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 6“

Pro výrobu otvorů v metalografickém vzorku č. 7 byly zvoleny podmínky jiskření, které odpovídají technologickým podmínkám experimentu pod označením „Test 6“. Na Obrázku 53 je patrné, že hrana otvoru obsahuje lokální maxima nataveného materiálu v rozsahu 20 až 27  $\mu\text{m}$ . U tohoto vzorku je pozorován významný výskyt mocných shluků nataveného materiálu, což se výrazně liší od maxim nalezených na ostatních vzorcích. Většina obvodu výbrusu vykazuje šířku této vrstvy pouze 3 až 4  $\mu\text{m}$ . Komparací s maximy ostatních vzorků se u tohoto vzorku jedná o výrazně mocnější shluky nataveného materiálu. Tyto shluky jsou charakterizovány rozdílnou kompozicí od předchozích experimentů, která zahrnuje přeložení materiálu neboli přehyby (z angličtiny tzv. „folds“) a splynuté kapky nataveného materiálu. Přítomnost těchto výčnělků na povrchu otvoru představuje potenciální hrozbu pro lopatky rotorů vyskytující se za statickým rozvaděčem GT. Tato skutečnost je důležitá nejen z hlediska jejich vlivu na drsnost povrchu díry, ale zejména z kladeného důrazu na bezpečnost v leteckém průmyslu obecně.

#### 4.4.2 Drsnost v radiálním řezu

Před porovnáním technologických podmínek z hlediska drsnosti ve vyjiskřených otvorech bylo, nejprve dle snímků z mikroskopu odhadnuto, jaké vzorky budou nejdůležitější pro porovnání. Mikroskop umožňuje skládat přes sebe fotky s různým zaostřením a díky tomu je možné získat ostrou fotografii přes vícero zaostřených rovin. Fotografie jsou na Obrázcích 54 až 59. K rozhodnutí o očekávané rozdílnosti drsnosti

povrchů byly použity i snímky příčných řezů, viz kapitola 4.4.1. Z tloušťky a četnosti „louží“ nataveného materiálu na stěnách otvorů byly vybrány vzorky, které mají podobné charakteristiky. Skupina s nejvíce nataveným materiálem zahrnuje vzorky 2 a 3. Naopak skupina s nejméně nataveným materiálem obsahuje vzorky 1 a 6. Ostatní vzorky nesplňují parametry nataveného materiálu pro zařazení do jedné nebo druhé skupiny.

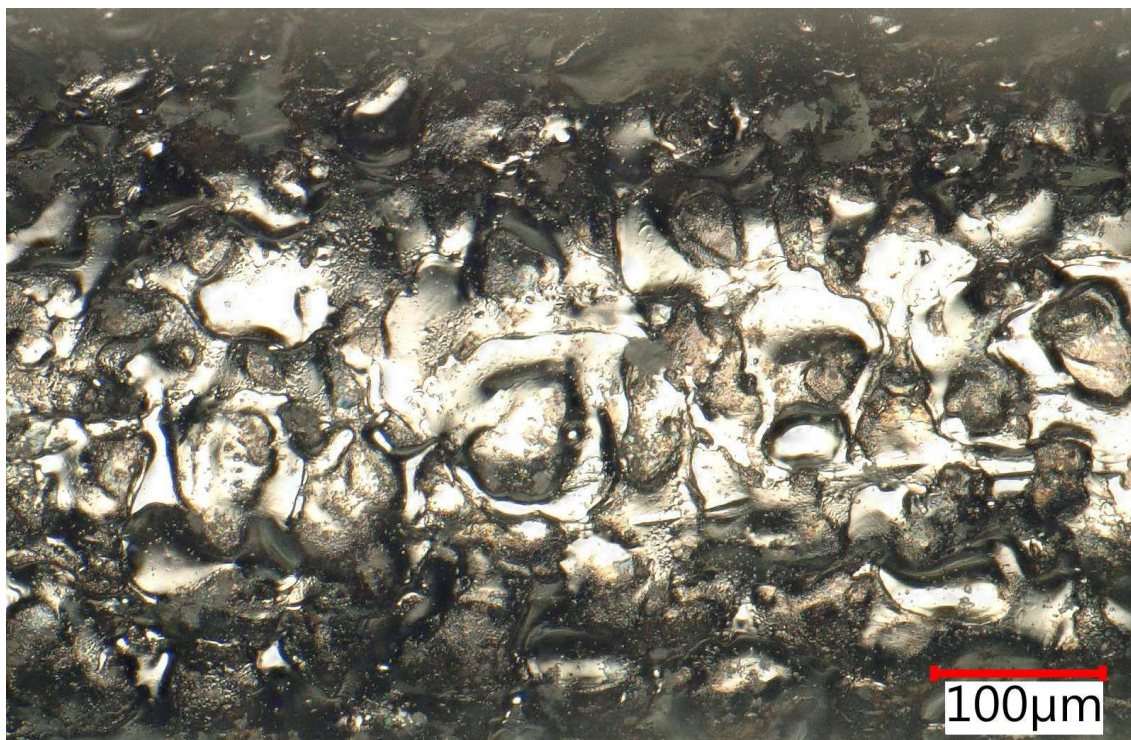


*Obrázek 54.: Pohled na povrch otvoru v radiálním řezu po EDM hloubení dle původních technologických podmínek*

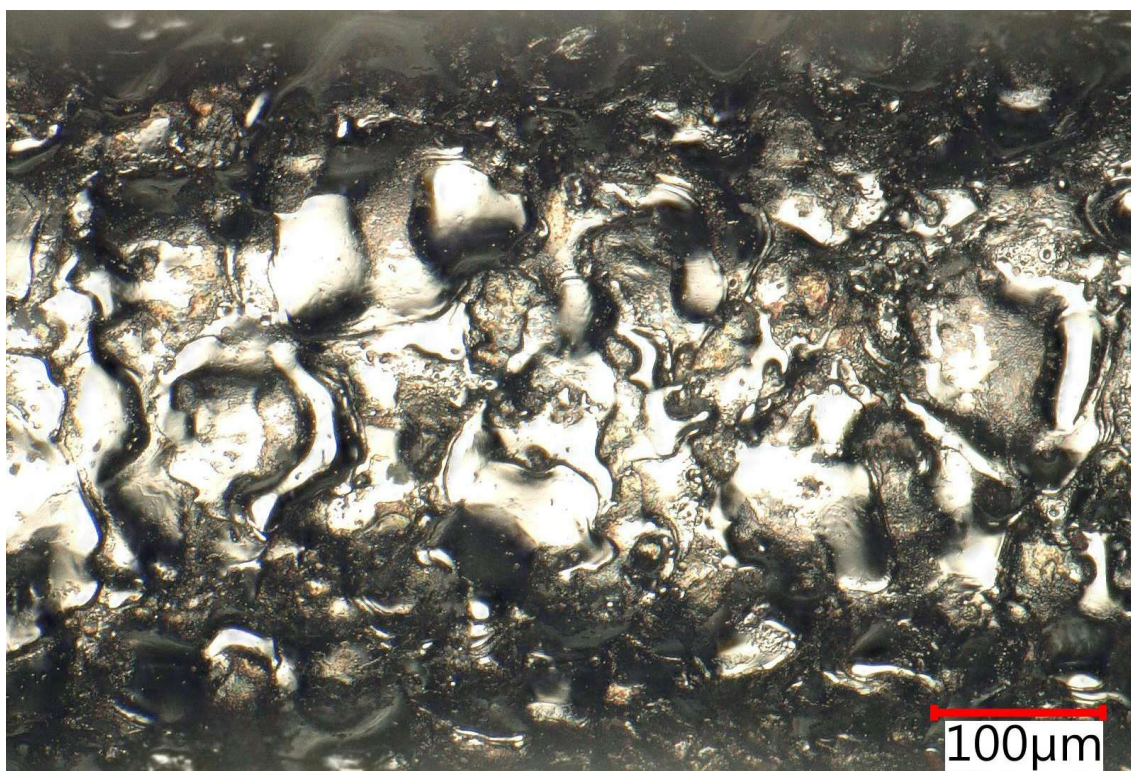
Pro kompozici skládaného snímku byly vždy definovány hranice nejnižšího bodu v pohledu na jiskřený povrch a nejvyššího bodu. Nadále bylo automaticky vytvořeno několik (45 až 55) snímků s různým zaostřením dle daného odstupňování, to bylo nastaveno po 6,16 µm. Tímto postupem snímání bylo možné zobrazit prohnutou a výrazně členitou plochu vyjiskřeného povrchu.

Na Obrázku 55 a Obrázku 56 jsou zobrazeny povrchy EDM hloubených děr, které mají odhadované největší výstupky tvořené nataveným materiálem.





Obrázek 55.: Pohled na povrch otvoru v radiálním řezu po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 1“

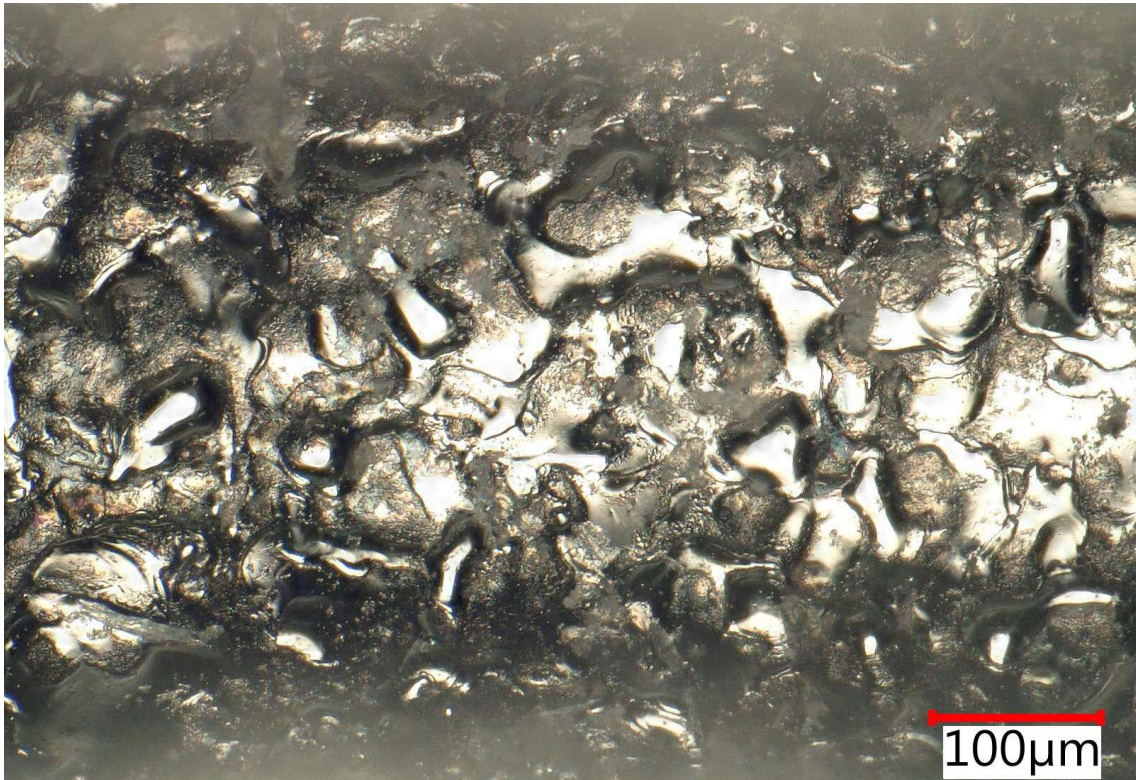


Obrázek 56.: Pohled na povrch otvoru v radiálním řezu po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 2“

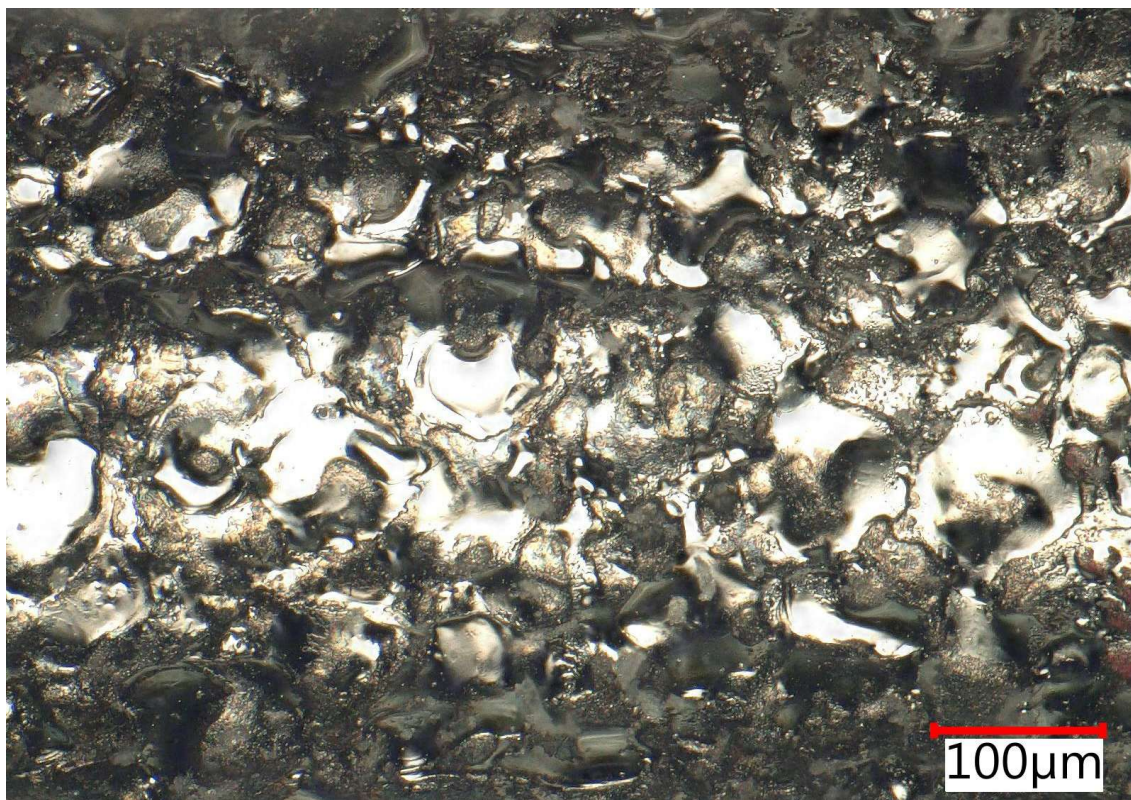
Jako povrchy, které nemají nejvíce, ani nejméně množství nataveného materiálu, a tedy mající nezajímavé predispozice pro měření drsnosti povrchu vyjiskřených děr, jsou vybrány experimentální výsledky zobrazené na Obrázku 57 a Obrázek 58. Výsledný



povrch zobrazený na Obrázku 57 je výsledkem „Testu 3“, který měl jeden z nejvyšších proudových stupňů a jen 35 % původního T-off, zároveň dvojnásobné zápalné napětí. Navíc měl i nejnižší hodnotu ochrany, která také zvyšuje „agresivitu“ elektroerozivního procesu. To že jsou tyto technologické podmínky zaměřené na rychlejší úběr materiálu, se potvrdilo při pohledu na Obrázek 44. Přesto se povrch nezdá nejvíce pokrytý většími oblastmi s nataveným materiálem.



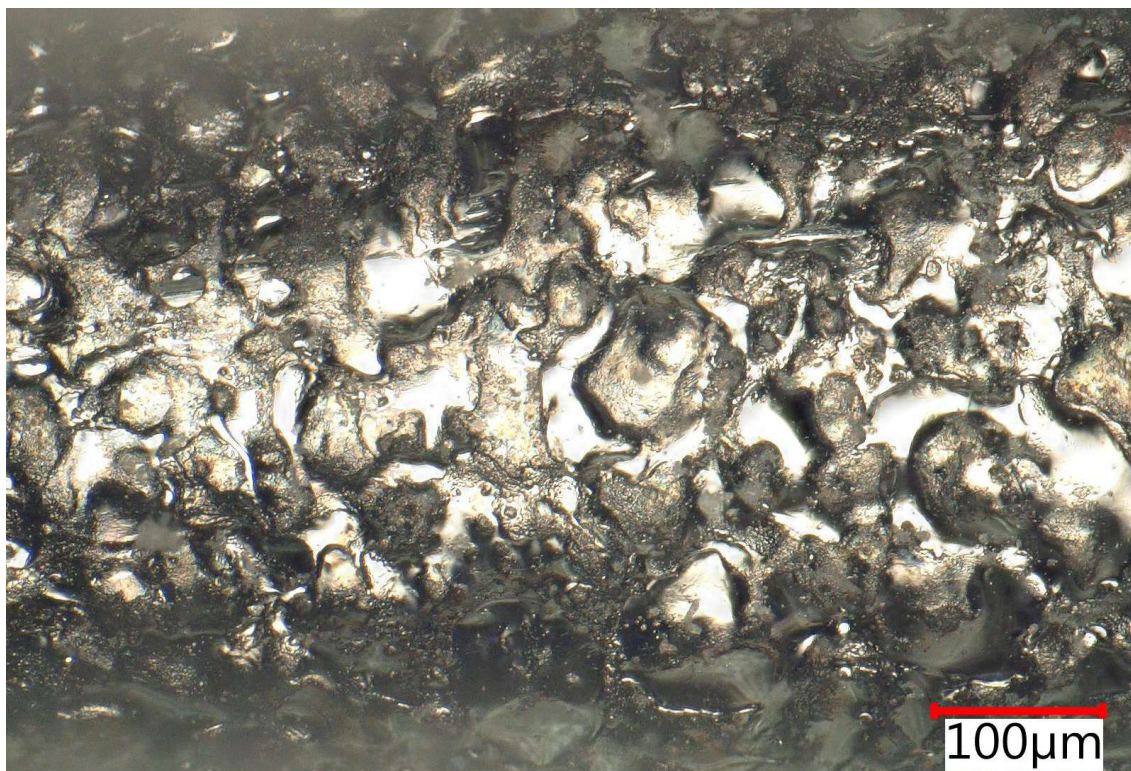
Obrázek 57.: Pohled na povrch otvoru v radiálním řezu po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 3“



*Obrázek 58.: Pohled na povrch otvoru v radiálním řezu po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 4“*

Na Obrázku 59 je zobrazen druhý zástupce kategorie s odhadovanými nejmenšími výstupky, které jsou tvořené z nataveného materiálu.

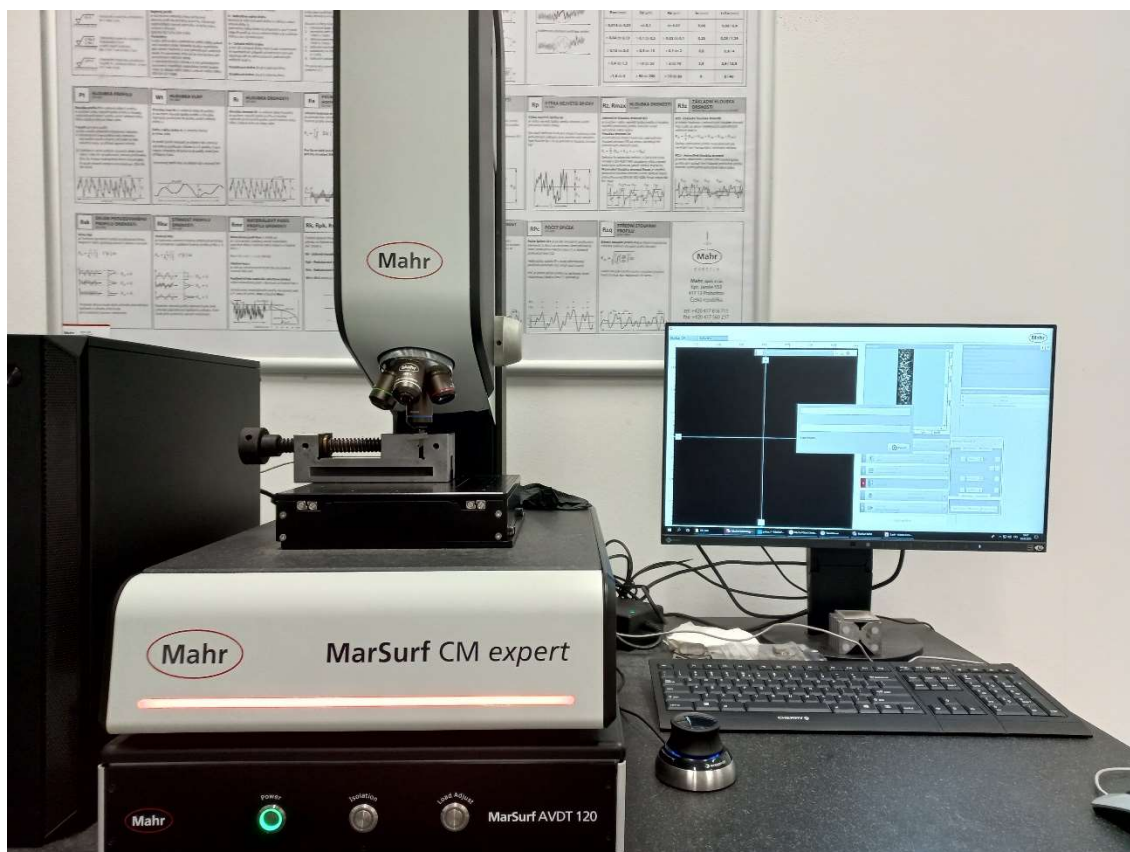




Obrázek 59.: Pohled na povrch otvoru v radiálním řezu po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 5“

Pro „Test 6“ byl vzorek určený pro radiální řez také použit na řez příčný z důvodu nepovedeného prvního vzorku, který byl určen právě k řezu příčnému. Přesto je objektivní předpokládat podobnost s vzorky č. 1 a 6, tedy původními technologickými podmínkami a „Testem 5“.

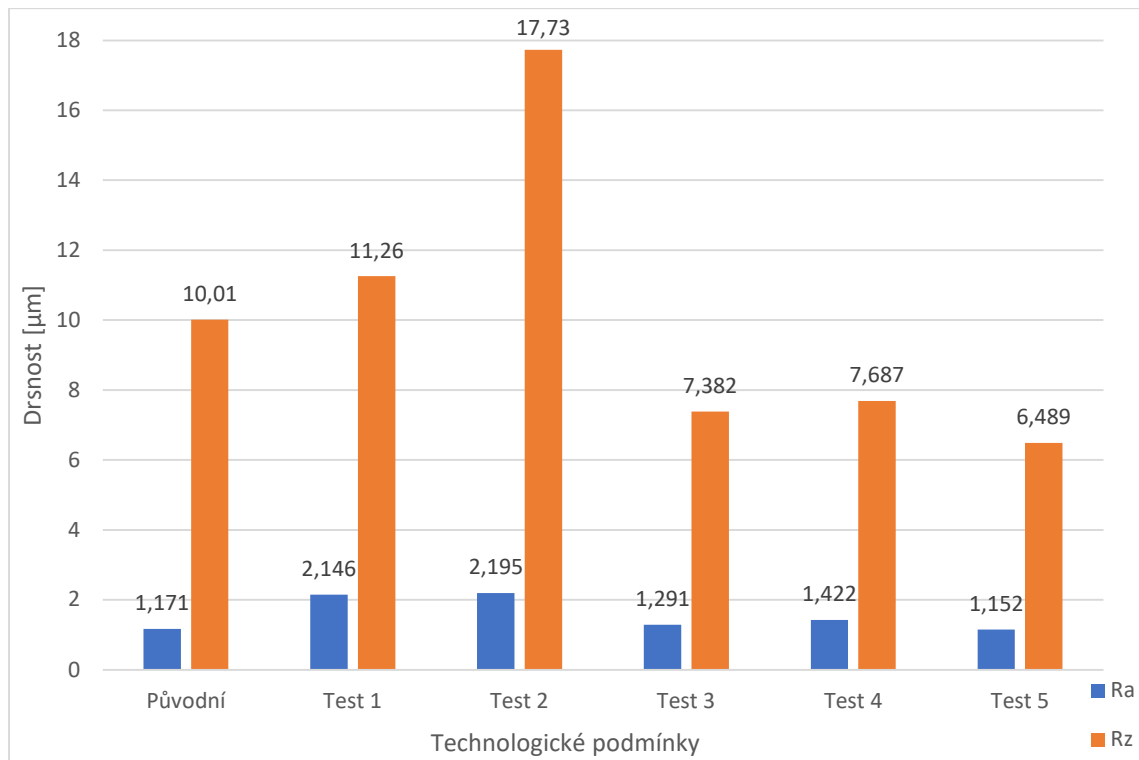
Pro měření drsnosti na připravených vzorcích byl zvolen optický způsob. K tomuto měření se nabízí využití konfokálního mikroskopu (Obrázek 60) s možností měření drsnosti z naskenované topografie plochy pomocí vytvoření několika řezů v dané ploše a následným zprůměrováním hodnot. Jedná se o konfokální mikroskop Marsurf CM Expert s rotujícím diskem (DSCM = disc scanning confocal microscope).



Obrázek 60.: Měřicí soustava mikroskopu s připojeným počítačem, obrazovkou a ovládacím joystickem

Měření optickou metodou má řadu úskalí, jednou z nich je přesnost. Zároveň je diskutabilní porovnatelnost takového měření s klasickou metodou, a to měření drsnosti hrotem. Snímání objektů s proměnným povrchem, jak z hlediska odrazivosti, tak z hlediska sklonu, vyvolává ještě více nejistoty o přesnosti optické metody. Proto je nutné přistupovat kriticky k absolutním hodnotám  $R_a$  či  $R_z$  naměřených na těchto vzorcích. Nicméně k relativnímu porovnání drsností vzorků navzájem je tato metoda měření dostatečná. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v grafu na Obrázku 61, zdrojem dat jsou protokoly z příloh k této diplomové práci. Pro každý vzorek je na první straně přílohy topografické zobrazení podobné tomu z Obrázku 62. Na druhé straně je výsledek měření drsnosti z plochy ve 156 řezech. Na posledním listu každé z příloh je měření pouze jednoho řezu na skenu bez odfiltrování tvaru.

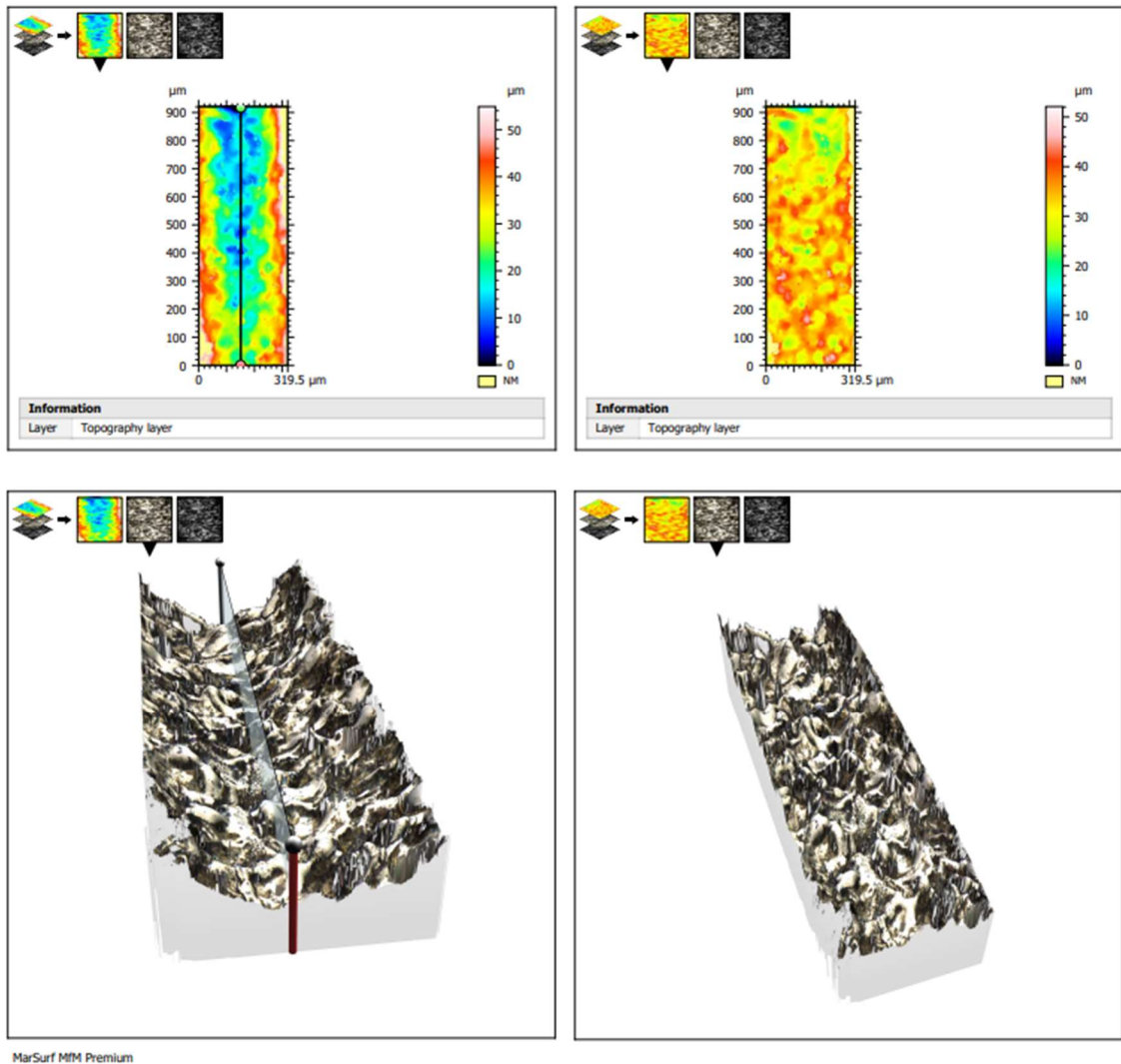
Nalezení osy otvoru bylo prováděno za pomoci joysticku a zaostřování mikroskopu na hranu díry. Měření probíhalo vytvořením třech čtvercových oblastí ve směru  $y$  a následným naskenováním daného povrchu otvoru. Z tohoto důvodu jsou strany obdélníkové plochy všech skenovaných děr zhruba v poměru 1:3 ( $x:y$ ). Tento poměr je zřejmý z vrchní části Obrázku 62, kde jsou zobrazeny jednotky hran měřené oblasti.



Obrázek 61.: Výsledky měření drsnosti uvnitř vyjiskřených otvorů

Z Obrázku 61 je patrné, že nejvyšší drsnost vykazuje povrch jiskřený technologickými podmínkami označenými jako „Test 2“. To platí pro oba parametry drsnosti Ra i Rz. Jako povrch s druhou nejvyšší drsností vyšel vnitřek otvoru na vzorku 2, čili „Test 1“. Což je překvapivé, vzhledem k méně agresivním podmínkám jiskření než u Testu 3. Ten naopak s Testem 4 a 5 vyšli jako technologické podmínky zanechávající nejmenší drsnost na povrchu jiskřeného otvoru. Jako nejmenší drsnost povrchu jiskřené díry se jeví povrch po použití technologických podmínek „Test 5“. Tato skutečnost potvrzuje zjištění nejmenší natavené vrstvy materiálu na povrchu otvoru vzorku 6, a tak svědčí o kladném vlivu vnitřního výplachu na výslednou drsnost povrchu.

Pozoruhodné je zejména porovnání grafu z Obrázku 43, kde jsou zobrazeny časy potřebné k vyhloubení otvorů, s grafem z Obrázku 61. Toto porovnání je klíčové z hlediska maximalizace efektivity procesu elektroeroze, při zachování rámcově podobné hodnoty drsnosti. Do konečného rozhodnutí samozřejmě vstupují i další kritéria v podobě ostatních výstupních parametrů procesu.



Obrázek 62.: Výstřížek z protokolu o měření drsnosti (pro ilustraci zvolen vzorek 1)

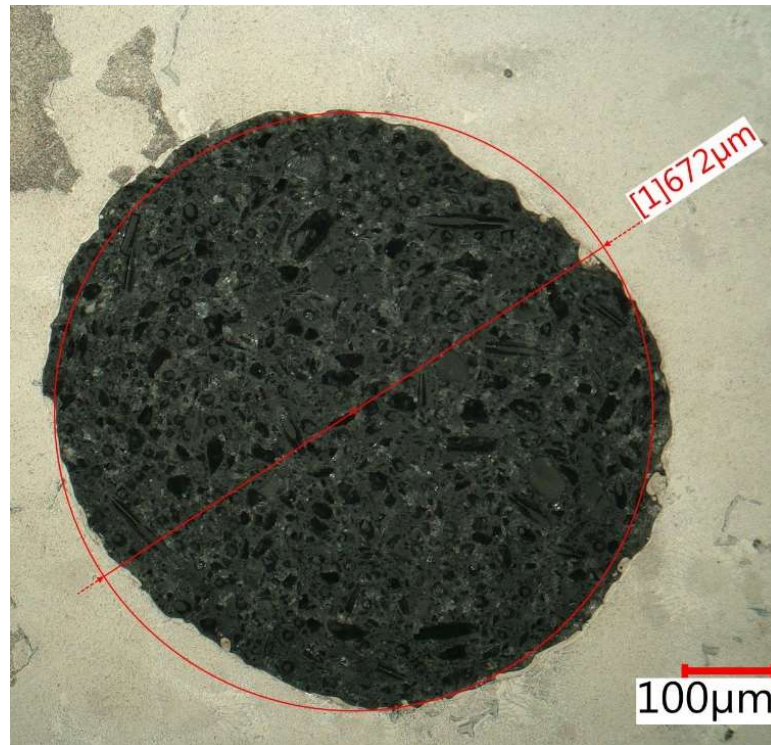
Rámcově výsledky měření drsností odpovídají předpokladům a korespondují s očekávanou drsností při volených elektrických parametrech. Na Obrázku 62 je zároveň částečně vidět postup zpracování dat z naskenovaných hodnot. Vzhledem k válcovému tvaru díry, bylo k měření drsnosti v ploše, nejprve nutné odfiltrout válcový tvar plochy. Odfiltrovaný tvar lze pozorovat na obrázcích v pravé části výše zmíněného obrázku. V levém dolním čtverci, kde je zobrazen naskenovaný povrch otvoru bez úpravy filtrací jsou zobrazeny dvě červené značky ve tvaru špendlíku, mezi nimiž je měřena drsnost pouze v jednom řezu. Tento krok byl proveden pro kontrolu vlivu filtrace na výsledné hodnoty drsností.

#### 4.4.3 Ostatní odlišnosti při změně technologických podmínek

Při srovnávání tvaru děr v příčných řezech (viz Obrázek 63 až Obrázek 69) byla pozorována značná tvarová odlišnost u děr hloubených bez kontinuálního výplachu v porovnání s dírami hloubenými s výplachem vedeným vnitřkem nástrojové elektrody. Tato skutečnost nijak vážně neovlivňuje danou funkci otvorů. V případě testu s dutou elektrodou, bez výplachu by mohlo být důvodem nedokonalé válcovitosti díry menší

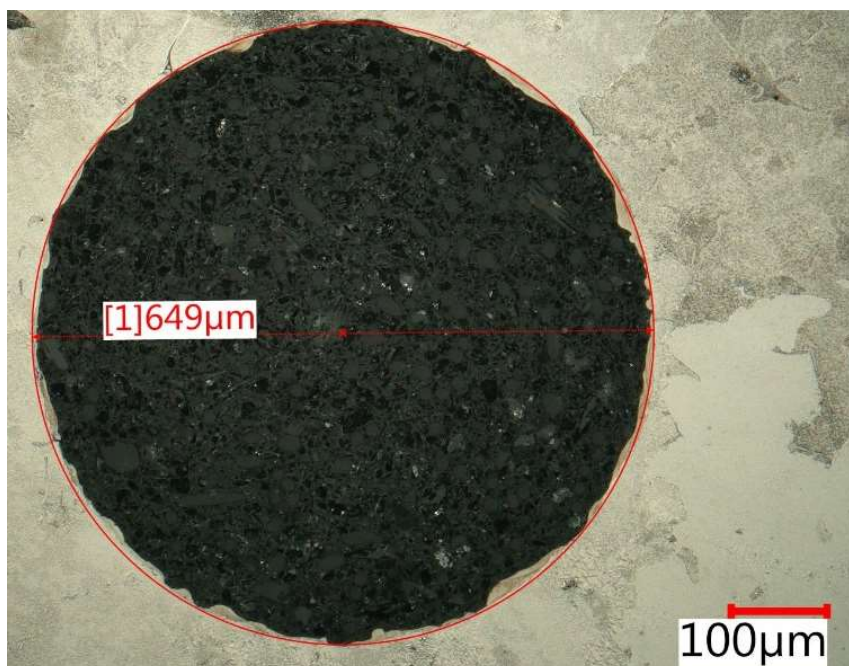


tuhost, která je způsobena především odlišným materiálem nástrojové elektrody. U elektrod z wolframu válcovitého tvaru se výrazná chyba tvaru objevovala jen u některých děr, bez závislosti na použité technologii. Tato skutečnost by se dala vysvětlit případným shlukováním nečistot v dielektriku u jedné ze stran otvoru a tím snížením izolačního efektu dielektrika. Pokud má dielektrikum lokálně zvýšenou elektrickou vodivost, je větší pravděpodobnost vzniku ionizovaného prostoru, což je predispozicí vzniku nového výbojového kanálu. Tím se lokálně zvýší odebrané množství materiálu z obrobku. Tento problém by byl ale spíše nahodilým, a zároveň závislým na axiální pozici kde je proveden příčný metalografický výbrus.



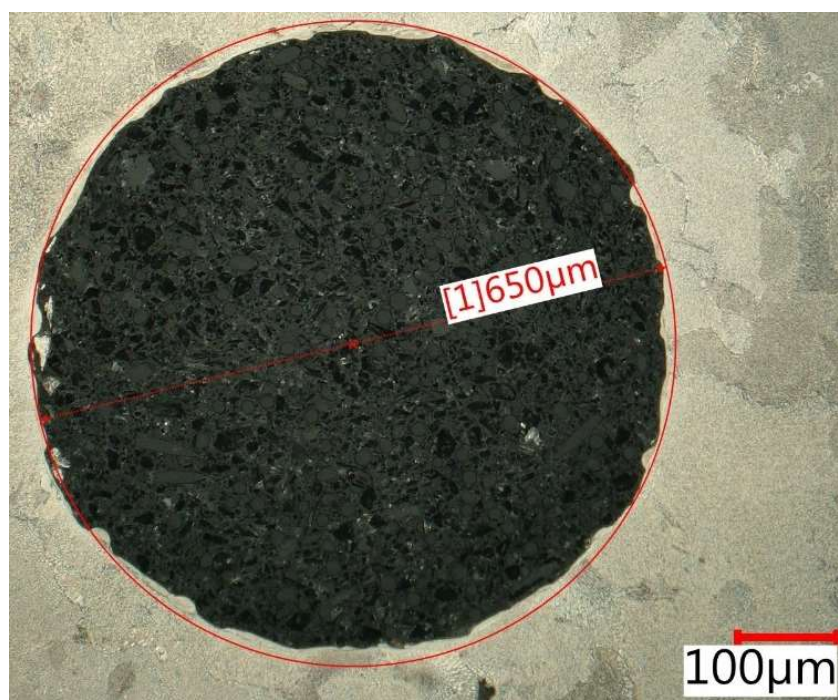
Obrázek 63.: Snímek celého průřezu jednoho z otvorů po EDM hloubení dle původních technologických podmínek

Na Obrázku 63 je vidět, že v příčném řezu na teoreticky válcovou díru se jistě nejedná o kružnici, jak by se dalo očekávat. Navzdory tomu ale, jak bylo zmíněno v textu výše, tato tvarová odlišnost nijak nebrání otvoru ve funkci chlazení odtokové hrany lopatky.



Obrázek 64.: Snímek celého průřezu jednoho z otvorů po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 1“

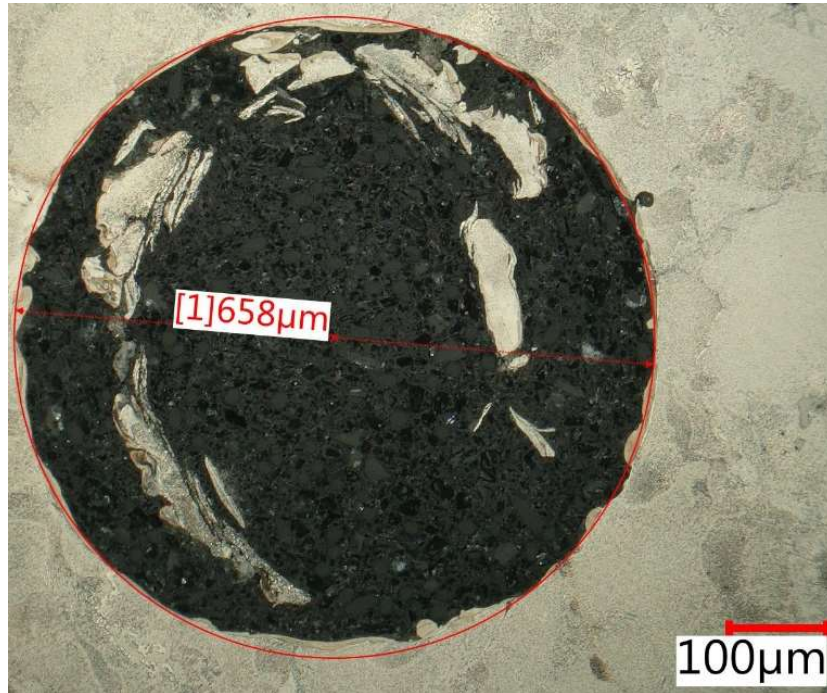
Na Obrázcích 64 až 67 jsou také zobrazeny vybrané chladicí otvory pohledy v příčných řezech. Z hlediska tvaru v daných řezech válce se jedná relativně o menší odchylku od teoreticky přesného tvaru kružnice.



Obrázek 65.: Snímek celého průřezu jednoho z otvorů po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 2“

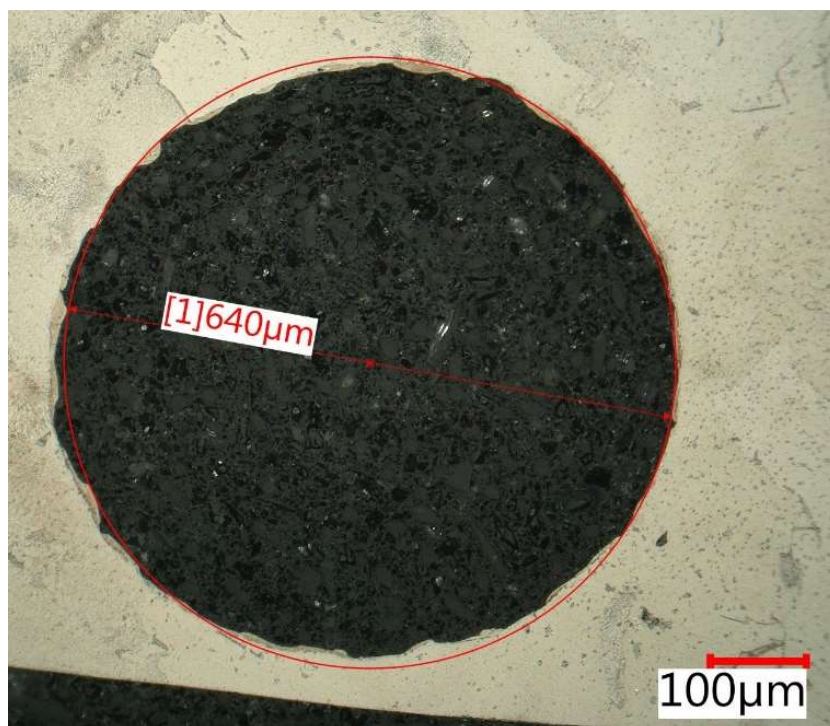


Na Obrázku 66 jsou uvnitř otvoru viditelné třísky, které se pravděpodobně vplavily právě do místa kde byl zvolen příčný řez. Tvar třísek, které jsou obklopeny pryskyřicí i natavená oblast na okraji třísek napovídá, že se jedná o uvolněný materiál ze vstupu do otvoru. Na čele vzorků, v místě vyústění otvorů, byly vytvořeny žlábkové (proces blíže popsán v kapitole 4.4) pro umožnění vtečení pryskyřice do vyhloubených otvorů. A právě tato mechanická úprava vzorků mohla zapříčinit delaminaci vrstvy z okraje díry do prostoru uvnitř otvoru.

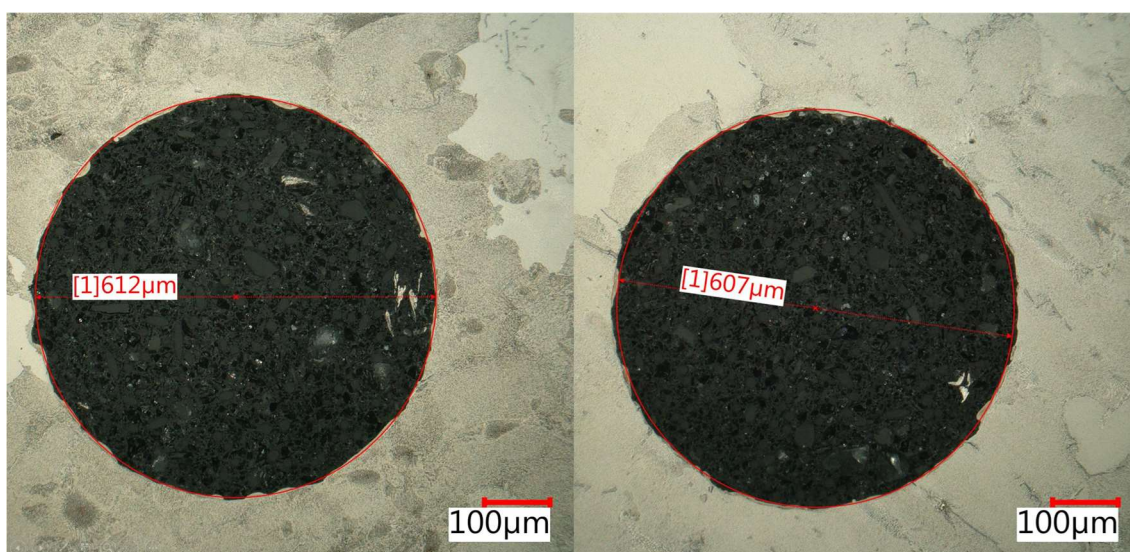


Obrázek 66.: Snímek celého průřezu jednoho z otvorů po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 3“

I na Obrázku 67 lze pozorovat mírnou odchylku od ideálního tvaru kružnice, tuto nepřesnost vykazovaly všechny vzorky jiskřené bez kontinuálního vnitřního výplachu.



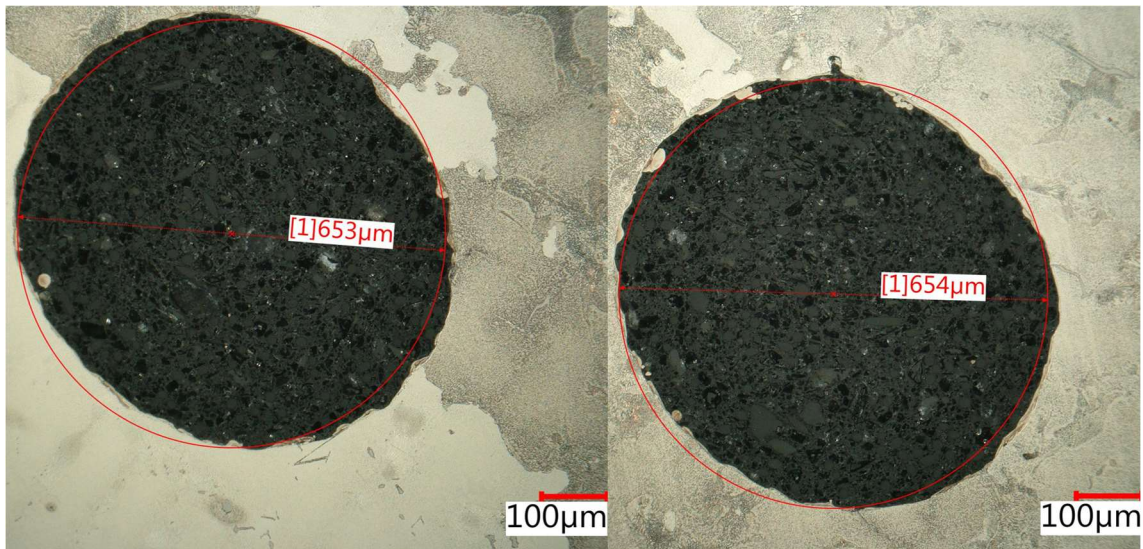
Obrázek 67.: Snímek celého průřezu jednoho z otvorů po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 4“



Obrázek 68.: Snímek celého průřezu jednoho z otvorů po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 5“

Na Obrázku 68 jsou zobrazeny dva otvory vytvořené experimentální technologií označené jako „Test 5“, kde byl použit výplach tlačení nekontaminovaného dielektrika do nitra nástrojové elektrody. Tento způsob výplachu zapříčinil vyšší tvarovou přesnost hloubeného otvoru.





Obrázek 69.: Snímek celého průřezu jednoho z otvorů po EDM hloubení dle technologických podmínek „Test 6“

Posledním metalografickým vzorkem (viz Obrázek 69) byl kus rozvaděče, do kterého byly pro vyjiskření otvorů použity experimentální podmínky označené jako „Test 6“. Pro tento experiment byla zvolena, stejně jako v předchozím případě dutá elektroda, ale bez zapnutého výplachu jejím středem. Všechny díry tohoto vzorku vykazovaly podobně veliké odchýlení od očekávaného tvaru kružnice. To může mít příčinu v poměrně malé tuhosti nástrojové elektrody, která má tvar dutého válce a vyrobené ze sintrovaného materiálu CuW.

## 4.5 Diskuse

Zvolení optimálního řešení s ohledem na cyklový čas, spotřebu nástrojů, metalografické vyhodnocení a opakovatelnost procesu není příliš objektivní záležitost. Jedná se o několik faktorů, které mají každý jinou váhu při rozhodování o tom, co je ideální stav. Mimoto je při rozhodování o změně technologických podmínek nutné zvážit, zda přináší dostatečné výhody oproti stávajícímu procesu. I pokud byly nalezeny alternativní technologické podmínky, které splňují dané požadavky a opravdu se podobají více ideálnímu stavu, než který je aktuální, je racionální se ptát: „Stojí nám to za to?“

Pro tuto diplomovou práci bylo hlavním požadavkem zajistit opakovatelnost procesu, za dodržení podobných, či vylepšených hodnot drsnosti a tloušťky natavené vrstvy. Zvýšení rychlosti hloubení bylo sekundárním požadavkem, kterému bylo, ale věnováno velké úsilí a tento parametr by se do budoucna mohl dále vylepšit. Pro zajištění opakovatelnosti procesu se osvědčilo zavedení vnitřního výplachu trubičkovou elektrodou, protože se snížil úbytek nástroje z důvodu intenzivního chladicího účinku na nástroj od proudícího dielektrika.

Prozatím je dílčím doporučením této diplomové práce setrvat u stávajících technologických podmínek. Ačkoliv je možné polemizovat, zda není výhodnější využít

podmínky „Test 3“. Tyto technologické podmínky vykazovaly až třetí nejvyšší opotřebení elektrody. Tato nevýhoda je ale kompenzována poměrně obstojným vylepšením rychlosti hloubení (zhruba o 7 %), ale zejména zmenšením rozptylu hodnot rychlosti hloubení, kdy „Test 3“ měl rozptyl  $\pm 3 \sigma$  roven  $\pm 18$  s. Původní podmínky měly rozptyl časů hloubení třináásobný. Tato skutečnost by mohla znamenat velký přínos pro ustálení času hloubení chladicích děr po obvodu celého rozvaděče. Do budoucna by se tyto technologické podmínky daly využít při případné automatizaci výměny nástroje, či celého obrobku. Přes tyto všechny nesporné výhody se vracím k otázce z úvodu diskuze a musím si odpovědět: „Ne, nestojí.“ Možná v budoucnu při zvýšení produkce ano, pak se každé procento počítá, ale při aktuálním využití strojního zařízení by krok změny byl předčasný.

Z hlediska drsnosti se jako méně vhodné jeví pouze podmínky „Test 2“, kde parametr Rz vzrostl zhruba o 77 %. Hledisko metalografického vyhodnocení natavené vrstvy přineslo vyřazení z možných technologických podmínek „Test 6“ z důvodu mocných shluků nataveného materiálu a formování výčnělků na povrchu, které by mohly znamenat hrozbu z pohledu bezpečnosti. Nejzajímavějším poznatkem z metalografického vyhodnocení je tvarová přesnost, a to u otvorů hloubených technologií „Test 5“. Vyšší geometrická podobnost axiálnímu řezu válcem je pravděpodobně zapříčiněna vnitřním kontinuálním výplachem, který odnáší dekontaminované dielektrikum z hloubeného otvoru. Na metalografickém výbrusu tohoto vzorku je zároveň příslibné rozložení mocnosti natavené vrstvy, která byla jednak nejmenší ve srovnání se všemi ostatními podmínkami jiskření, ale měla, také, nejrovnoměrnější rozprostření této vrstvy. Na tomto příslibu vnitřního výplachu by se dalo stavět do budoucna a prozkoumat možnosti kombinace různých tlaků přivedených do nitra nástrojové elektrody s kombinacemi elektrických parametrů. V zadání této diplomové práce byla podmínka využít současné strojní vybavení, které, bohužel, neobsahuje regulaci tlaku dielektrika přiváděného vřetenem stroje. Proto byl, v této práci, kladen větší důraz na odzkoušení případných nových elektrických parametrů procesu. Nemožnost regulovat tlak pravděpodobně zapříčinilo nestabilní erodování a nízkou účinnost procesu elektroeroze. K tomuto jevu dochází při příliš velkém tlaku, který způsobuje rušení funkce zpětnovazebního řízení na základě změny napětí v jiskrové mezeře. Navíc při použití vnitřního výplachu v kombinaci s vysokým tlakem při takto rozměrově malé aplikaci dochází k intenzivnímu unášení ionizačních kanálků a tím zmírnění elektroerozivního účinku. Lze předpokládat, že právě z těchto důvodů zaznamenaly zmíněné podmínky nejdelší čas hloubení. Ačkoliv je toto zjištění nepříjemnou skutečností, zůstávají zde, výše zmíněné náznaky dobrého potenciálu této metody.

Při porovnání výsledků dosažených v této diplomové práci s výsledky experimentů provedených Fabriziem Caiazem, Luigim Cuccarou, Ilariou Fierrou, Giuseppem Petronem a Vittoriem Alfierim [53] lze vidět, že změřené rychlosti úběru materiálu v této diplomové práci jsou i u nejrychlejších zkoumaných metod zhruba desetinové oproti některým hodnotám uvedených ve zmíněném zdroji. Při porovnání s nejvyšší hodnotou MRR jsou dokonce skoro setinové. Je nutné podotknout, že se v každé aplikaci jedná

o jiný stroj a jiný materiál elektrody. Přesto je rozdíl poměrně markantní a proto bych se při opakování experimentů zaměřil na replikování daných parametrů uvedených v [53] včetně nahrazení materiálu elektrody. V uvedeném zdroji je, mimo jiné, zmíněno, že jsou testy provedeny s neměnnými podmínkami pro výplach. Které byly, jak lze předpokládat, odzkoušeny. I tento fakt napovídá o potenciálu, který má zavedení regulovatelného výplachu a jeho odzkoušení s elektrickými parametry, které budou vytvářet společný symbiotický vztah s určitým tlakem vnitřního výplachu. Na druhou stranu je nutné zmínit, že se na vzorcích při žádné ze zvolených technologických podmínek neobjevili praskliny v natavené vrstvě materiálu obrobku, které vznikají při velkých teplotních gradientech. Tyto defekty jsou časté při volbě agresivnějších elektrických podmínek pro EDM obrábění. Tento jev je vidět právě ve zdroji [53]. Tento typ defektu je pro použití v leteckém průmyslu, respektive leteckém motoru, naprosto nemyslitelný.

Jako hlavní přínos této diplomové práce považuji nalezení elektrických parametrů, které vykazují, stabilnější časy hloubení chladicích otvorů. Právě stabilita a opakovatelnost procesu byla jedním z hlavních kritérií pro volbu technologických podmínek. Zároveň je přínosem i fakt, že jsou, byť jen marginálně, efektivnější než stávající proces. Tyto dvě přednosti by se výrazněji projeví až při zvýšení produkce, proto není žádoucí změnu provádět momentálně, nýbrž vyčkat co přinesou následující roky ve světě leteckého průmyslu. Tento čas bych doporučil využít hledáním správného nastavení elektrických parametrů spolu s velikostí tlaku vnitřního výplachu pro maximalizaci synergie těchto dvou aspektů elektroerozivního procesu.

## 5 Závěr

V rámci této diplomové práce na téma „Optimalizace procesu hloubení děr v leteckém průmyslu“ byla řešena problematika elektroerozivního hloubení chladicích otvorů do statorového dílu turbovrtulového leteckého motoru. Zajímavostí je nevšední materiál tohoto dílu, kdy se jedná o niklovou superslitinu.

Analýza současného stavu proběhla ihned ze začátku praktické části. Po zjištění podrobných informací o aktuálním výrobním procesu a zejména jeho nedostatků bylo navrženo několik způsobů pro zefektivnění elektroerozivního děje. Tímto úkolem se zabývá velký podíl praktické části. Jsou zde předkládány různé přístupy a návrhy konkrétních řešení ke zefektivnění procesu hloubení děr do GT rozvaděče. Z těchto návrhů byly některé vyloučeny a jiné vybrány pro experimentální ověření. Optimalizace probíhala se zaměřením na snížení cyklového času a spotřeby nástrojů, zachování kvality povrchu včetně kontroly tepelně ovlivněné oblasti. Pro experimentální ověření byly zvoleny čtyři testy s agresivnějšími elektrickými parametry oproti původním a dva návrhy s dutou elektrodou. Po ověření zvolených návrhů byla vybrána optimální varianta s ohledem na cyklový čas, spotřebu nástrojů, metalografické vyhodnocení a opakovatelnost procesu. Při metalografickém vyhodnocení proběhla i nezbytná kontrola případných defektů. Posledním optimalizačním kritériem byla opakovatelnost procesu.

Úspěšnost, či neúspěšnost návrhů bylo nutné experimentálně ověřit a výsledky experimentů vyhodnotit. Při vyhodnocování experimentálních výsledků byly postupně eliminovány nežádoucí návrhy. Všechny návrhy byly provedeny s ohledem na aktuální strojní zařízení. To umožňuje vnitřní výplach, čehož bylo využito v experimentu pod názvem „Test 5“. Z výsledků rychlosti hloubení byly vyřazeny technologické podmínky „Test 1“, „Test 4“ a „Test 5“, které měly malé úběry materiálu. Naopak zefektivnění procesu, z hlediska cyklového času, přinesly ostatní návrhy. Z výsledků opotřebení elektrody, ale zejména z výsledků změny drsnosti byly vyloučeny technologické podmínky hloubení označené jako „Test 2“, protože se v porovnání s ostatními podmínkami neúměrně opalovala nástrojová elektroda a povrch součásti vykazoval největší drsnost. Z metalografického vyhodnocení v rámci praktické části bylo zjištěno, že jediným problematickým návrhem pro použití v praxi by byl „Test 6“, protože natavené shluky materiálu na stěně otvoru představují potenciální ohrožení bezpečnosti. Hlavním úkolem tohoto experimentu byla, ale spíše než ověření možnosti reálného využití, možnost komparace vlivu změny materiálu nástrojové elektrody, bez vlivu vnitřního výplachu na celkový proces.

Po tomto postupném objevování nedostatků jednotlivých návrhů v úvahu přichází jen technologické podmínky „Test 3“ a finální rozhodnutí je tedy mezi současnými podmínkami EDM obrábění, a právě podmínkami označenými jako „Test 3“.

Jako mírně efektivnější varianta se jeví podmínky „Test 3“, protože se díky agresivnějším elektrickým parametrům podařilo zkrátit čas jiskření v průměru o 7 % za

zachování, nebo vylepšení, všech ostatních vyhodnocovaných výstupních veličin obráběcího procesu. Nicméně z doporučení v diskuzi vyplývá jako nejracionálnější varianta setrvat u současných podmínek, než nastane nějaká změna, která bude požadovat mírně vyšší efektivitu, nebo vyšší stálost procesu. Zmíněné doporučení bylo provedeno s přihlédnutím na omezený počet metalograficky vyhodnocovaných děl. U odzkoušených podmínek je riziko vzniku defektu takřka nulové. Pro nové technologie nelze s úplnou jistotou tvrdit stejnou věc, alespoň bez provedení většího počtu testování a metalografického vyhodnocení. Přesto z výsledků této diplomové práce nic nenasvědčuje potenciálnímu vzniku defektů při použití podmínek označených jako „Test 3“.

Během vypracování diplomové práce byly splněny všechny cíle, vytyčené společností GE Aviation Czech s.r.o. Z výsledků experimentů uvedených v této diplomové práci se, pro budoucí výzkum a vývoj, nabízí možnost k rozšíření této práce o experimenty zaměřující se na nalezení synergické kombinace tlaku vnitřního výplachu a elektrických parametrů procesu EDM obrábění.

## 6 Seznam použité literatury

- [1] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.
- [2] MCGEOUGH, J.A. *Advanced Methods of Machining* [online]. 1988. ISBN 0412319705. Dostupné z: <https://books.google.com/books?id=f7Uj1uTwkosC&pgis=1>
- [3] GRUBLER GBL AG. *Print from „Schweizerische Mechanikerzeitung“ with AGIETRON AZ 4* [online]. [vid. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://archives.georgfischer.com/objects/122359>
- [4] GESCHÄFTSBERICHTE DER GEORG FISCHER, AG. *Sammlung GF-Gesellschaften* [online]. [vid. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://archives.georgfischer.com/actors/1288>
- [5] DE SENARCLENS, Jean. Charmilles Technologies. *Historical Dictionary of Switzerland (DHS)* [online]. 2019 [vid. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://hls-dhs-dss.ch/fr/articles/041912/2019-09-03/>
- [6] DESCOEUDRES, Antoine. *Characterization of electrical discharge machining plasmas* [online]. B.m., 2006. Lausanne, EPFL. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-3542](https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-3542)
- [7] VANDERAUWERA, Wouter. *Development of process planning tools for EDM operations*. B.m., 2017. Katholieke Universiteit Leuven, Gent.
- [8] BUD GUITRAU, E. The Fundamentals of EDM. *EDM Today* [online]. 2015, 12. Dostupné z: [http://www.edmtodaymagazine.com/2015/archives/features/2015\\_Winter\\_Feature/#p=2](http://www.edmtodaymagazine.com/2015/archives/features/2015_Winter_Feature/#p=2)
- [9] KERN, R. Sinker electrode material selection. *EDM Today 4*. 2008, 32–38.
- [10] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum 7* [online]. 2007, 60–63. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>
- [11] OZGEDIK, Ali a Can COGUN. An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2006, **27**(5–6), 488–500. ISSN 02683768. Dostupné z: [doi:10.1007/s00170-004-2220-6](https://doi.org/10.1007/s00170-004-2220-6)
- [12] JHA, Bholu, K. RAM a Mohan RAO. An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining. *Journal of Engineering Science and Technology Review* [online]. 2011, **4**(2), 118–130. ISSN 17912377. Dostupné z: [doi:10.25103/jestr.042.02](https://doi.org/10.25103/jestr.042.02)
- [13] CZELUSNIAK, Tiago, Camila Fernandes HIGA, Ricardo Diego TORRES, Carlos Augusto Henning LAURINDO, José Mário Fernandes DE PAIVA JÚNIOR, Armin LOHRENGEL a Fred Lacerda AMORIM. Materials used for sinking EDM



- electrodes: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. 2019, **41**(1), 1–25. ISSN 18063691. Dostupné z: doi:10.1007/s40430-018-1520-y
- [14] DEGARMO, Ernest Paul, J. T. BLACK a A. Kohser RONALD. *Materials and processes in manufacturing* [online]. 1957. ISSN 00160032. Dostupné z: doi:10.1016/0016-0032(57)90963-8
- [15] SOUSA, Pedro Miguel Horta, Ivo Manuel Ferreira de BRAGANÇA, Abílio Manuel Pinho de JESUS, José Duarte Ribeiro MARAFONA a Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho ROSA. MACHINABILITY OF PURE METALS BY ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING. *Revista Produção e Desenvolvimento* [online]. 2018, **4**(1), 54–67. ISSN 2446-9580. Dostupné z: doi:10.32358/rpd.2018.v4.311
- [16] HEEREN, Paul-Henri's, Dominiek REYNAERTS, Hendrik VAN BRUSSEL, Cynthia BEURET, Olle LARSSON a Axel BERTHOLDS. Microstructuring of silicon by electro-discharge machining (EDM) — part II: applications. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 1997, **61**(1–3), 379–386. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-4247(97)80293-2
- [17] KUMAR, Sanjeev, Rupinder SINGH, T.P. SINGH a B.L. SETHI. Surface modification by electrical discharge machining: A review. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2009, **209**(8), 3675–3687. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.09.032
- [18] HO, K. H. a S. T. NEWMAN. State of the art electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2003, **43**(13), 1287–1300. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/S0890-6955(03)00162-7
- [19] JAIN, Vijay Kumar. Advanced ( Non-traditional ) Machining Processes. *Machining* [online]. 2008, (January). Dostupné z: doi:10.1007/978-1-84800-213-5\_11
- [20] DING, X. M., J.Y.H. FUH, K.S. LEE, Y.F. ZHANG a A.Y.C. NEE. A computer-aided EDM electrode design system for mold manufacturing. *International Journal of Production Research* [online]. 2000, **38**(13), 3079–3092. ISSN 0020-7543. Dostupné z: doi:10.1080/00207540050117459
- [21] THOMPSON, Joe. *Die-sink EDM forms complex parts* [online]. [vid. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/metalworking/die-sink-edm-forms-complex-parts>
- [22] WEEKS, Gareth. EDM Sinking. *EngineeringClicks* [online]. 2012 [vid. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/electro-discharge-machining-edm/>
- [23] TANG, Y., J. Y.H. FUH, L. LU, Y. S. WONG, H. T. LOH a M. GUPTA. Formation of electrical discharge machining electrode via laser cladding. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2002, **8**(5), 315–319. ISSN 13552546. Dostupné z: doi:10.1108/13552540210451787
- [24] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Pogresívne technologie: Advanced methods of material*

- removal*. 1999. ISBN 80-7099-430-4.
- [25] Wire EDM. *Manufacturing Guide Sweden AB / Qimtek AB* [online]. [vid. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/wire-edm>
- [26] NOVÁK, Pavel. Nekonvenční technologie obrábění – elektroerozivní obrábění #2 [přednáška]. In: . ČVUT v Praze, 27.února 2022. 2022.
- [27] VALAKI, Janak B., Pravin P. RATHOD a Bharat C. KHATRI. Environmental impact, personnel health and operational safety aspects of electric discharge machining: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [online]. 2015, **229**(9), 1481–1491. ISSN 20412975. Dostupné z: doi:10.1177/0954405414543314
- [28] HESSELBACH, Jürgen, Christoph HERRMANN, Die Online-fachbuchhandlung DE a Steuern WIRTSCHAFT. *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing Weitere Fachgebiete > Technik > Technik Allgemein > Technik : Allgemeines schnell und portofrei erhältlich bei*. 2011. ISBN 978 3 642 19691 1.
- [29] BUNDESANSTALT FÜR ARBEITSSCHUTZ UND ARBEITSMEDIZIN. *TRGS 560* [online]. 2012 [vid. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/TRGS-560.html>
- [30] LEVY, G. N. Environmentally Friendly and High-Capacity Dielectric Regeneration for Wire EDM. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* [online]. 1993, **42**(1), 227–230. ISSN 17260604. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)62431-7
- [31] WANSHENG, Z., et al. A measuring and evaluating system of the utilization ratio of electrical energy in EDM. In: *Proceedings of the 11th International Symposium on Electromachining (ISEM XI)*, Lausanne, Switzerland. 1995. p. 253-259.
- [32] DOBIÁŠ, Leopold. *Toxicita ropy a ropných produktů* [online]. 2006 [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/toxicita-ropy-ropnych-produktu>
- [33] ŠTĚPÁNOVÁ, Darina. *Toxikologie benzenu* [online]. 2007 [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://toxicology.cz/modules.php?name=News&file=print&sid=82>
- [34] HAVEL, Milan, Jindřich PETRLÍK a Petr VÁLEK. *Toluen* [online]. 2020 [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://arnika.org/toxicke-latky/databaze-latek/toluen>
- [35] VÁLEK, Petr. *Xyleny* [online]. 2022 [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://arnika.org/xyleny>
- [36] VÁLEK, Petr. *Benzoapyren* [online]. 2022 [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://arnika.org/toxicke-latky/databaze-latek/benzoapyren>
- [37] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2013/35/EU ze dne 26. června 2013 o minimálních požadavcích na bezpečnost a ochranu zdraví před expozicí zaměstnanců rizikům spojeným s fyzikálními činiteli (elektromagnetickými poli) (dvacátá samostatná směrnice ve s* [online]. [vid. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=AZ&CP=02013L0035-20130629>

- [38] GE AEROSPACE. GE Aviation`s H Series Turboprop with Electronic Engine & Prop Control. *GE Aerospace* [online]. 2016 [vid. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=eLZDj0tIRuM>
- [39] BUZKOVÁ, Eva. Výroba otvorů v GT rozvaděči turbovrtulového motoru. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2017 [vid. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-otvoru-v-gt-rozvadeci-turbovrtuloveho-motoru>
- [40] MACEK, Karel, Jiří JANOVEC, Peter JURČI a Petr ZUNA. *Kovové materiály. Skriptum FS ČVUT*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2006.
- [41] REED, Roger C. *The Superalloys as High-Temperature Materials*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006. ISBN 9780521859042.
- [42] RAKOCZY, Łukasz, Grzegorz CEMPURA, Adam KRUK, Aleksandra CZYRSKA-FILEMONOWICZ a Anna ZIELIŃSKA-LIPIEC. Evolution of  $\gamma'$  morphology and  $\gamma/\gamma'$  lattice parameter misfit in a nickel-based superalloy during non-equilibrium cooling. *International Journal of Materials Research* [online]. 2019, **110**(1), 66–69. ISSN 2195-8556. Dostupné z: doi:10.3139/146.111729
- [43] CHAUDHARI, Mrunalkumar. *First Principles Calculations of the Site Substitution Behavior in Gamma Prime Phase in Nickel Based Superalloys* [online]. B.m., 2012. University of North Texas Libraries. Dostupné z: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc149571/>
- [44] REED, R.C. a C.M.F. RAE. Physical Metallurgy of the Nickel-Based Superalloys. In: *Physical Metallurgy* [online]. B.m.: Elsevier, 2014, s. 2215–2290. ISBN 9780444537713. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-53770-6.00022-8
- [45] SIMS, C.T. A History of Superalloy Metallurgy for Superalloy Metallurgists. In: *Superalloys 1984 (Fifth International Symposium)* [online]. B.m.: TMS, 1984, s. 399–419. Dostupné z: doi:10.7449/1984/Superalloys\_1984\_399\_419
- [46] KISHAWY, Hossam A. a Ali HOSSEINI. Superalloys. In: [online]. 2019, s. 97–137. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-95966-5\_4
- [47] SABOL, G. P. a R. STICKLER. Microstructure of Nickel-Based Superalloys [online]. 1969, **35**(1), 11–52. ISSN 03701972. Dostupné z: doi:10.1002/pssb.19690350102
- [48] WHITE, C. H. Nickel Base Alloys. In: *The Development of Gas Turbine Materials* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1981, s. 89–119. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-009-8111-9\_4
- [49] MORINAGA, M., N. YUKAWA, H. ADACHI a H. EZAKI. New Phacomp and its Applications to Alloy Design [online]. 2012, 523–532. Dostupné z: doi:10.7449/1984/superalloys\_1984\_523\_532
- [50] MASLENKOV, S. B., N. N. BUROVA a V. V. KHANGULOV. Effect of hafnium on the structure and properties of nickel alloys. *Metal Science and Heat Treatment* [online]. 1980, **22**(4), 283–285. ISSN 0026-0673. Dostupné z: doi:10.1007/BF00779883

- [51] RAKOCZY, Łukasz, Ondrej MILKOVIČ, Bogdan RUTKOWSKI, Rafał CYGAN, Małgorzata GRUDZIENI-RAKOCZY, František KROMKA a Anna ZIELIŃSKA-LIPIEC. Characterization of  $\gamma'$  Precipitates in Cast Ni-Based Superalloy and Their Behaviour at High-Homologous Temperatures Studied by TEM and in Situ XRD. *Materials* [online]. 2020, **13**(10), 2397. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13102397
- [52] LEVY, Lawrence Matthew, Christopher Edward THOMPSON a Lawrence James WHIMS. US20170114466A1 [online]. US20170114466A1. 2017. United States. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US20170114466A1/en>
- [53] CAIAZZO, Fabrizia, Luigi CUCCARO, Ilaria FIERRO, Giuseppe PETRONE a Vittorio ALFIERI. Electrical discharge machining of René 108 DS nickel superalloy for aerospace turbine blades. *Procedia CIRP* [online]. 2015, **33**, 382–387. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2015.06.086
- [54] DONACHIE, Matthew J. a Stephen J. DONACHIE. *Superalloys A Technical Guide, 2nd edition*. OH, USA: ASM International: Materials Park, 2002. ISBN 0-87170-749-7.
- [55] ZELLER HOFMANN. *EDM - Deutschland Zeller & Hofmann GbR* [online]. 2017 [vid. 2023-03-25]. Dostupné z: [https://edm-deutschland.eu/small\\_hole\\_drilling\\_en.html](https://edm-deutschland.eu/small_hole_drilling_en.html)

# 7 Přílohy k diplomové práci

## 7.1 Seznam příloh

Příloha 1.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 1)

Příloha 2.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 2)

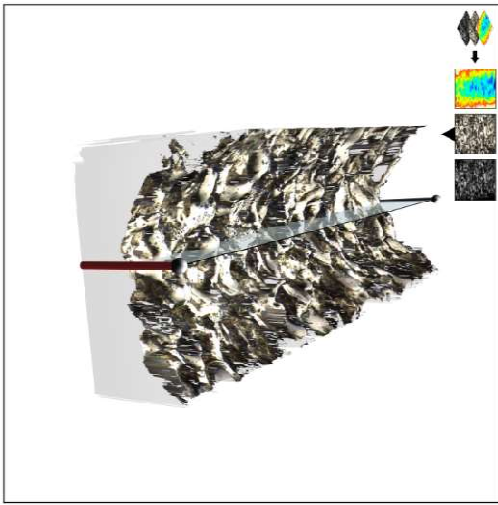
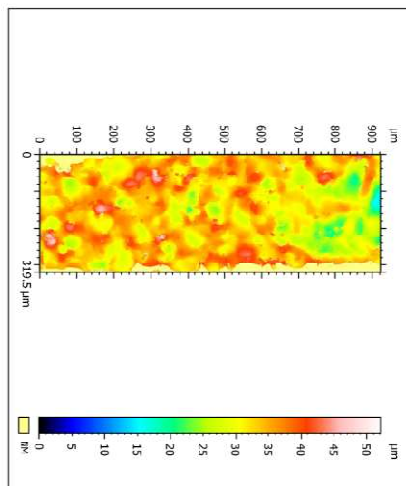
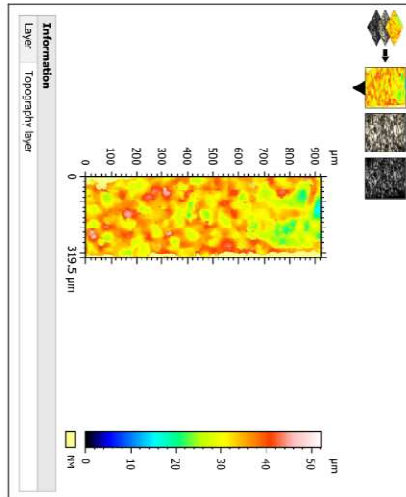
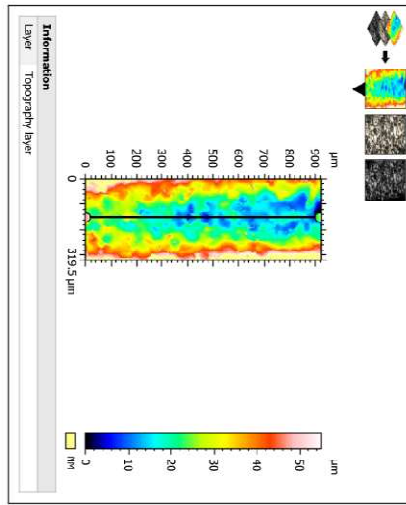
Příloha 3.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 3)

Příloha 4.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 4)

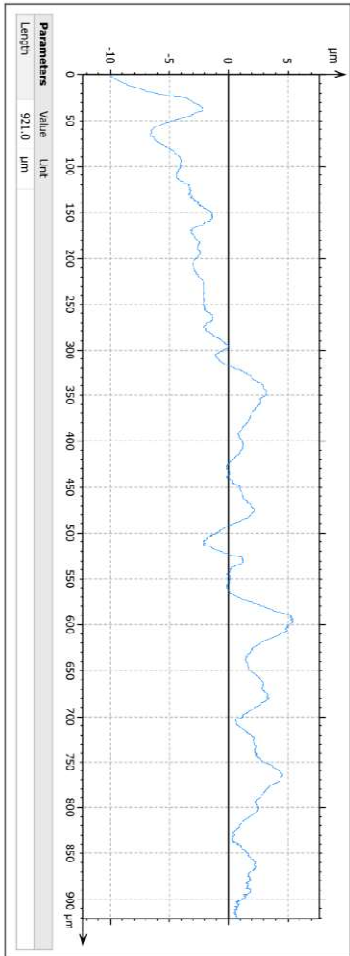
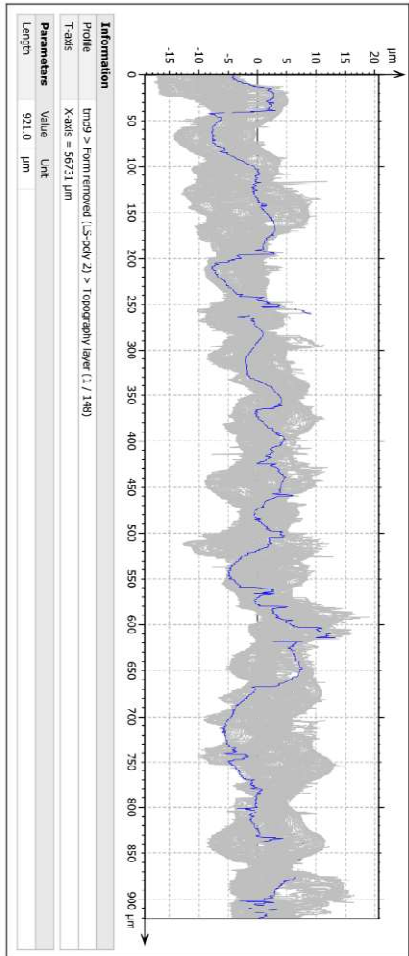
Příloha 5.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 5)

Příloha 6.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 6)

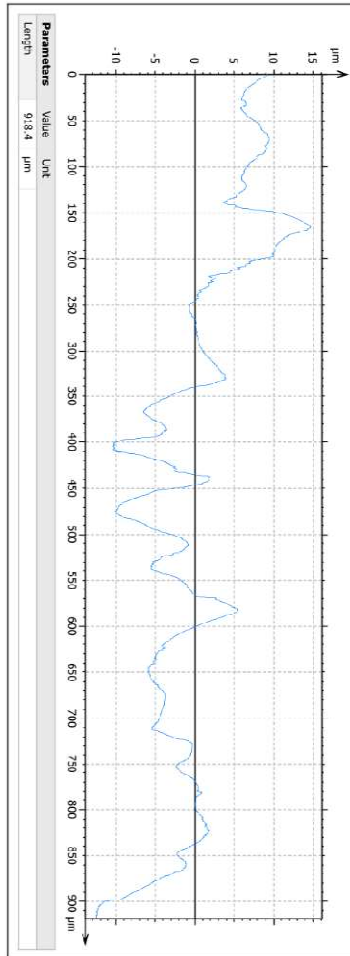
Příloha 1.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 1)



page 1



ISO 4287 – Roughness (S-1)	
<i>Pr. Name</i>	
Filter (Rz)	Gaussian, 2.500 μm
Filter (Ra)	Gaussian, 0.8000 mm
Reduktion height	All ( / )
Amplitude parameters	
Rz	10.01 μm
Ra	1.171 μm
Material ratio parameters	
Rv10	31.47 % c = 1.000 μm below highest peak
Rdc	2.072 μm p = 20.00%, q = 60.00%

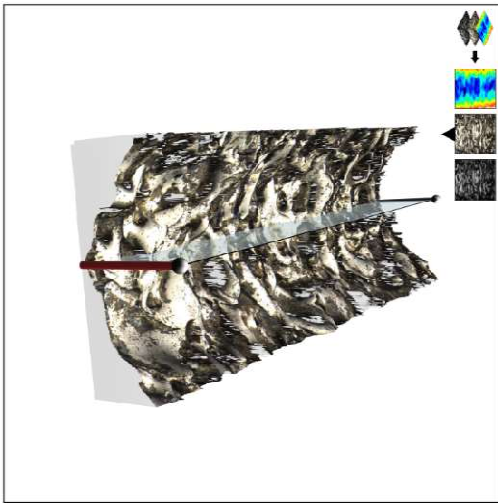
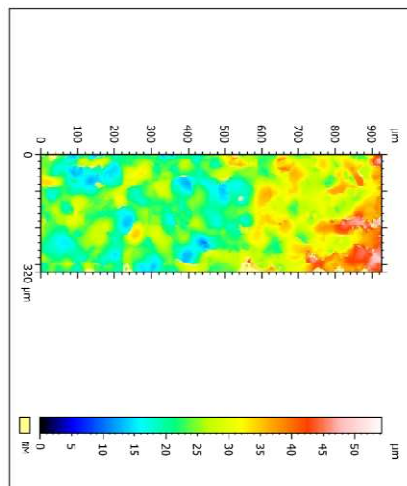
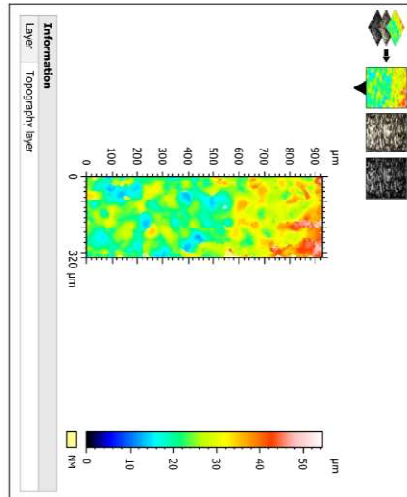
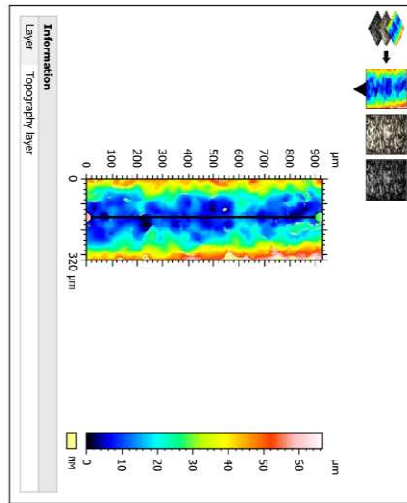


ISO 4287 - Roughness (S-L)	
F1-M2R2	
S-Ritter (A3)	Gaussian, 2.500 μm
L-Ritter (A2)	Gaussian, 0.8000 mm
Evaluation length: 918.4 (L)	
Amplitude parameters	
Rz	18.77 μm
Ra	2.745 μm
Material ratio parameters	
Rmr	1.270 % c = 1.000 μm below highest peak
Rdc	5.384 μm p = 20.00%, q = 80.00%

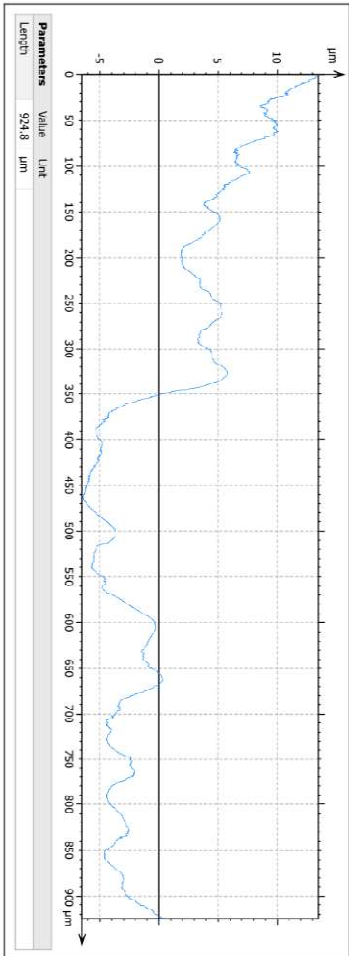
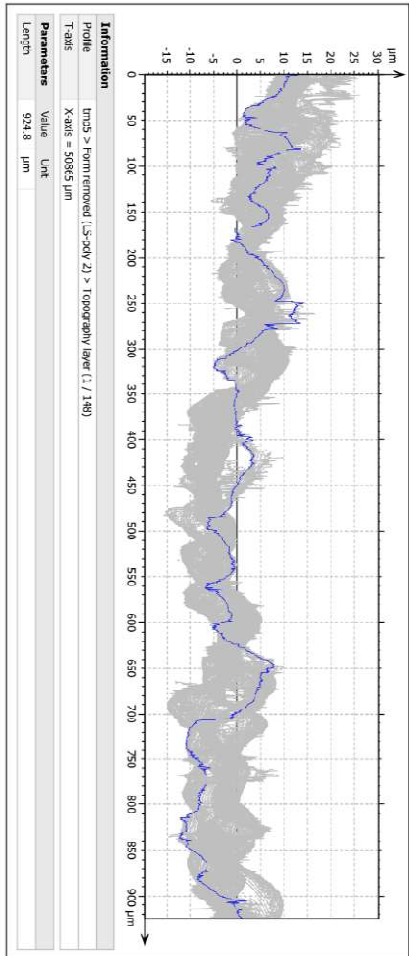
Figure 1



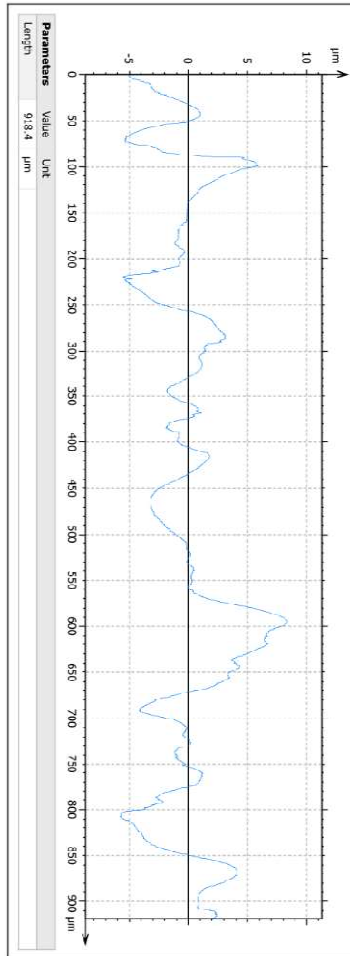
Příloha 2.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 2)



Page 1



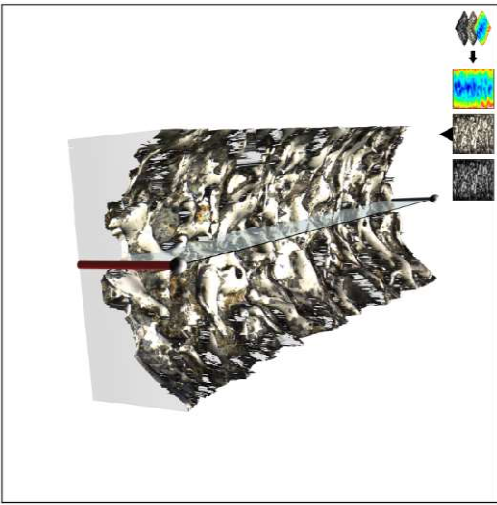
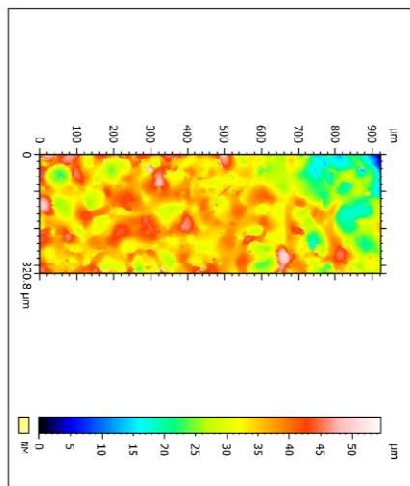
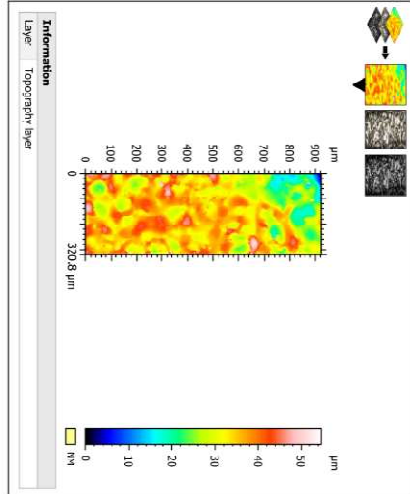
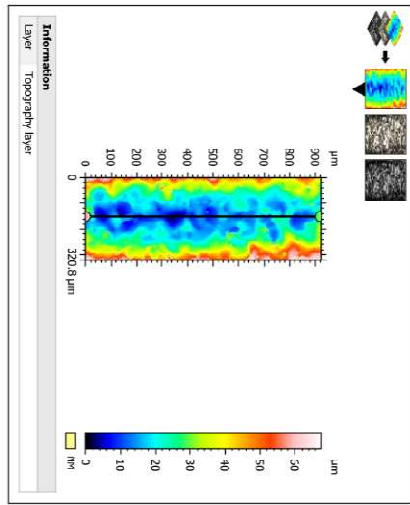
ISO 4287 – Roughness (S-1)	
Pr. Name	
Scrubber (S1) Gasston, 2.500 μm	
L-Filter (S1) Gasston, 0.8000 mm	
Reduktion height: All AC (1)	
Amplitude parameters	
Rz	11.26 μm
Ra	2.146 μm
Material ratio parameters	
Rv90	1030 % c = 1.000 μm below highest peak
Rdc	4.789 μm p = 20.00%, q = 60.00%



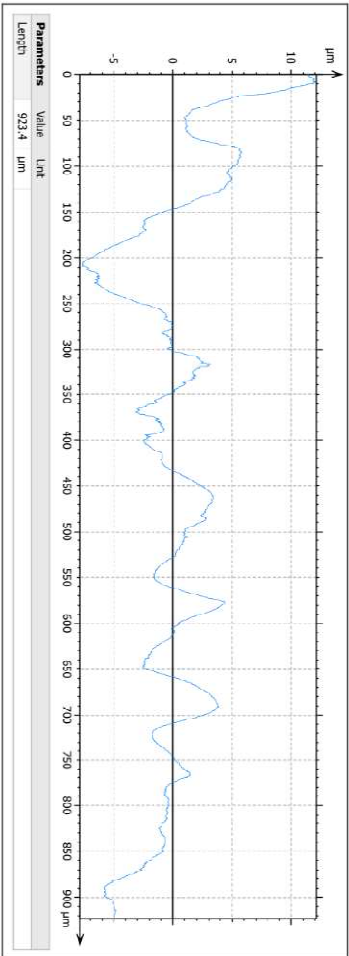
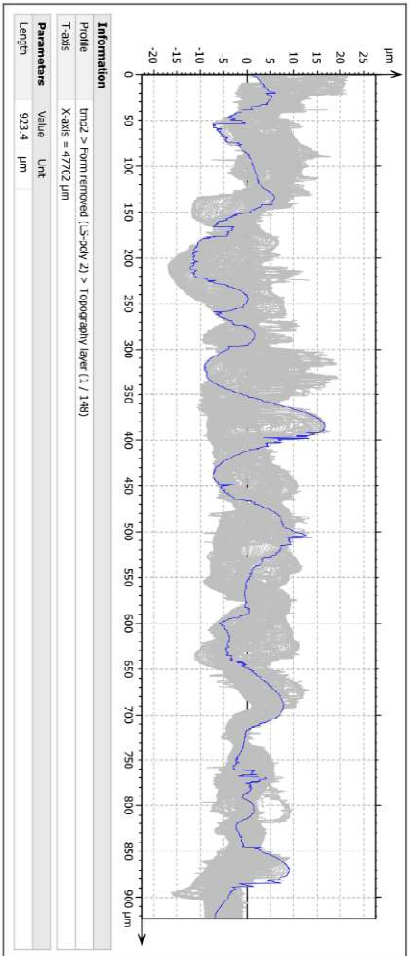
ISO 4287 - Roughness (S-L)	
F: Mahr	
S-Ruler (A3) Gaussler, 2.500 µm	
L-Ruler (A2) Gaussler, 0.8000 mm	
Evaluation length: 918.4 µm	
Amplitude parameters	
Rz	12.56 µm
Ra	2.052 µm
Material ratio parameters	
Rmr	1.905 % c = 1.000 µm below highest peak
Rdc	3.378 µm p = 20.00%, q = 80.00%

Figure 1

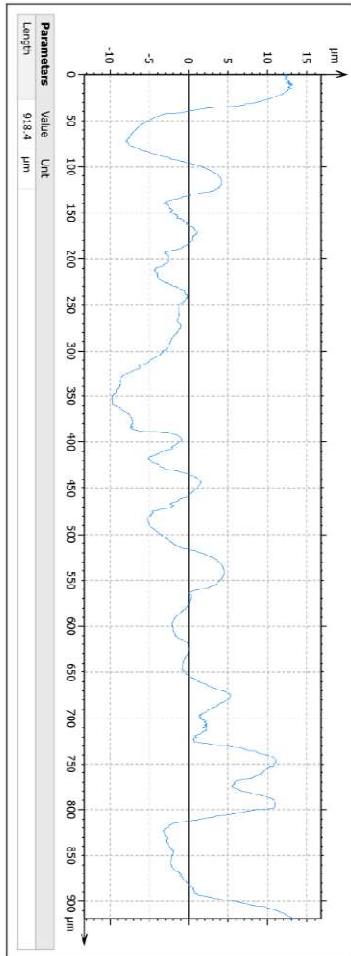
# Příloha 3.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 3)



Page 1



ISO 4287 – Roughness (S-1)	
<i>Pr. Mahr</i>	
Filter (Rz)	Gaussian, 2.500 µm
Filter (Ra)	Gaussian, 0.8000 mm
Reduktion height	All (1)
Amplitude parameters	
Rz	17.73 µm
Ra	2.195 µm
Material ratio parameters	
Rmr	1.472 % c = 1.000 µm below highest peak
Rdc	4.366 µm p = 20.00%, q = 60.00%



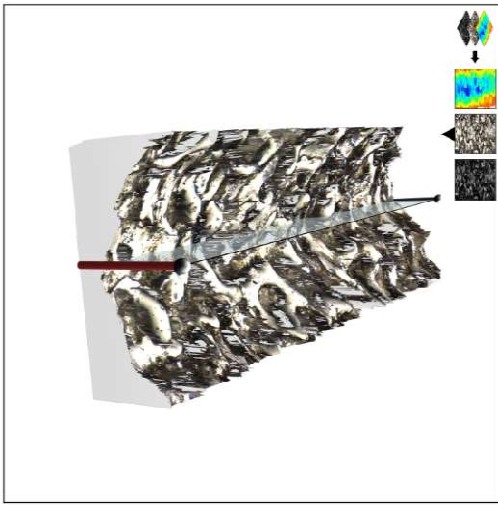
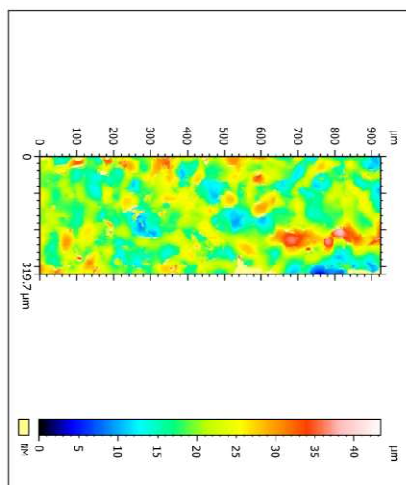
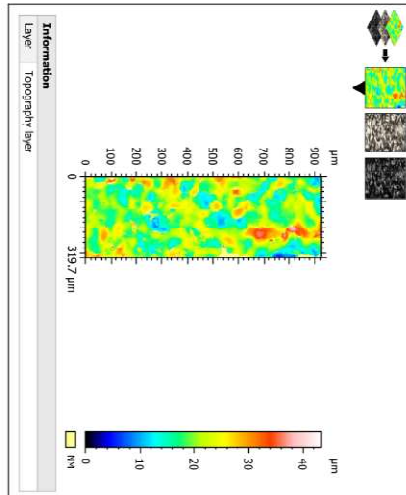
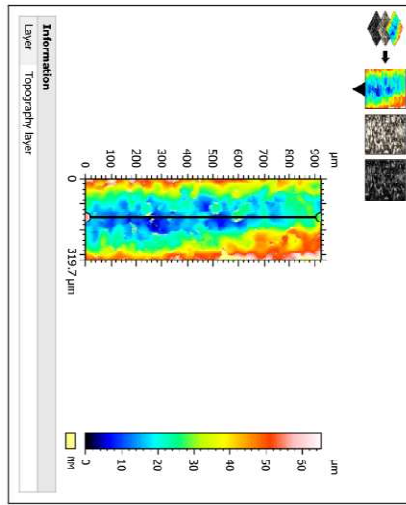
**ISO 4287 - Roughness (S-L)**

<i>F<sub>z</sub></i> Metric	
<i>S</i> -Filter (A <sub>1</sub> ) Gaussian, 2.500 µm	
<i>L</i> -Filter (A <sub>2</sub> ) Gaussian, 0.8000 mm	
Evaluation length: 918.4 (L)	
<b>Amplitude parameters</b>	
<i>R<sub>z</sub></i>	21.58 µm
<i>R<sub>a</sub></i>	3.204 µm
<b>Material ratio parameters</b>	
<i>R<sub>mr</sub></i>	2.574 % <i>c</i> = 1.000 µm <i>h</i> = 0.0002 mm
<i>R<sub>dc</sub></i>	5.021 µm <i>p</i> = 20.00% <i>q</i> = 80.00%

Figure 1

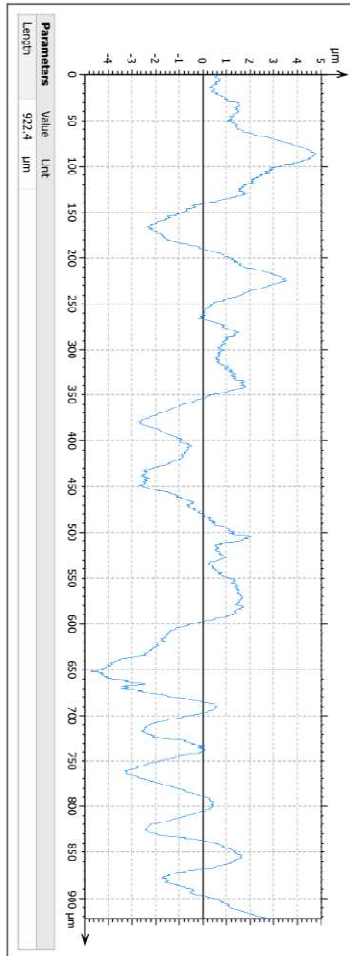
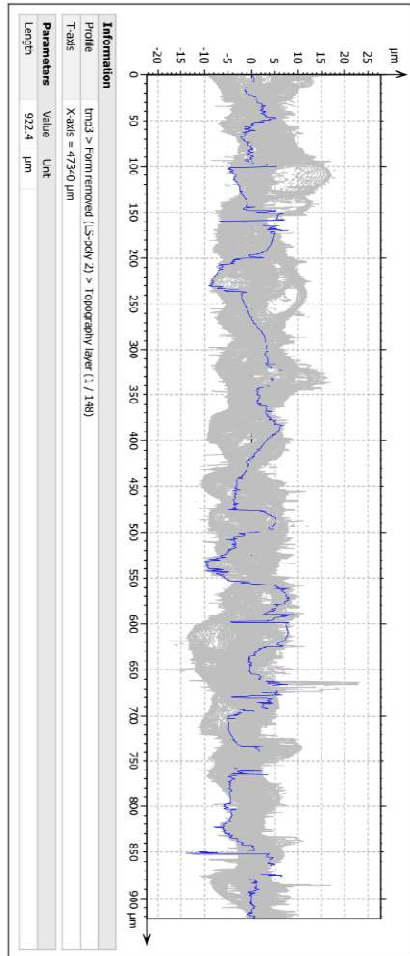


Příloha 4.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 4)



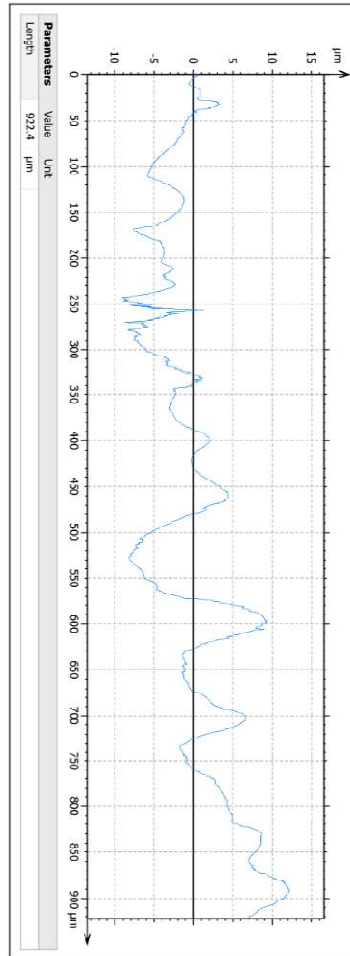
zpage 1

MaxSurf 1016 Premium



ISO 4287 – Roughness (S-1)	
<i>Pr. Name</i>	
Filter (Rz)	Gaussian, 2.500 µm
Filter (Ra)	Gaussian, 0.8000 mm
Reduktion height	All (1)
Amplitude parameters	
Rz	7.392 µm
Ra	1.291 µm
Material ratio parameters	
Rv10	3.710 % c = 1.000 µm below highest peak
Rdc	2.918 µm p = 20.00%; q = 60.00%

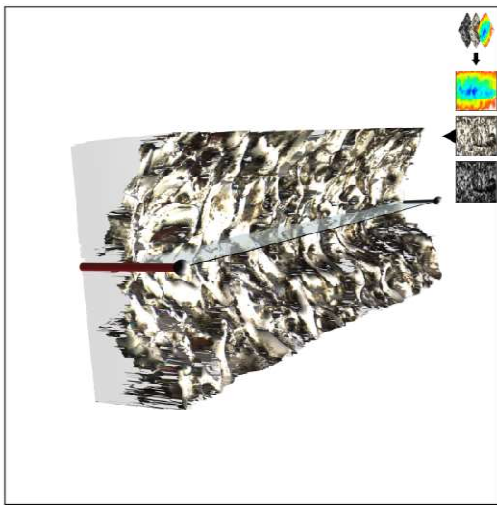
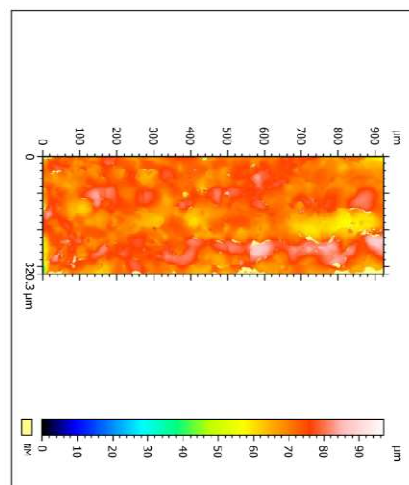
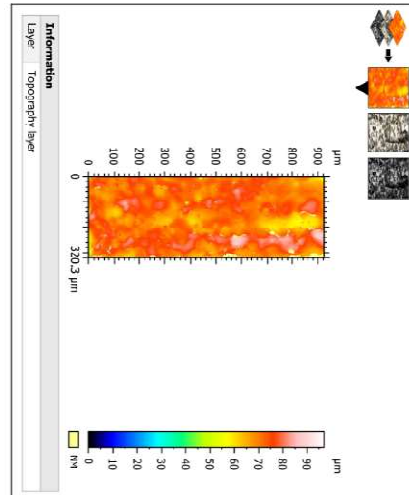
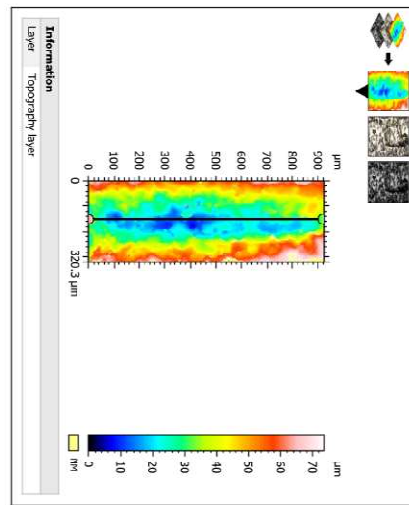




ISO 4287 - Roughness (S-L)	
<i>F<sub>r</sub></i> MaxZ	
<i>S<sub>r</sub></i> Filter (A <sub>s</sub> ) Gaussian, 2.500 µm	
<i>L<sub>r</sub></i> Filter (A <sub>c</sub> ) Gaussian, 0.8000 mm	
Evolution length: 1/11 Ac-1/2	
Amplitude parameters	
<i>R<sub>z</sub></i>	16.43 µm
<i>R<sub>a</sub></i>	2.688 µm
Material ratio parameters	
<i>R<sub>mv</sub></i>	2.116 % <i>c</i> = 1.000 µm <i>h</i> = 0.0001 mm <i>h</i> = 0.0001 mm
<i>R<sub>dc</sub></i>	5.817 µm <i>p</i> = 20.000% <i>q</i> = 80.000%

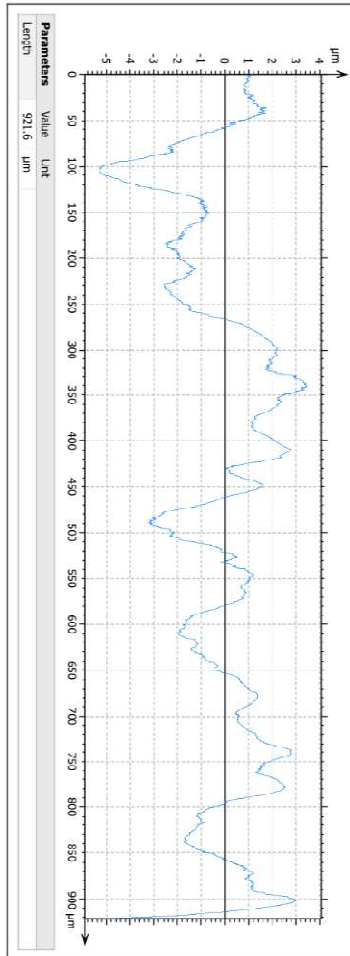
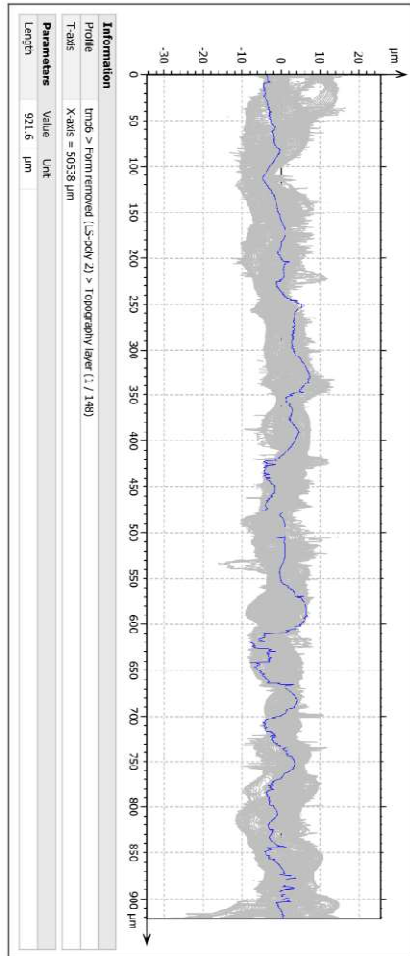
Figure 1

Příloha 5.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 5)



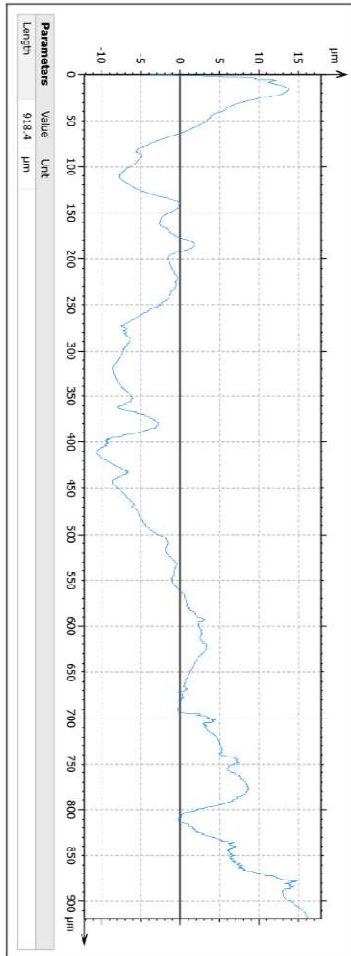
Page 1

MaxSurf 1016 Premium



**ISO 4287 – Roughness (S-1)**

<i>Pr. Name</i>	
S-Fiber (S1) Gasston, 2.500 µm	
L-Filter (S1) Gasston, 0.8000 mm	
Produktová délka - All (1)	
<b>Amplitude parameters</b>	
Rz	7.687 µm
Ra	1.422 µm
<b>Material ratio parameters</b>	
RvM	6.217 % c = 1.000 µm below highest peak
Rdc	3.282 µm p = 20.00%, q = 60.00%

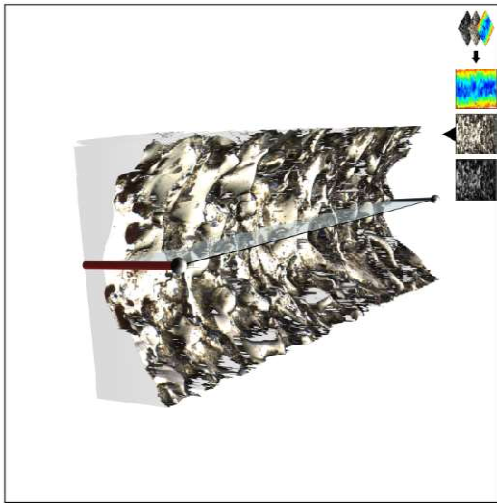
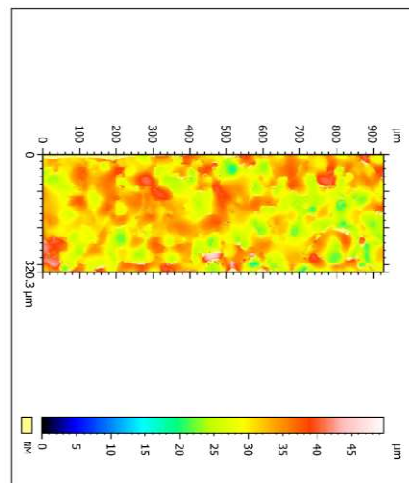
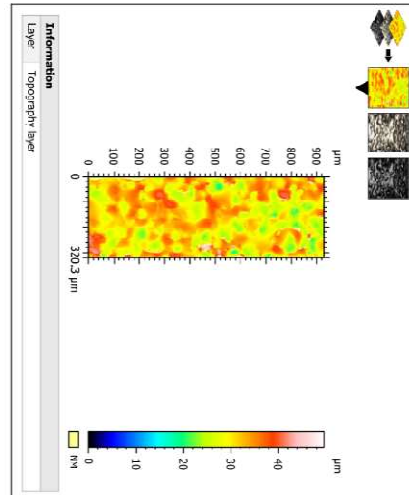
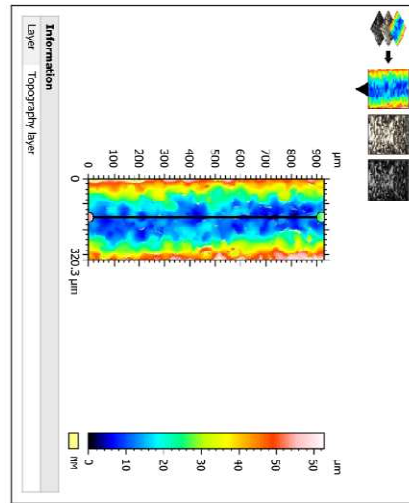


**ISO 4287 - Roughness (S-L)**

<i>F<sub>z</sub></i> Metric	
<i>S</i> -Filter (A <sub>1</sub> ) Gaussian, 2.500 μm	
<i>L</i> -Filter (A <sub>2</sub> ) Gaussian, 0.8000 mm	
Evaluation length: 918.4 μm (L)	
<b>Amplitude parameters</b>	
R <sub>z</sub>	21.58 μm
R <sub>A</sub>	2.724 μm
<b>Material ratio parameters</b>	
R <sub>Mr</sub>	1.203 % <i>c</i> = 1.000 μm <i>h</i> = 0.001 μm <i>h</i> = 0.001 μm
R <sub>dC</sub>	5.127 μm <i>p</i> = 20.00% <i>q</i> = 80.00%

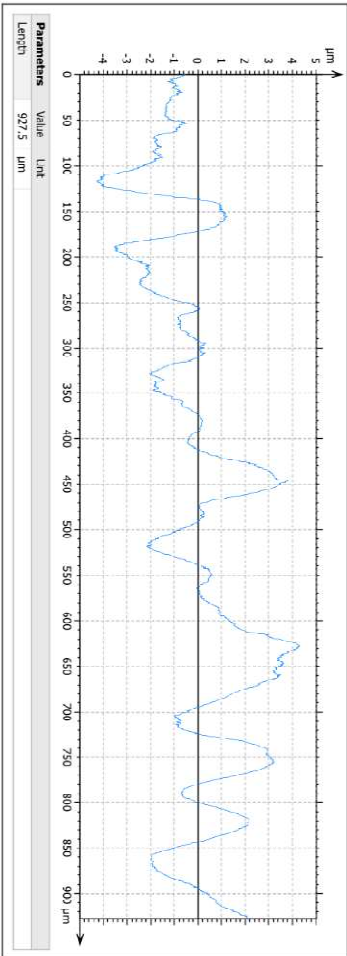
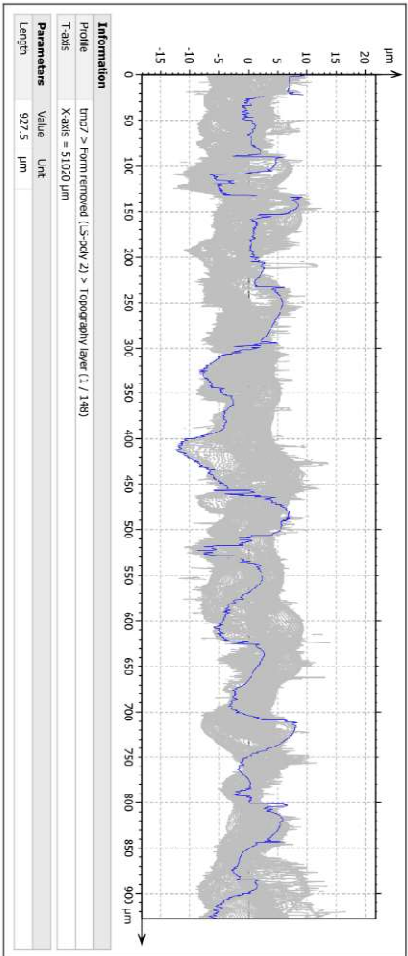
Figure 1

Příloha 6.: Výstup v podobě protokolu z měření drsnosti na konfokálním mikroskopu (vzorek 6)

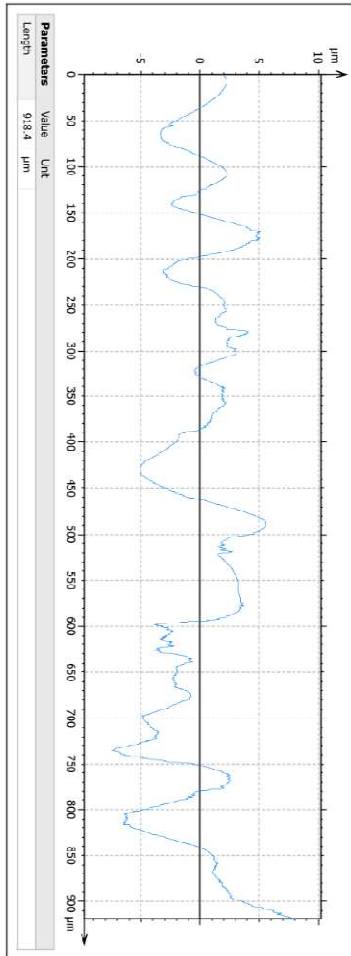


MaSurf KRC Premium





ISO 4287 – Roughness (S-1)	
<i>Prüfkopf</i>	
S-Fiber (S1) Gassson	2.500 µm
L-Fiber (S1) Gassson	0.8000 mm
Funktionslänge: Allz (1)	
Amplitude parameters	
Rz	5.489 µm
Ra	1.152 µm
Material ratio parameters	
Rv10	5.283 % c = 1.000 µm below highest peak
Rdc	2.702 µm p = 20.00%, q = 60.00%



ISO 4287 - Roughness (S-L)	
<i>F<sub>r</sub></i> [μm]	5.716
<i>S</i> -Filter (λ <sub>f</sub> ) Gaussian, 2.500 μm	
<i>L</i> -Filter (λ <sub>c</sub> ) Gaussian, 0.8000 mm	
Evolution length: 1/10 λ <sub>c</sub> (1)	
Amplitude parameters	
<i>R<sub>z</sub></i>	11.95 μm
<i>R<sub>a</sub></i>	2.262 μm
Material ratio parameters	
<i>R<sub>int</sub></i>	2.174 % <i>c</i> = 1.000 μm <i>h</i> = 0.0001 mm
<i>R<sub>dc</sub></i>	5.051 μm <i>p</i> = 20.000% <i>q</i> = 80.000%

Figure 1