

ČVUT v Praze

Fakulta strojní

Ústav přístrojové a řídicí techniky
odbor Přesné mechaniky a optiky
studijní program Strojní inženýrství
obor Konstrukční a procesní inženýrství
Vedoucí práce: Doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D.

Metody přípravy elektrod a obrobků pro elektroerozivní obrábění

Disertační práce



Petr Šindelář

Praha 2018

Děkuji svému školiteli Doc. Ing. Janu Hoškovi, Ph.D. za podporu a pomoc po celou dobu studia. Děkuji Ing. Františku Tatíčkov, Ph.D. za ochotu a pomoc při měření na konfokálním mikroskopu. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu v celém mém studiu.

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že ČVUT v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Název práce: Metody přípravy elektrod a obrobků pro elektroerozivní obrábění

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Autor: Petr Šindelář

Katedra: Ústav přístrojové a řídicí techniky, odbor Přesné mechaniky a optiky

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D.

Abstrakt: Práce se zabývá metodami elektroerozivního obrábění. Autor zde shrnul výřez ze stávajícího poznání v oblasti elektroerozivního obrábění. Autor navrhl použití tří nových typů vodičků pro drátové řezání a vyhodnotil jejich přesnost a životnost. Dále zde popisuje dvě zařízení pro drátové řezání, které zkonstruoval a vyrobil pro přípravu mikroelektrod. Dále pak navrhl novou metodu EDM řezání a obrábění pomocí průběžného pásku. Pro tuto metodu zkonstruoval a vyrobil funkční zařízení a s jeho pomocí vyhodnotil účinnost této metody.

Klíčová slova: EDM, drát, pásek, elektrody, elektroerozivní obrábění

Title: Methods of preparing EDM electrodes and parts

Author: Petr Šindelář

Department: Dept. of Instrumentation and Control Engineering, Div. Precision Mechanics and Optics

Supervisor: Doc. Ing. Jan Hosek, Ph.D.

Abstract: This thesis concerns of two methods of preparing EDM electrodes and parts. The author covered the actual state of the art of research and development in electroerosive machining. The author designed three new types of electroerosive machining wire guides and tested their precision and durability. The author described two wirecutting tools, which he designed and built for preparing microelectrodes. The author also designed a new method of using a stripe for EDM cutting. For this method the author designed and manufactured a working tool and evaluated the effectivity of this method with its help.

Keywords: EDM, wire, electrodes, electroerosive machining

Obsah

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Úvod | 7 |
| 2 | Stav řešené problematiky | 9 |
| 2.1 | Úvod | 9 |
| 2.2 | Princip EDM | 10 |
| 2.3 | Historie | 13 |
| 2.4 | Základní způsoby EDM | 15 |
| 2.4.1 | Obrábění blokovými elektrodami | 15 |
| 2.4.2 | Obrábění drátovými elektrodami | 20 |
| 2.4.3 | Rychlé vrtání děr | 24 |
| 2.4.4 | Mikroobrábění | 27 |
| 2.4.5 | Méně rozšířené metody | 27 |
| 2.4.6 | Obrábění nevodivých materiálů | 29 |
| 2.4.7 | Úprava povrchu po EDM | 30 |
| 2.4.8 | Obrábění elektickým obloukem (BEAM) | 32 |
| 2.5 | Základní prvky EDM | 33 |
| 2.5.1 | Obráběcí elektrody | 33 |
| 2.5.2 | Dielektrikum | 34 |
| 2.5.3 | Napájecí zdroj | 42 |
| 2.5.4 | Pevná vodítka | 42 |
| 2.6 | Závěr | 44 |
| 3 | Předpoklady a cíle disertační práce | 45 |
| 4 | Experimenty s novými typy vodítek | 47 |
| 4.1 | Použitá zařízení | 47 |
| 4.1.1 | Sodick AP1L | 47 |
| 4.1.2 | Mikroskop Karl Zeiss | 49 |
| 4.1.3 | Zobrazovací systém Navitar Zoom 6000 | 49 |
| 4.1.4 | Konfokální mikroskop Olympus Lext 3000 | 49 |
| 4.2 | Drátořezné zařízení s inovativními ocelovými vodítky | 50 |
| 4.2.1 | Požadavky na konstrukci zařízení | 51 |
| 4.2.2 | Konstrukce a výroba drátořezného zařízení | 52 |
| 4.2.3 | Konstrukce a výroba nástavce do vřetena | 56 |
| 4.2.4 | Pevná vodítka | 57 |
| 4.2.5 | Zhodnocení výsledků | 59 |
| 4.3 | Drátořezné zařízení s trubkovými vodítky | 59 |
| 4.3.1 | Požadavky na konstrukci zařízení | 60 |
| 4.3.2 | Konstrukce a výroba zařízení | 60 |
| 4.3.3 | Zhodnocení výsledků | 62 |
| 4.4 | Ověření přesnosti vodítek | 62 |
| 4.4.1 | Vodítka s V zářezy, drát 0,1mm | 63 |
| 4.4.2 | Složená vodítka, drát 0,1mm | 66 |
| 4.4.3 | Trubková vodítka, drát 0,1mm | 69 |
| 4.4.4 | Zhodnocení výsledků | 72 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.5 | Abraze složených vodiček | 72 |
| 4.5.1 | Zhodnocení výsledků | 75 |
| 5 | Experiment s drátem obdélníkového průřezu | 77 |
| 5.1 | Požadavky na konstrukci zařízení | 77 |
| 5.2 | Konstrukce zařízení | 78 |
| 5.3 | Vlastní vyrobené zařízení | 79 |
| 5.4 | Experimenty pro ověření funkčnosti řezání páskem | 83 |
| 5.4.1 | Řezání s páskem orientovaným napříč, tenkou stranou k obrobku | 83 |
| 5.4.2 | Řezání s páskem orientovaným podélně, širokou stranou k obrobku | 84 |
| 5.4.3 | Zhodnocení výsledků | 85 |
| 6 | Závěr a celkové zhodnocení | 87 |
| | Seznam použité literatury | 89 |
| | Výsledky a konference autora | 95 |
| | Seznam obrázků | 98 |
| | Seznam tabulek | 99 |
| | Přílohy | 101 |

1. Úvod

Současná průmyslová výroba řeší u řady produktů otázky efektivní výroby obrobků s malými detaily náročnými na přesnost často i v exotických a těžko obrobitelných materiálech. To vede k intenzivnímu využívání dříve nekonvenčních způsobů obrábění a tlaku na zvyšování jejich produktivity.

Mezi tyto technologie lze zařadit také elektroerozivní obrábění (EDM), tato technologie využívá k obrábění elektrického proudu. Pomocí zapínání a vypínání zdroje v mikrosekundových intervalech vytváří jiskry, které odebírají materiál. Hlavní výhodou EDM je možnost obrábět těžkoobrobitelné kovy, ale také fakt, že do obrobku nezanáší mechanické pnutí. Jelikož se jedná o bezkontaktní metodu, obrobek není při obrábění silově namáhán.

Kromě uvedených výhod má každá technologie i své nevýhody a omezení. V případě EDM tím je její časová náročnost, nebo respektive nízká produktivita výroby. Elektroeroze je sice přesná, ale velmi zdlouhavá.

Mezi základní způsoby EDM patří hloubení, kdy je obráběcí elektroda postupně zasunována do materiálu obrobku, až se vytvoří její negativní kopie.

Dalším ze základních způsobů je drátové řezání, využívající jako nástroj tenký drát. Drátové řezání je rychlejší než hloubení, protože se při něm obrábí pouze materiál kontury. Jedná se tedy o metodu s velmi malým procentem odpadu materiálu. Tento fakt je u elektroeroze obzvlášť vhodný, protože se často obrábí drahé materiály.

Mezi další důležité způsoby patří rychlé vrtání děr, které je schopno hloubit tenké otvory v řádech desítek mikrometrů za pomoci rapidního vyplachování nečistot proudem dielektrika.

Rychlost obrábění a jakost povrchu je ovlivňována převážně materiálem elektrod a obrobku. Dále pak materiálem dielektrika, které může být kapalné, nebo plynné. Nejrozšířenějšími dielektriky jsou minerální oleje a deionizovaná voda. Významnou roli hraje i zdroj napětí.

U hloubení je nevýhodou, že elektroda se při obráběcím procesu opotřebovává a výsledná kontura tak není nikdy úplně přesná. V praxi se proto používá více stejných elektrod. U drátového řezání je nevýhodou, že drát je velmi tenký a naráz odebírá jen malé množství materiálu. Na základě rešerše výše uvedených technik EDM jsem se rozhodl spojit tyto technologie a v rámci své disertační práce jsem navrhl a otestoval metodu používající k obrábění průběžného pásku.

V další části své práce jsem řešil otázku možnosti náhrady ekonomicky náročných vodiček drátu za levnější, ale technologicky stabilní variantu. Při řezání drátem se běžně používají průvlačná diamantová, nebo rubínová vodítka. Pro řezání je pak pro každý průřez drátu nutno zakoupit dvě taková finančně náročná vodítka. Rozhodl jsem se proto nahradit tato vodítka třemi novými typy a v této práci jsem zkoumal jejich vliv na geometrii řezu a jejich životnost.

Disertační práce se skládá ze šesti kapitol. Na začátku je to tento úvod.

Dále se jedná o rešerši literatury vztahující se k elektroerozivnímu obrábění. Tato kapitola je dále členěna do podkapitol, které se zabývají principem EDM a historií EDM. Dále rozebírají různé druhy elektroerozivního obrábění a detailně popisují stav problematiky u hloubení, drátového řezání a rychlého EDM vrtání. Dále se zabývají materiálem a provedením obráběcích elektrod, materiály různých

dielektrik, způsobem provedení zdroje napětí a provedením pevných vodiček.

Další kapitola popisuje vytyčené cíle práce. Stanovuje dva základní cíle, a sice použití průběžného pásku a použití tří nově navržených typů vodiček.

Další kapitola pak popisuje dvě drátořezná zařízení a experimenty, které jsem prováděl pro ověření funkčnosti těchto zařízení a na nich osazených tří nových typů vodiček. V této kapitole jsou také popsány praktické ukázky elektrod, které byly pomocí těchto zařízení vyrobeny.

Další kapitola se zabývá originálním zařízením pro obrábění pomocí průběžného pásku. Je zde posána nová metoda, kdy je pásek napnut mezi dvěma vzdálenými vodičky. Tato kapitola pak nabízí srovnání efektivity obrábění při řezání páskem a drátem.

Poslední kapitola hodnotí, jak byly cíle splněny, a je zde popsán i návrh dalších možných řešení.

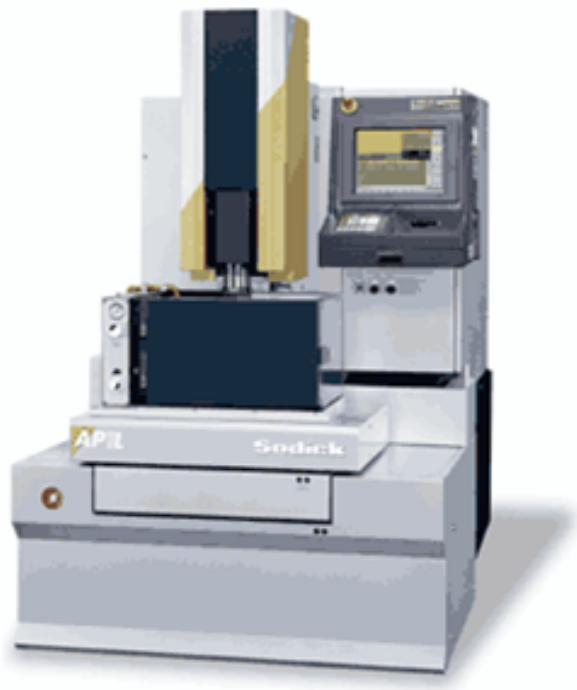
Následuje přehled mých publikací a vědeckých konferencí, kterých jsem se zúčastnil.

Na konci práce uvádím seznam použité a citované literatury.

2. Stav řešené problematiky

2.1 Úvod

Obrábění pomocí elektrického výboje je dnes již velice rozšířenou metodou pro zpracování zejména tvrdých a pomocí konvenčních způsobů těžkoobrobitelných materiálů. Tato metoda může být použita pro obrábění vodivých materiálů. Jedná se o bezkontaktní způsob, který nezanáší do obrobku plastické deformace. Elektroerozivní obrábění (EDM - Electrical Discharge Machining) se používá k výrobě přesných součástí, k broušení nástrojů a k mnoha dalším aplikacím zahrnujícím například mikroobrábění. EDM metoda používá k odběru materiálu krátkých přesně řízených pulzů, které odebírají definované množství materiálu tak, že se materiál v místě výboje roztaví a odplaví. Přesným polohováním a spojením kráterů vzniklých jednotlivými výboji se pak získá výsledný tvar součásti. EDM obrábění je poměrně novou metodou, která zaznamenala hlavní rozvoj až v druhé polovině dvacátého století. Další rozvoj přišel po objevu tranzistoru a bouřlivém rozvoji elektroniky v poslední čtvrtině dvacátého století a v tomto tisíciletí. Elektroerozivní obrábění probíhá buďto úplně ponořené, nebo omývané dielektrickou vodou, nebo olejem. Dnes se používá hlavně k obrábění tvrdých materiálů, vrtání mikroděr, broušení nástrojů, přesnému dělení materiálu jako např. dělení křemíkových monokrystalů, a k výrobě součástí, které by nebylo možné obrábět konvenčními metodami. Na našem ústavu disponujeme elektroerozivní hloubičkou Sodick AP1L (obr. 2.1 [1]).

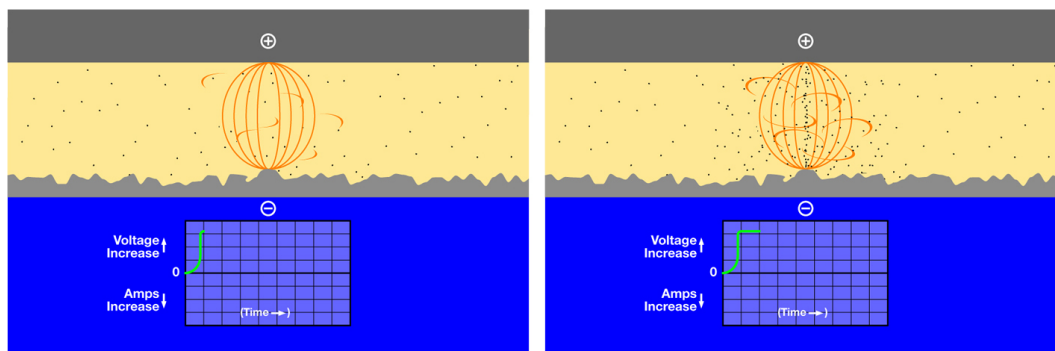


Obrázek 2.1: Hloubička Sodick AP1L

2.2 Princip EDM

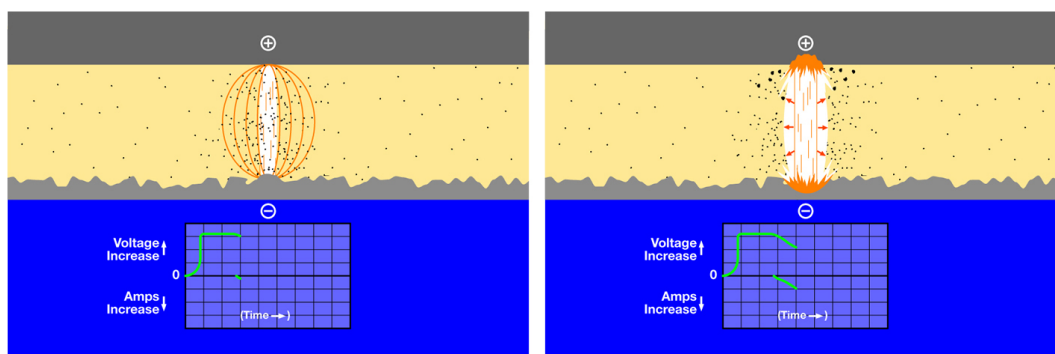
EDM je bezkontaktní metoda používající elektrotermelný proces pro úběr materiálu, používá se pro obrábění vodivých materiálů.[5] EDM technologie je vhodná zejména na obrábění těžkoobrobitelných tvrdých kovů, nebo například grafitu.

Existuje více modelů toho, co se odehrává při elektroerozivním procesu, nejvíce studií se však přiklání k termoelektrickému modelu.[9] [7] [4] Následující série obrázků [6] ukazuje předpokládaný průběh procesu EDM obrábění. Ve spodní části obrázků je znázorněn průběh napětí a proudu.



Obrázek 2.2: Přiblížení elektrody k obrobku

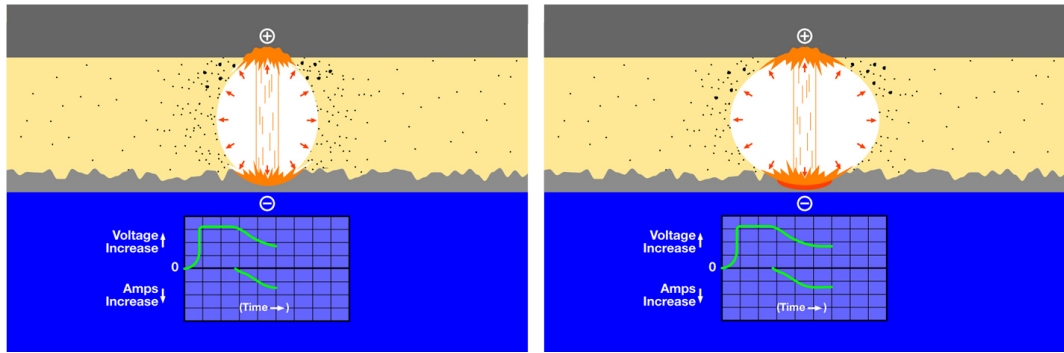
Nabitá elektroda je přiblížena k opačně nabitému obrobku. Mezi nimi je izolační tekuté médium tzv. dielektrikum. I přes svůj značný odpor se dielektrikum po připojení dostatečného potenciálu ionizuje a stává se vodivým. Obsažené nečistoty pomáhají zvýšení vodivosti a katalyzují tak ionizační proces. Elektrické pole má největší intenzitu tam, kde je obrobek nejbližší elektrodě, nebo kde je zesíleno nečistotami. Na grafu vidíme, že napětí se zvyšuje, ale proud je stále nulový.



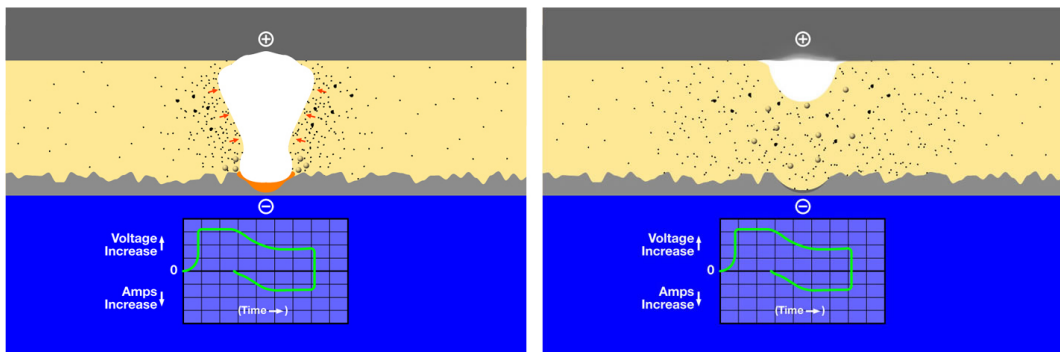
Obrázek 2.3: Vytvoření jiskrového kanálu

Jakmile se prorazí odpor dielektrika, začne protékat proud a napětí mezi elektrodou a obrobkem se zmenšuje. Proud uvolňuje teplo, které taví a odpařuje části elektrody, dielektrika a obrobku.

Ke konci fáze on-time se proud i napětí stabilizují. Teplo a tlak uvnitř bubliny okolo výboje dosáhnou svého maxima. Dochází k odtavování částí elektrody a obrobku. Vrstva pod touto bublinou je v roztaveném stavu, ale je udržována na místě tlakem bubliny. Kanál vytvořený výbojem teď obsahuje přehřátou plazmu vytvořenou vypařeným kovem nebo uhlíkem a vypařeným dielektrikem. Skrz tento kanál prochází proud.



Obrázek 2.4: Mohutnění jiskry



Obrázek 2.5: Ukončení výboje

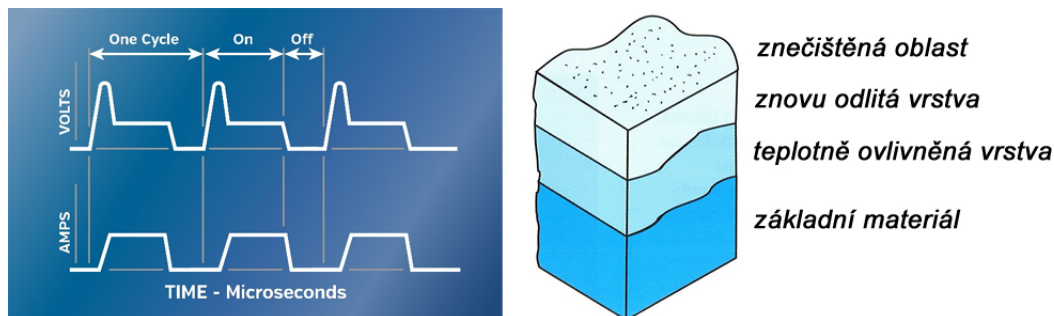
Jakmile je vypnuto napětí, neboli na začátku fáze off-time, padá napětí i proud v kanálu k nule. Teplota se rychle snižuje a bublina okolo kanálu zaniká. Roztavený materiál, který byl přitisknut k obrobku, se od něj odpoutává. Do místa výboje se vlévá čerstvé dielektrikum z okolí a odplavuje roztavený materiál ve formě kulové třísky. Zbývající odpařený materiál odchází k hladině dielektrické vany. Čas off-time musí být dostatečně velký, aby se tříška mohla dostat dál od místa obrábění a nebránila dalším výbojům.

Tato sekvence znázorňuje jeden cyklus on/off-time zdroje napětí. Tento proces se v moderních strojích opakuje až 250 000 krát za vteřinu. Parametry jednotlivých výbojů můžeme ovlivňovat délkou on a off-time zdroje a velikostí napětí i proudu. Dále také průběhem napětí při časech on-time a off-time.

Postupným spojováním kráterů vzniklých při jednotlivých cyklech zdroje se v obrobku vytváří dutina. Čím hlubší je tato dutina, tím těžší je pro neznečištěné dielektrikum dostat se do místa řezu a čistit ho. Pro dobré obnovování čistého dielektrika v místě řezu je dobré použít vymývání třísek. Je proto nutno zajišťovat dobrý průtok a tlak dielektrické kapaliny. Dielektrikum ve vaně je neustále obnovováno a filtrováno.

Jelikož je EDM bezkontaktní metodou, nezanáší plastické deformace, ani teplotní ovlivnění hlouběji do obrobku. Přesto ale po obrábění pomocí EDM zůstává povrchová vrstva rozdělena na tři oblasti (obr.2.6[6]). Znečištěná oblast obsahuje pozůstatky usazeného materiálu elektrody dielektrika a zoxidovaného kovu vzniklého při obrábění. Tato vrstva se dá ovšem po obrábění lehce odstranit. Pod ní se nachází zóna kovu, který byl roztaven a znovu ztuhl, čímž se změnila jeho metalurgické vlastnosti. Tato vrstva může být tedy velmi křehká, čímž se v ní mohou

vytvořit trhliny, což často vede k selhání, nebo nedostatečné životnosti součástí. Automatické cykly moderních CNC EDM strojů mohou tuto vrstvu odstranit. Poslední vrstva je teplem ovlivněná vrstva kovu, který nebyl roztaven, ale vlivem teplotních změn se do něj zaneslo pnutí.

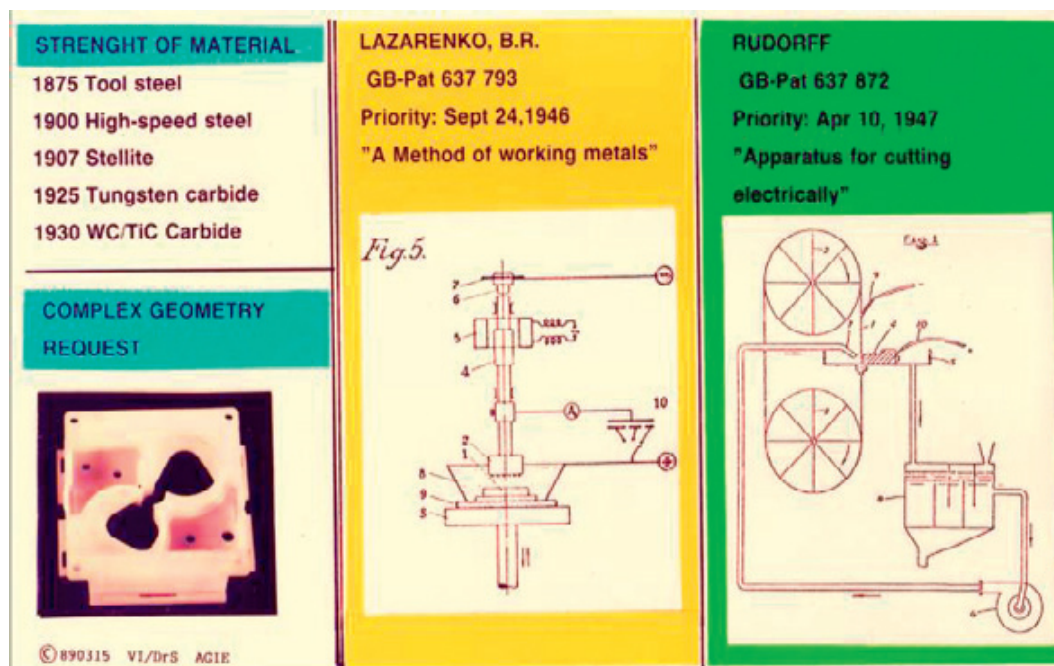


Obrázek 2.6: Povrch obrobku po EDM obrábění

Každý cyklus se tedy skládá z času on-time, a off-time které jsou v ovládacím programu označeny v mikrosekundách (obr. 2.6[6]). Objem odebraného materiálu je přímo úměrný energii spotřebované při fázi on-time. Tato energie je ovládaná pomocí délky času on-time, velikostí napětí zdroje a dovoleným špičkovým proudem. Čím déle bude tedy zdroj zapnut, tím více materiálu bude odtaveno v jednotlivém výboji. Budou se vytvářet větší krátery, čímž bude i drsnost povrchu větší. Při dlouhém čase on-time se také teplo dostane hlouběji do obrobku a znovu odlitá vrstva se zvětší. Příliš dlouhé časy on-time tedy nemusí být vhodné a vždy záleží na materiálovém složení dvojice nástroj obrobek. Obráběcí cyklus je dokončen vypnutím zdroje na předem stanovený čas, tedy off-time. Čas off-time ovlivňuje stabilitu a rychlost řezu, Čím kratší je tento čas, tím rychleji může začít odebrání dalšího kráteru. Je nutno si ovšem uvědomit, že mezera potřebuje nějaký čas na znovuoobnovu čistého dielektrika. Pokud by totiž v mezeře zbylo příliš zionizované dielektrikum, výboj by nebyl stabilní. Servoosy by potom musely odskočit, což by prodloužilo obrábění více, než vhodně zvolený delší čas off-time.

2.3 Historie

Základy EDM sahají do sedmnáctého a osmnáctého století. Již irský vědec Robert Boyle (1627 - 1691) popsal mizení materiálu při experimentech s elektrickým výbojem při snaze vytvořit kovový prášek z tyčového materiálu. Roku 1770 anglický chemik Joseph Priestley objevil erozivní efekt elektrického výboje. Cílené použití elektroeroze pro odběr materiálu bylo však použito až ve dvacátém století. Mezi světovými válkami se začaly objevovat přístroje používající elektroeroze k odstraňování závitníků a jiných zlomených nástrojů z drahých a těžkoobrobitelných obrobků. [9] Tyto přístroje byly velmi neefektivní a bylo extrémně těžké s nimi pracovat. Během druhé světové války však došlo k vývoji v řízení zdroje a polohování EDM stroje. [2][3] Ruský pár B.R. a N.I. Lazarenkovi, kteří se během druhé světové války zabývali snižováním opotřebení elektrických kontaktů, použili tento negativní efekt k obrábění. V roce 1943 na moskevské univerzitě Lazarenkovi použili RC obvod, jehož kondenzátor nabíjeli předem definovaným napětím. Pro elektroerozivní obrábění pak také patentovali první zařízení (obr. 2.7 [2]).



Obrázek 2.7: První EDM zařízení

Dalšími z prvních výrobců EDM zařízení byli Dagobert Rudolf, se svou anglickou firmou Sparcatron, dále pak firma ELOX, jež jako první navrhla použití drátové elektrody. Po druhé světové válce pokračoval v práci Lazarenkových jejich asistent B.N. Solotych, který udělal první systematickou analýzu a vytvořil teorii o zapálení oblouku pomocí studené emise elektronů mezi nejbližšími místy elektrod. Solotych napsal první obsáhlý popis EDM procesu v roce 1952. V padesátých letech bylo hlavním úkolem výzkumníků přenést EDM do výroby. V těchto fázích vývoje byly v popředí ruští vývojáři, kteří měli možnost zkoumat EDM z mnoha úhlů, což přivedlo na ruské univerzity mnoho mladých vědců, kteří pak vyvíjeli zařízení ve svých zemích. Jedním z nich byl i československý vědec Dr. Staněk, který rozvíjel EDM ve VUMA v Novém Městě nad Váhom

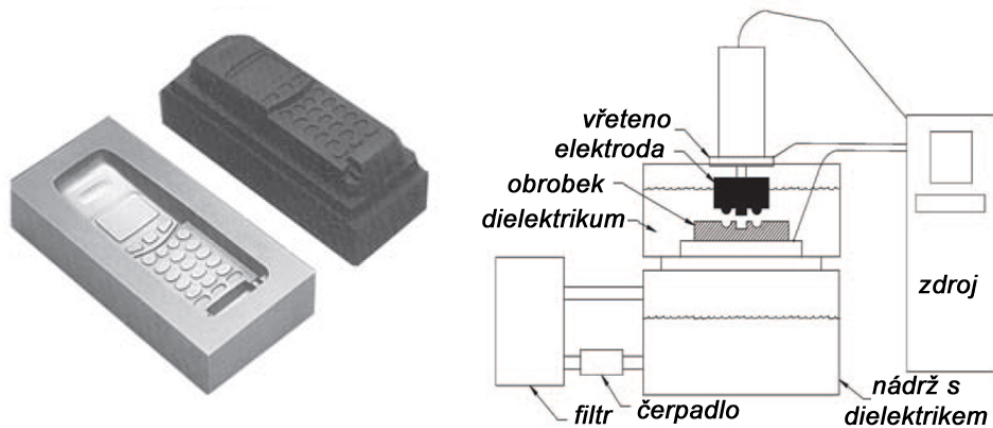
a inicioval první konferenci ISEM v Praze v roce 1960. V padesátých letech se podařilo zdokonalit generátory pulzů rozšířením z RC obvodů na RCL obvody, což zvýšilo výkon na úkor přesnosti. Byly vyvinuty lepší materiály pro elektrody a také nové kopírovací stroje, nebo stroje s řízenými osami X a Y. Na vývoji se podíleli jak západní (Elox, Agie Charmiles, Sparcatron), tak východní vědci a firmy. V šedesátých a sedmdesátých letech dvacátého století pak přišly revoluční roky EDM s příchodem tranzistoru, integrovaných obvodů a rozvojem elektroniky. V roce 1959 byl vynalezen tranzistor a v roce 1971 byl firmou Intel představen první mikroprocesor, který umožnil rozvoj řídicích systémů i servopohonů. Jelikož socialistické země neměli ihned přístup k těmto novým technologiím, byla jejich role částečně převzata Japonci (Mitsubishi, Fanuc, Seibu Denki, Sodick). Koncem sedmdesátých let se rozmohly generátory statických pulzů. Tyto tranzistorové zdroje elektrického napětí umožnily zvýšit zátěžový cyklus z 20 až na 99 procent. První použitelné drátořezné zařízení s automatickým kontrolérem prezentovala v roce 1969 firma AGIE. Toto zařízení bylo řízeno krokovými motory a bylo osazeno NC kontrolérem. V sedmdesátých letech zaznamenalo drátové řezání velký rozmach a rychle se vyvinulo do slušné rychlosti. Dvojí řízení horního a dolního konce drátu umožnilo řezání kuželů a šikmých ploch, což je důležité pro výrobu forem. V sedmdesátých a osmdesátých letech se pak dále vyvíjely řídicí systémy, vyplachovací trysky se spojily s vodítky, aby proud dielektrika směřoval co nejvíce do řezu. Vyvinul se také systém automatického navlékání drátu a výměníky nástrojů, tak aby se co nejvíce zautomatizoval výrobní proces celého obrobku. V sedmdesátých letech byly také zdokonaleny komponenty pro EDM hloubení. Jednalo se o přesné upínky, bezpečnější dielektrické kapaliny, efektivní filtrovací zařízení a předvyrobené obráběcí elektrody. Pro snížení tepelných ztrát byly vyvinuty spínané zdroje. Další na řadě bylo pak zdokonalení řídicího a CAM softwaru. Důležitým zlepšením pak bylo zavedení intenzivního snímání parametrů obráběcího procesu (snímací frekvence dosahují 10 MHz) a jejich automatické přizpůsobování. Budoucností je pak možná integrace konvenčních strojů pro hrubování a EDM strojů pro dokončovací operace.

2.4 Základní způsoby EDM

V dnešní době se v průmyslu uchytilo několik základních druhů EDM. Nejjednodušším přístupem je obrábění pomocí blokových elektrod, neboli EDM hloubení. Pro toto obrábění je nutno připravit elektrody, které mají stejný tvar jako odebíraný prostor. Tento způsob je vhodný pro hloubení děr různých tvarů, které mohou být slepé nebo průchozí. Další, dnes v průmyslu nejrozšířenější, metodou je řezání pomocí drátové elektrody. Touto metodou je možno řezat průchozí díry a tvarové kontury poměrně velkou rychlostí, jelikož je vždy odebírána pouze materiál obrysu. Poslední rozšířenou metodou je EDM vrtání, což je proces používaný pro vrtání přesných děr. Tato metoda používá vysokého tlaku dielektrické kapaliny pro rychlé odstraňování třísky.[8]

2.4.1 Obrábění blokovými elektrodami

Obrábění blokovými elektrodami (Ram EDM) je nejstarší metoda, používaná především k vrtání slepých děr, jako jsou například formy pro výlisky (obr. 2.8[8]).



Obrázek 2.8: Forma pro výlisk mobilu a nákres EDM hloubičky

EDM hloubení je realizováno postupným zapadáním nástrojové elektrody do obrobku. Elektrický proud je dodáván zdrojem. Mezera mezi nástojem a obrobkem je neustále kontrolována, aby nedošlo k doteku a tím ke zkratu zdroje. Pokud ke zkratu dojde, servomotory okamžitě způsobí znovuobnovení této mezery. Tato "jiskrová" mezera je neustále vyplňována dielektrickým olejem, nebo dielektrickou vodou. Dielektrikum má dva hlavní úkoly. Odplavuje třísku a funguje jako izolátor, což umožňuje vytvoření dostatečného proudu. Jakmile je dosažen proud, který stačí k proražení odporu dielektrika, vytvoří se zóna plazmy o teplotě 8 - 12 tisíc °C. Vlivem uvolněného tepla se tekutina ionizuje a umožní vznik jisker dostatečné intenzity, které roztaví nebo odpaří malé kousky kovu. Tento proces se odehrává při kontrolované fázi "on-time" napájecího zdroje. Ve fázi "off-time" se pak ochlazuje a odplavuje odebraný kov. 2.10[8]

Polarita zdroje může být buďto kladná, nebo záporná. Většinou bývá pravidlem, že elektrody s pozitivní polaritou se méně opotřebovávají a elektrody s negativní polaritou řezou rychleji. Pokud se elektroda opotřebovává o méně než jedno procento, mluvíme o tzv. no-wear cyklu. Tento případ nastane, pokud časy on-time jsou dlouhé a časy off-time krátké a grafitová elektroda má pozitivní

polaritu. Elektroda má pak stříbrnou barvu a může nastat i případ, že se na ní začnou objevovat nárůstky. Některé EDM hloubičky mají do svého řídicího systému zakomponovanou tzv. fuzzy logiku. Narozdíl od dvojúrovňové logiky umožňuje fuzzy logika, aby výrok byl částečně pravdivý. Pomocí fuzzy logiky mohou stroje sledovat parametry obráběcího procesu a neustále je upravovat. Nepříjemností při EDM obrábění je emise toxických plynů. Karbidy boru, boridy titanu a berylium produkují obzvláště toxické plyny a je proto při jejich obrábění nutno používat obzvláště dobrou ventilaci.

V mnoha případech je EDM hloubení nejefektivnější metodou obrábění. Pokud jsou na obrobku díry s ostrými rohy nebo velmi malé detaily, pak je vhodné volit EDM hloubení. Jelikož se jedná o bezkontaktní metodu s malým tlakem dielektrika, je možno bez problémů vyrábět tenké přičky. Je možno dodržet jemné tolerance až do 0,0025 mm a pokud je použit správný proud, je možno dosahovat velmi jemných drsností. U EDM hloubení nezáleží na tvrdosti materiálu, je proto možno vyrábět závitů nebo např. vnitřní šikmé ozubení do tvrdých materiálů. Dále se EDM používá pro hloubení drážek pro pera, vnitřního drážkování a vnitřního ozubení pro slepé otvory. Průchozí otvory je často výhodnější vyrábět pomocí drátu. Dále je možno provádět obrábění mikroskopicky malých obrobků a detailů dosahujících jen několika μm . Mikroobrábění se používá např. pro výrobu forem elektronických zařízení, jako jsou inkoustové tiskárny nebo dávkovače léčiv.

Důležitou součástí EDM hloubení je příprava elektrod. Mezi faktory, které ovlivňují správnou volbu obráběcí elektrody, patří cena elektrody, požadovaná drsnost obrobku, rychlost opotřebení elektrody, počet elektrod nutných k výrobě součástí a eventuálně i počet děr nutných k vyplachování. Elektrody můžeme rozdělit podle materiálu na grafitové a kovové. Nejvíce používané materiály elektrod jsou mosaz, měď, wolfram, zinek a grafit.

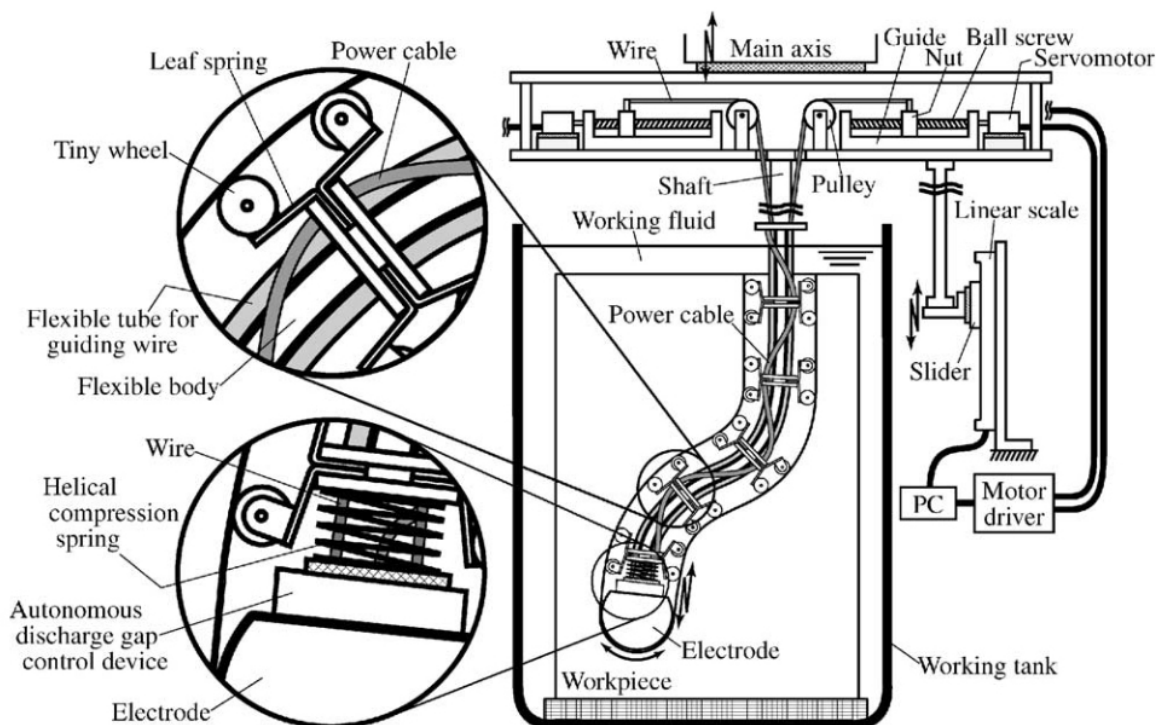
Pro vrtání děr se spíše používá dutých elektrod s vysokým tlakem, pro chladičí otvory a jiné zahnuté díry je tento přístup ovšem nepoužitelný. V článku [10] je použito zajímavého mechanismu. Na konci pohyblivého ramene je kulová elektroda, která je tímto ramenem polohována a je tím pádem možné hloubit zahlé díry. 2.9[10] Tento mechanismus je ovládán dvojicí lanek, které způsobují zahýbání nástroje a umožňují tak výrobu zahnutých děr. Další podobné zařízení popisuje článek [11]. Díky bezkontaktní povaze EDM je možno takovátto zařízení provádět bez ohledu na přenos řezných sil.

Nové přístupy pro EDM hloubení

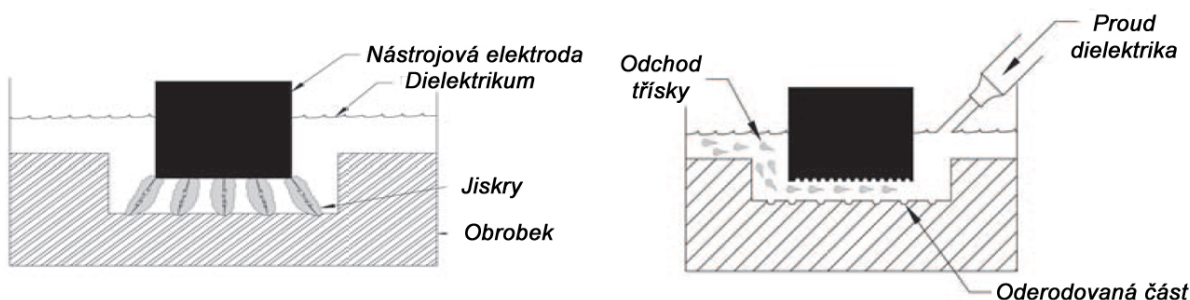
Odvádění třísek je základním problémem pro EDM hloubení, výzkumníci se tedy snaží různými způsoby vytvořit nové typy elektrod, které budou svým vnitřním uspořádáním umožňovat přísun dielektrika k místu řezu. Dva nové přístupy používají svazek trubiček, který je sestaven do tvaru elektrody, nebo porézní elektrodu vytvořenou sesintrováním měděných kuliček.

Sestavení trubiček je velmi jednoduchá metoda, kdy se vezmou trubičky používané pro vrtání a sestaví se z nich výsledný tvar. Tato metoda je skvělá svou jednoduchostí a přijatelnou cenou. Metoda je popsána v článcích [39][40].

Na obrázku 2.11[40] vidíme porovnání klasické elektrody s elektrodou sestavenou z měděných trubiček. Elektroda může být sestavena z trubiček kruhového nebo šestiúhelníkového průřezu. Výhodou takové elektrody je obrovský počet otvorů pro vyplachování, což zvyšuje produktivitu výroby u hrubování. A výrazně



Obrázek 2.9: Mechanismus pro hloubení zahnutých děr

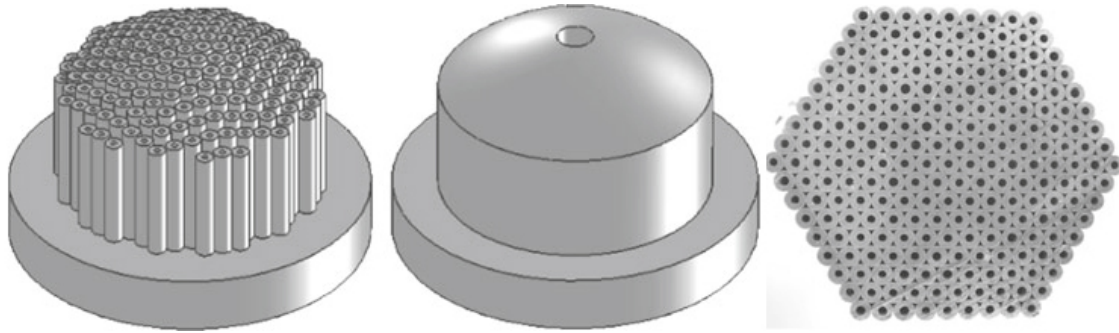


Obrázek 2.10: On-time a off-time obráběcího procesu

také snižuje cenu výroby elektrody, jelikož se připravuje ze sériově vyráběných trubiček. Nevýhodou je nutnost následného dofinišování, protože elektroda nemá přesný výsledný požadovaný tvar. Možností ovšem je připravit elektrodu již ve výsledném tvaru následným doobrobením jejího povrchu. Při použití této elektrody dochází k výraznému zlepšení vyplachování, a tím pádem i zrychlení výroby.

Studie [40] se zaměřuje na úběr materiálu a rozptřetí nečistot po obrábění. Li nabízí porovnání použití klasické kulové elektrody s jednou dírou a elektrody seskládané z trubiček (obr. 2.11[40]). Zaměřuje se na následující otázky: Jaké jsou specifické charakteristiky EDM s vyplachováním pomocí mnoha děr na skládané elektrodě? Jak ovlivňuje struktura elektrody pole průtoku dielektrika? A jak hlavní parametry vyplachování ovlivňují výkon EDM se skládanou elektrodou?

Složitější na výrobu je sintrovaná elektroda z měděných kuliček.[41] Záměrem autorů je využít toho, že vyplachování probíhá na všech stranách elektrody a mělo by tím pádem být účinnější. Na obrázku 2.12[41] je zobrazena sesintrovaná elektroda a forma použitá pro její výrobu.



Obrázek 2.11: Elektroda seskládaná z trubiček



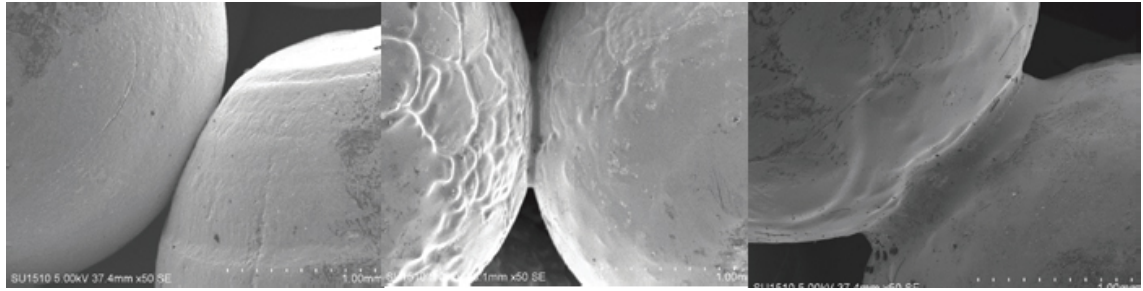
Obrázek 2.12: Forma pro výrobu a vlastní sesintrovaná elektroda

Průměr zobrazené elektrody je 30 mm a je vyrobená z kuliček o průměru 3 mm. Vyrobená elektroda by měla mít dva základní parametry. Měděné kuličky musí být dostatečně spojeny, zároveň ovšem musí být zachována síť cestiček mezi nimi, aby mohlo dielektrikum volně protékat. Při výrobě je tedy nutné velmi pečlivě dbát na teplotu při spékání a čas expozice. I když EDM je bezkontaktní proces, síly působící na elektrodu při vyplachování budou dosti značné a pokud by tedy byla elektroda nedostatečně spojena, mohla by se rozpadnout. Pokud by ovšem byla elektroda spékána příliš dlouho, cestičky mezi kuličkami by se mohly uzavřít nebo ztenčit pod únosnou mez. Jiang a jeho spolupracovníci [41] tedy určili optimální parametry pro spékání takovéto elektrody. Vhodná teplota pro spékání byla okolo 1075 °C a vhodný čas spékání byl 120 minut. Spečená elektroda pod elektronovým mikroskopem je zobrazena na obrázku 2.13[41]. Na obrázku nejvíce vlevo vidíme, že nedošlo ke slití kuliček. Uprostřed vidíme dostatečné slití tak, aby elektroda držela pohromadě a dostatečně velké kanálky pro průtok kapaliny. Na obrázku nejvíce vpravo vidíme již velké slití kuliček, které je ovšem stále dostačující pro průtok kapaliny.

Jiang et al. dále testovali, zda-li nedojde k odpadávání kuliček při vyplachování a následném obráběcím procesu. Ukázalo se, že elektroda spečená při 1078° C nevykazovala žádné odpadávání kuliček a to i po dosti náročném obrábění, kdy byla již elektroda značně opotřebena.

Po ověření funkčnosti elektrody dále vytvořili elektrodu takového tvaru, aby simulovali obrábění v hluboké díře. A porovnávali výsledky obrábění.

Výsledky obrábění vidíme na obr. 2.14[41] vlevo. Úplně vlevo je výsledek při



Obrázek 2.13: Sesintrované elektrody zleva při 1050°C, 1070°C, 1078°C



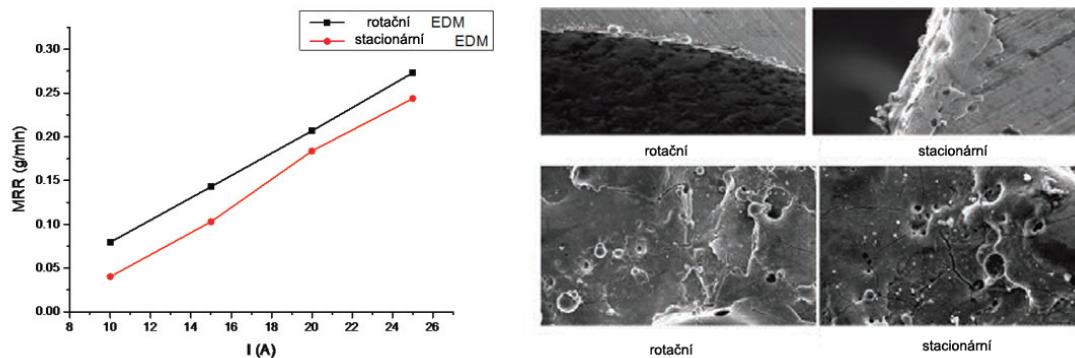
Obrázek 2.14: Výsledky hrubování porézni a plnou elektrodou a fotografie průběhu obrábění

použití porézni elektrody, na obrázku vidíme okopírovaný tvar této elektrody, který není tak hladký jako při hrubování plnou elektrodou (na obrázku více vpravo). Čas obrábění při stejných parametrech byl ovšem výrazně menší. Čas potřebný pro hrubování se u porézni elektrody snížil z 57 na 40 minut. Následně dokončování už bylo u obou případů provedeno plnou elektrodou, toto dokončování trvalo u porézni elektrody o 3 minuty déle. Celkově se tedy strojní čas zkrátil o 14 minut z celkových 72 minut. Jedná se tedy o dvaceti procentní zkrácení strojního času, což je velmi pěkný výsledek. Velmi pěkný je i pohled na obrázek 2.14[41] vpravo, na němž vidíme elektrodu zahalenou v mlze dielektrika při obrábění porézni elektrodou.

Vliv rotace na obráběcí proces

Pro elektrody, které mají rotačně symetrický tvar se s výhodou používá rotace elektrody kolem své osy. Rotace nástroje má dva základní důvody, tím prvním je vyplachování převážně u tenkých a dlouhých elektrod. Rotace způsobuje víření dielektrické kapaliny a její pumpování z místa řezu společně s nečistotami. Druhým důvodem je lepší výsledná povrchová drsnost, jelikož při rotaci se do jisté míry obnovuje profil elektrody a nedochází k tak velkému opotřebení na jednom místě. Zajímavé porovnání obrábění s rotací a bez rotace nabízí článek[43].

Na obrázku 2.15[43] vlevo vidíme porovnání z tohoto článku. Dwivedi et al. prováděli experiment hloubení otvoru o průměru 10 mm pro čtyři různé hodnoty proudu 10, 15, 20 a 25 ampér. Na obrázku vidíme nárůst úběru materiálu při použití rotující elektrody. Toto zvýšení je způsobeno vyplachováním nečistot z místa řezu. Článek se dále zabýval povrchovými vlastnostmi obrobku. Obrázky povrchu obrobku vidíme na obrázku 2.15[43] vpravo. Jiang et al. zkoumali tloušť-



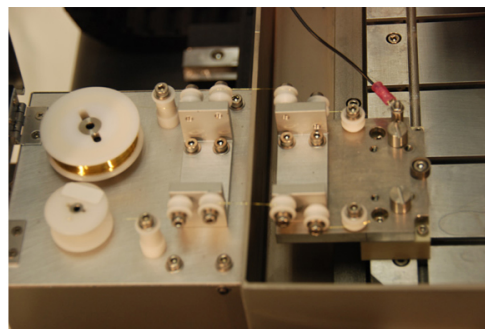
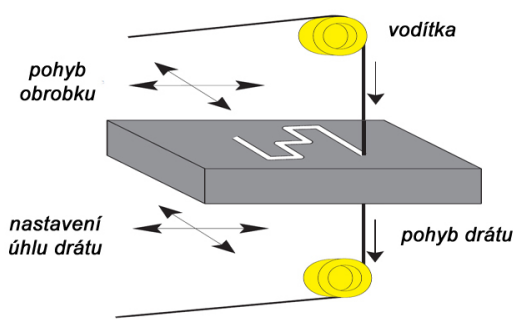
Obrázek 2.15: Porovnání použití rotační a stacionární EDM elektrody

ku znovuodlité vrstvy na povrchu obrobku a výskyt mikrotrhlin. Došli k výsledku, že u rotující elektrody se tloušťka znovuodlité vrstvy pohybuje mezi 2 a 25 mikrometry, zatímco u stacionární elektrody je tato hodnota skoro dvojnásobná. Mikrotrhliny vznikají na povrchu znovuodlité vrstvy při chladnutí materiálu. Na obrázku je vidět, že při použití rotující elektrody vzniklo výrazně méně mikrotrhlin. Drsnost povrchu u stacionární elektrody byla cca 7,02 mikrometru a u rotující elektrody byla cca 6,15 mikrometru. Z těchto závěrů vyplývá, že tam, kde je to možné, je vždy vhodné používat rotující elektrodu.

2.4.2 Obrábění drátovými elektrodami

Dnes nejrozšířenějším způsobem EDM obrábění je drátové řezání (obr. 2.16[60]). Svou ekonomičností předčí při některých aplikacích i klasické obrábění, jelikož stačí obrobek pouze konturu obrobku, a ne celý prostor třísek. Drátové řezání je EDM obrábění, kde nástrojem je odvíjející se drát. Tento drát je napnut mezi přesnými vodítky. Vodítka jsou z velmi pevného materiálu jako je například keramika nebo diamant, aby vydržela otěr způsobovaný procházením drátu. Výhoda drátu spočívá v tom, že drát se neustále obnovuje, čímž nástroj zůstává stále na stejném místě a drátořez vyrábí stále stejné výrobky. U konvenčního obrábění se nástroj musí neustále kontrolovat, či přebroušovat, to u drátořezu odpadá. Drátořezy mají do vodítek také zakomponovaný oplachovací systém, pro lepší odvod třísek a chlazení roztaveného kovu. Vodítka je možno polohovat a měnit tím úhel řezu, což je vhodné například pro řezání kuželů náliček licích forem. Pokud je stroj vybaven horním i dolním polohovatelným vodítkem je možno řezat horní profil jiný než dolní profil.

Drátová elektroda se dnes také používá pro broušení, nebo eventuelně i soustružení součástí. V těchto případech se nevyužívá celé délky drátu mezi vodítky, ale jedná se spíše o bodový styk.[3] Drát je v místě řezu podporován pevným vodítkem, které je většinou kruhové se žlábkem jen o málo větším, než je průměr drátu. Drát přesahuje okraje vodítka a asi dvěma třetinami svého obvodu tak může erodovat obrobek. Tento způsob (WEDG) není tak rychlý jako klasické drátové řezání, je však výrazně přesnější. Drát je držen vodítkem a nemůže vibrovat. Proto se tento způsob používá pro mikroobrábění, kde je zapotřebí zvýšené přesnosti ve vedení drátu (obr. 2.16[60]). Tento způsob je důkladně popsán v článku [17]. V článku [16] je rozebírána povrchová drsnost mikroelektrod vyrábě-



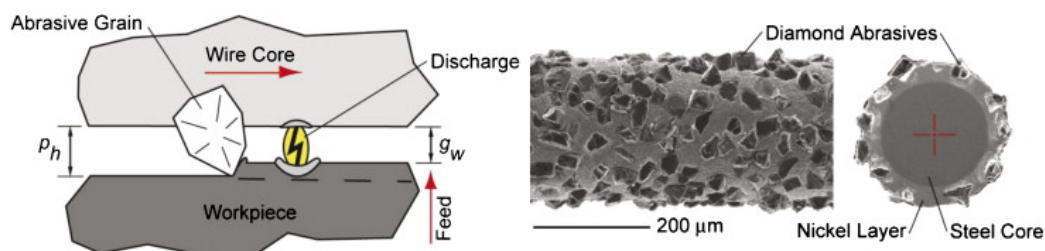
Obrázek 2.16: Drátové řezání a příprava elektrod pro mikroEDM

běných způsobem WEDG. Masuzawa et al. zde při výrobě válce o průměru 100 um dosáhli drsnosti 35 nm Ra při použití broušení pomocí drátu. Tato drsnost se dále zlepšila při použití následného lapování na 18 nm Ra. V článku [18] je představen soustruh pro mikroobrábění. Speciální nástroje jsou nejdřív broušeny pomocí WEDG, a poté použity k soustružení. Tímto způsobem je pak možno vytvořit details, jako je např. vnitřní drážka pro saegrovkou, nebo i kulové tvary v mikrorozměrech.

Významnou součástí tohoto procesu je tedy drát. Běžně používané průměry drátů se pohybují v rozmezí 100 um - 1 mm. Existují i dráty menší nebo větší, ale ty už nejsou tak běžné. Základním požadavkem pro výběr průměru drátu je množství odebíraného materiálu, požadovaný nejmenší radius na součásti a také vlastnosti povrchových vrstev součásti. Nepříjemností při řezání, která způsobuje výrazné zpomalení obrábění, je praskání drátu. Proto je nutné při volbě obráběcích podmínek zohlednit materiál a velikost drátu, popřípadě povlakování. Povlakované dráty mají menší tendenci k tomu se trhat, protože trhlinka musí přejít přechod materiálů. Napětím v drátu se zabývá článek [12]. V tomto článku zjistíme, že čím více se bude drát ohýbat a čím větší na něm budou krátery, neboli čím větší bude energie uvolněná při obrábění, tím větší bude také pravděpodobnost, že se drát přetrhne.

Drátové řezání je také schopno nahradit, a v mnoha případech předčí, protahování. Článek [13] hovoří o porovnání několika materiálů drátu při výrobě kontury vánočního stroměčku do inkelové oceli používané v letectví. V tomto článku byly porovnány tři dráty, dva s jádrem z mědi a jeden celomosazný drát. Nejlepší výsledky dosáhli Klocke et al. s celomosazným drátem a zjistili, že tato metoda měla dostatečnou drsnost nižší než 0,8 um Ra a přesnost lepší než ± 5 um. Povlakované elektrody na druhou stranu řezaly o 33 procent rychleji než nepovlakované. Jelikož při výrobě leteckých dílů je zapotřebí co možná nejlepší integrita povrchu, zhotovili tito výzkumníci systém pro in-time sledování parametrů řezu. [14] Pomocí tohoto systému se jim podařilo zjistit tvarové nepřesnosti již během vlastní výroby, což je velice důležité pro jejich snadné odstraňování. Řezání se stabilními parametry vytváří kvalitní povrch, na němž je prakticky nulová znovunality vrstva kovu. Tato znovunality vrstva je právě zdrojem povrchové křehkosti, která je pro namáhané součásti používané v letectví nepřijatelná. V článku [15] je pro odstraňování křehké povrchové vrstvy zvolen zajímavý postup. Jde o hybridní způsob používající drát, na jehož povrchu jsou naneseny abrazivní částice. 2.17[15] Drát je tím pádem schopen zároveň vyjiskřovat a také obrušo-

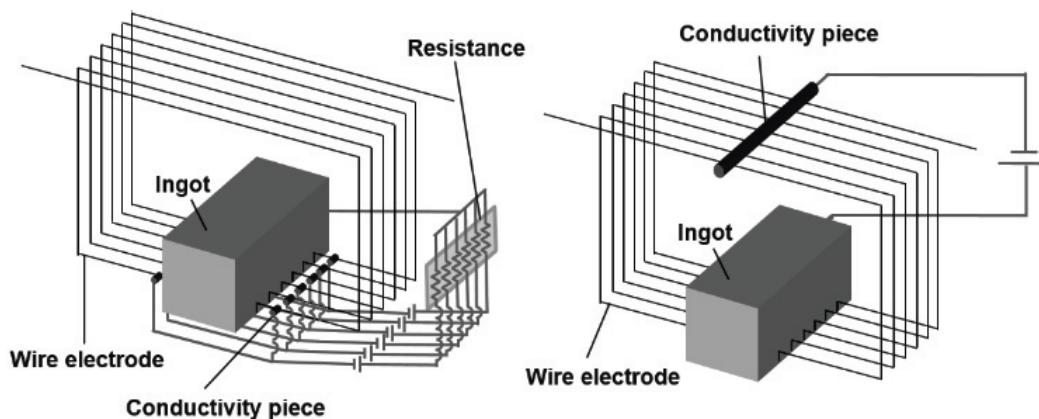
vat obroběný povrch. Autorům článku se podařilo téměř odstranit znovuodlitou vrstvou.



Obrázek 2.17: Drát pokrytý abrazivní vrstvou

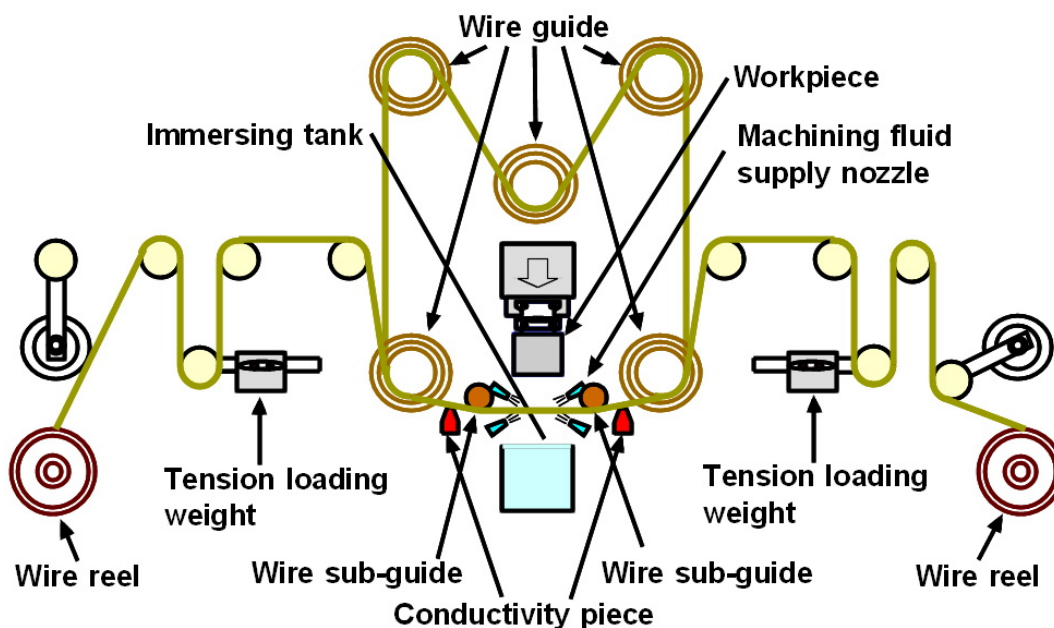
Použití vícenásobného drátu

Poptávka po plátkách z monokrystalů křemíku vzrostla s nástupem elektroniky prakticky do všech oborů lidské činnosti. Důležitá je tedy efektivnost výroby těchto plátek a co možná nejmenší odpad z drahého polotovaru. Jedním ze způsobu, jak efektivně vyrábět tenké plátky z monokrystalických kovů, je použití vícenásobného drátu. Články [56] [55] [57] popisují tuto metodu a také zařízení k řezání několika drátů současně (obr. 2.18[56]).



Obrázek 2.18: Mnohonásobný drát

Schéma zařízení, které pro tento účel Okamoto et al. vyvinuli, je zobrazeno na obr. 2.19[56]. Drát je spirálově navinut na vodítka a několikrát obtočen. Drát je do místa řezu přiváděn několikrát, vždy s opačným směrem odvíjení. Křemíkový ingot je poté řezán pomocí pohybu nahoru / dolů. Kvůli stabilizaci drátu se zde nachází ještě pomocná vodítka v těsné blízkosti vstupu drátu do obrobku. V prvním nastavení byla rozteč drátů 1,1 mm a byl používán molybdenový drát o průměru 0,18 mm. Počet drátů byl v prvním nastavení omezen na tři, protože Okamoto et al. měli k dispozici zdroj, který byl schopen naráz generovat maximálně tři pulzy. Polarita byla v tomto experimentu zvolena tak, že drátová elektroda byla záporná. Použitý zdroj byl speciálně vyvinut pro tuto aplikaci. Tento zdroj je schopen dodávat delší nižší pulzy ve srovnání s běžně používaným zdrojem. Zdroj měl dvě pracovní napětí. Vyšší napětí určené pro zapálení jiskry bylo 300 V a nižší napětí pro udržování napětí při čase Ton bylo 100-120 V.



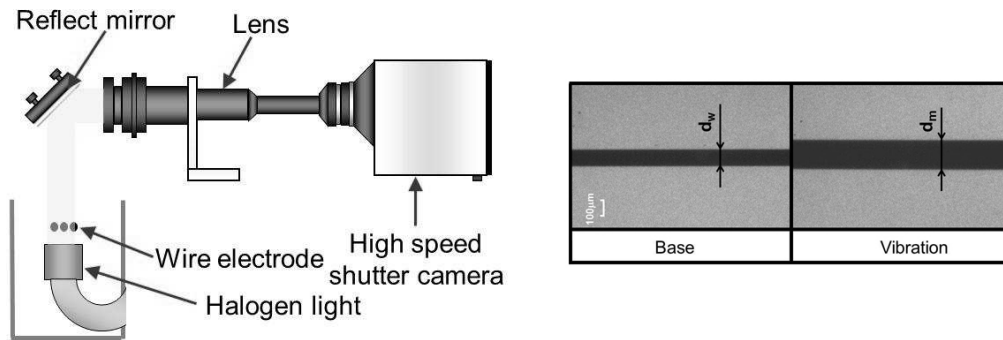
Obrázek 2.19: Zařízení pro řezání mnohonásobným drátem

Článek [55] se dále zabýval nastavením zdroje a převážně zkoumáním meze-ry vzniklé při obrábění. U drahého monokrystalického materiálu je totiž velmi důležité, aby odpad byl co nejmenší. V článku byly použity dva typy materiálů. Prvním z nich byl monokrystal křemíku pro plošné spoje s odporem $0,01 \Omega/\text{cm}$ a druhým byl monokrystal křemíku pro solární články s odporem $2-3 \Omega/\text{cm}$.

Jelikož je v tomto nastavení použito několik těsně vedle sebe řezajících drátů, nebylo možné použít pro každý drát samostatnou trysku pro vyplachování nečistot. Okamoto et al. porovnávali dva způsoby. První způsob používal vyplachování pomocí trysky a druhý pouze zasouvání elektrody do obrobku potopené do dielektrika. Způsob s potápěním do dielektrika vykazoval lepší výsledky díky lepší stabilitě řezu. U vyplachování pomocí trysky docházelo k vibrování drátu kvůli proudění kapaliny a nestabilnímu řezu. Okamoto et al. dále vyhodnocovali závislost kvality řezu na rychlosti odvíjení drátu. Došli k závěru, že rychlost úběru materiálu se zvyšuje a šířka odpadové mezery se snižuje s rostoucí rychlostí drátu. Dále pak zjistili, že šířka odpadové mezery a hloubka mikrotrhlin se snižuje při snížení měrného odporu dielektrika.

Ve studii [57] se Okamoto et al. dále zabývali vlivem vibrací a napětí v drátu na kvalitu odpadové mezery. Na obr. 2.20[57] vidíme zařízení pro sledování vibrací. Vibrace byly sledovány pomocí vysokorychlostní kamery. Drát byl pozorován bez zapnutého EDM (naprázdno). Drát byl osvětlen halogenovou lampou a jeho stín byl poté zachycen vysokorychlostní kamerou. Amplituda kmitání byla poté vypočtena z šířky drátu a šířky vrženého stínu.

V článku [57] byly použity tři typy povlakovaného ocelového drátu s povlakem z mosazi. Povlakovaný drát nebyl kruhového průřezu, ale Okamoto et al. používali postupně průřez s třemi různými poměry šířky a výšky. Poměry stran byly 1:1.6, 1:2.5 a 1:2.0. Okamoto et al. poté vyhodnocovali vliv poměru šířky a výšky na výsledné vibrace, a tím i stabilitu řezu. Došli k závěru, že nejstabilnější, co se týče vibrací, byl poměr 1:2.0 .



Obrázek 2.20: Zařízení pro měření vibrací v drátu

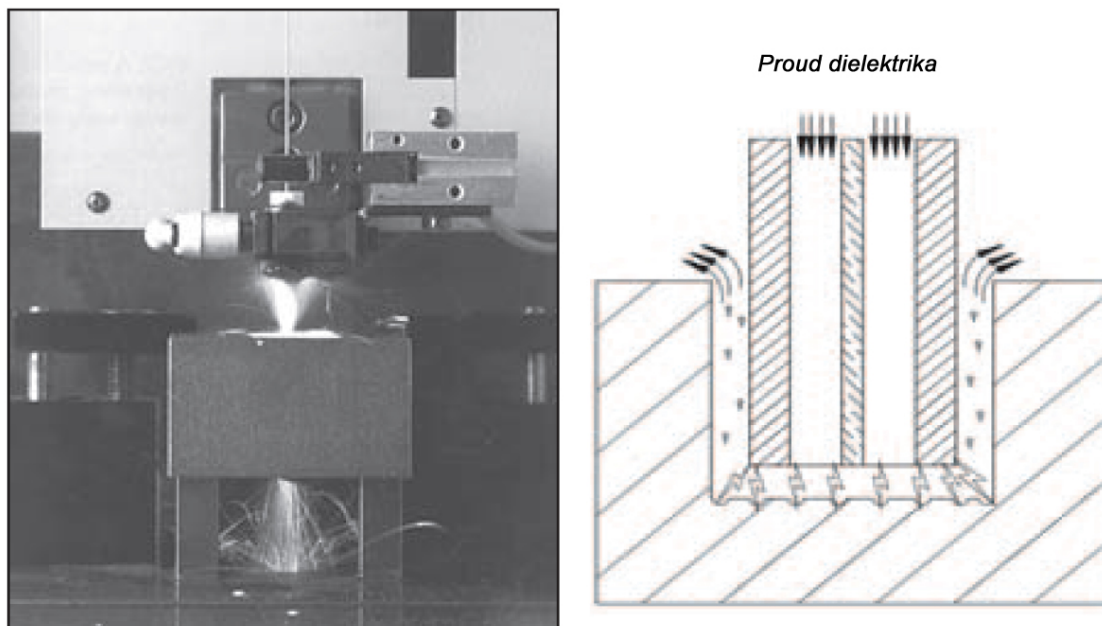
U ingotu kruhového průřezu se při větším zjetí do obrobku zvyšuje i objem odebraného materiálu a délka obrábění. Z tohoto důvodu se také mění šířka odebrané mezery. Pokud by tedy nastavení zdroje a přísunu drátu zůstalo stejné, při řezání by se nevytvořili planoparalelní plochy, ale vzniklé polovodičové desky by byly prohlé. Z tohoto důvodu je nutné vstupní parametry optimalizovat a během obrábění průběžně měnit.[56] Okamoto et al. došli k závěru, že s rozšiřující se šířkou obrobku je nutné snižovat rychlost odvíjení drátu. Poté je možné při neustálém přesném řízení rychlosti dosáhnout velmi přesně ploché výrobky.

2.4.3 Rychlé vrtání děr

Dnes velice používanou metodou je také EDM vrtání děr.2.21[8] Jedná se o speciální způsob EDM hloubení podpořeného rapidním vhnáním dielektrika, čímž jsou odváděny zbytky po obrábění. V dnešní době dosahuje rychlé EDM vrtání rychlostí okolo 50 mm za minutu i více. Vrtání může probíhat v jakémkoliv vodivém materiálu, bez ohledu na jeho tvrdost. Průmyslové stroje jsou pak vybaveny výměníky nástrojů, pro rychlou výměnu elektrod. Rychlé EDM vrtání se používá pro výrobu děr do lopatek turbín, vstřikovačů paliva, tvrzených součástí a také k výrobě startovních otvorů pro drátové řezání. EDM vrtání používá stejný princip jako EDM hloubení, mezi nástrojem a obrobkem je zažehávána jiskra, která oderodovává materiál. Servořízení udržuje mezeru mezi obrobkem a nástrojem. Pokud se nástroj dotkne obrobku, servořízení oddálí nástroj a EDM obrábění může pokračovat.

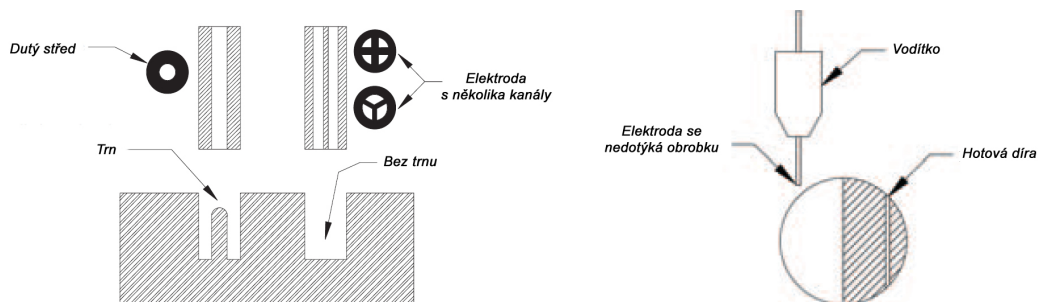
Dielektrikum vyplachuje kulové úlomky oderodované z povrchu nástroje a obrobku. Dále pak působí jako izolační médium mezi elektrodou a obrobkem, tak aby se mohla naakumulovat dostatečná energie pro výboj. Po oderodování materiálu jiskrou zajistí servořízení správnou mezeru pro další obrábění. Jako dielektrikum se pro EDM vrtání preferuje deionizovaná voda, někteří výrobci však doporučují přidání rezných aditiv. Pro docílení rychlého vrtání je velice důležité vysokotlaké vyplachování. Tlak dielektrika je až desetkrát vyšší, než u hloubení. Dielektrikum by mělo být co možná nejčistší, někteří výrobci ho proto používají pouze jednou.

Při vrtání se kulatá, dutá elektroda otáčí okolo své osy a jejím středem je pumpována dielektrická tekutina. Jelikož jsou obrobené částičky vodivé, je nutno je rychle odstranit, aby nedocházelo ke zkratům a neobráběli se boky díry. Otáčení elektrody pomáhá při udržování elektrody blízko požadovaného středu



Obrázek 2.21: Rychlé EDM vrtání

otáčení a pro rozložení opotřebení. Tlak uvnitř elektrody způsobuje její zpevnění. Elektroda je také vedena vodítkem, což s pomocí tlaku umožňuje vrtat díry o velikosti až 500 krát průměr nástroje. Vysoký tlak vyplachování také udržuje teplotu elektrody a obrobku. Při řezání s vysokým tlakem je i drsnost obrobku lepší. Problémem při vrtání s většími průměry válcových elektrod je trn vznikající uprostřed. Při obrábění totiž střed elektrody neodebírá žádný materiál. Trn může pak způsobovat zkrat a zpomalovat tak obrábění. Tento problém se tedy řeší tak, že se používají elektrody rozdělené na několik kanálů, čímž již střed není dutý a i čelo elektrody odebírá materiál. 2.22[8]



Obrázek 2.22: Rychlé EDM vrtání

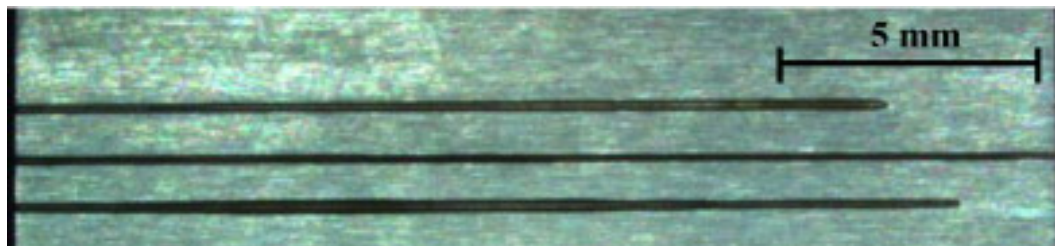
Vodítka udržuje elektrodu na místě a zamezuje jejímu klepání. Tolerance při vrtání se pohybuje okolo 0.025 do 0.05 mm. Jelikož vodítka se nachází nad obrobkem může dielektrická kapalina odcházet z vyvrtané díry. Servomotory jsou řízeny mikroprocesorem, který řídí napětí mezi obrobkem a nástrojem. Pokud je napětí příliš velké, oddálí elektrodu od obrobku, a naopak. Jelikož dochází k rychlému odvádění třísek, není zapotřebí vyplachování pomocí servoosy, čímž se podstatně zrychluje obrábění.

Mezi výhody EDM vrtání patří bezproblémové vrtání šikmých ploch.2.22[8]

Studie [59] rozebírá šikmé vrtání děr při aplikacích v leteckém průmyslu. Jelikož se elektroda nedotýká obrobku, nedochází ani k ohýbání nástroje. Při začátku vrtání je ale nutné snížit pracovní tlak, aby proud kapaliny řez nevychýlil. Další výhodou rychlého EDM vrtání je, že odpadá nutnost odstraňování otřepů. Tento proces může u klasického vrtání trvat i déle, než samotné vrtání díry. Vrtáky se také nemohou zlomit ve vyvrtvané díře, protože na ně nepůsobí žádný moment. Díry vyvrtané pomocí EDM jsou výrazně přímější, než u klasického vrtání.

Nevýhodou EDM vrtání je nemožnost obrábět nevodivé materiály. Opotřebení je těžko kontrolovatelné a může dosáhnout i větší délky, než je délka vrtané díry. Proto je velmi těžké vrtat slepé díry. Opotřebením elektrod se zabývá článek [21]. Autoři zde vytvořili model pro předvídání opotřebení při EDM vrtání. Při obrábění se nejdříve vytvoří na spodku elektrody kužel, který pak na spodku elektrody zůstává během celého procesu.

Díry vyvrtané rychlým EDM vrtáním jsou mírně konické. To je způsobeno sekundárními výboji probíhajícími na bocích tyčových elektrod. Pro odstranění této vady je v článku [22] zvolen zajímavý přístup. Tyčové elektrody jsou po stranách povlakovány nevodivým materiálem, který zamezuje sekundárním výbojům. Pomocí těchto elektrod se jim při vrtání mikroděr podařilo zmenšit úběr elektrody přibližně na polovinu, a tím pádem dosáhli lepšího poměru délky a průměru díry. Pomocí těchto elektrod pak dosáhli poměru délka/průměr 40 - 60. Nástroje povlakované materiálem Parylene C pak vykazovaly nejlepší drsnost obrobeného povrchu a nejlepší přímost vyhloubených děr, je to nejspíše způsobeno vyšším odporem tohoto materiálu, než u jiných zkoumaných povlaků. Podařilo se jim vrtat díry o velikosti 0,18 mm do hloubky 10 mm, pomocí elektrody délky 30 mm za 30 minut. Tato metoda prakticky odstraní konický profil díry ($\approx 0,5^\circ$). Pro tuto metodu je velice důležitá rozměrová stálost povrchové vrstvy, protože pokud by povlak byl moc tlustý, eroze by mohla zaniknout. Po další optimalizaci obráběcího procesu se Ferraris et al. dostali na poměr délka / průměr 126, při použití Parylenu C a délce obrábění 1 h. 2.23[22]



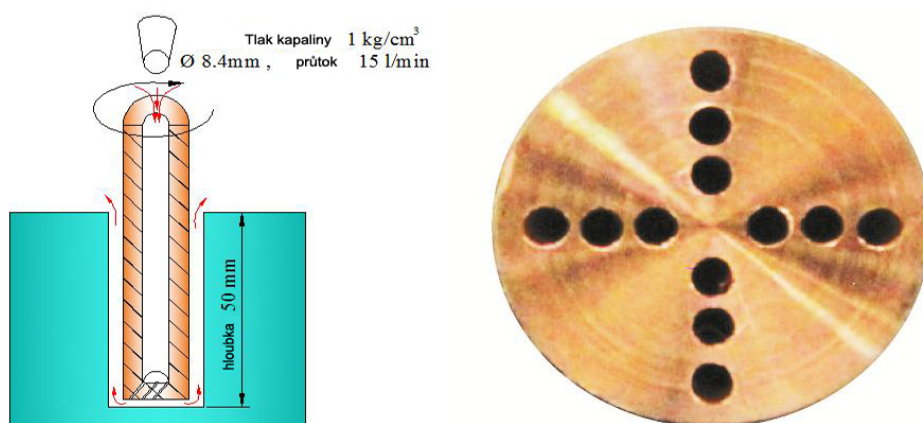
Obrázek 2.23: Mikrodíry vyvrtané pomocí povlakovaných elektrod

Nové přístupy pro rychlé vrtání děr

Rychlé vrtání děr je jedním z mála způsobů jak vytvářet dlouhé tenké díry. EDM vrtání navíc umožňuje vrtání do jinak těžko obrobitelných materiálů. Proto se těší stále většímu zájmu vědeckých pracovníků, kteří zkoušejí všechny možné způsoby, jak dále zvýšit jeho produktivitu.

Jedním ze způsobů je použití elektrody s více dírami, jako je posáno v článku [42]. Produktivita EDM vrtání klesá hlavně, když je elektroda ponořena hlouběji do obrobku. Elektroda s více dírami (obr. 2.24[42]) umožňuje lepší odstraňování

nečistot z obráběcí mezery, což zvyšuje stabilitu a rychlost obrábění. Experimenty



Obrázek 2.24: Vrtací elektroda s mnoha dírami

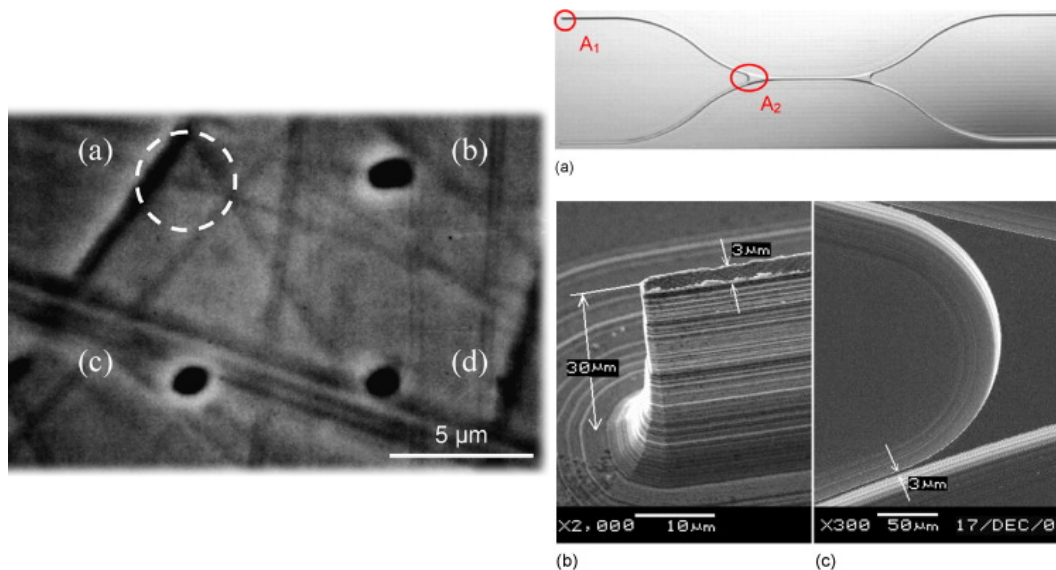
[42] byly prováděny v hloubce 50 mm . Jako elektroda byl použit dutý válec s vnějším průměrem 12 mm a vnitřním průměrem 8,4 mm. Na spodní části elektrody byly vyvrtány otvory o průměru 1 mm. Tato elektroda byla pak upnuta do vřetena stroje a byla použita k obrábění s rotací okolo své osy. Chuvaree pak porovnávali úběr materiálu, obráběcí čas a povrchovou drsnost při použití této metody vůči standartní metodě vyplachování. Dosažené výsledky byly zvýšení úběru materiálu o 35,28 % při zvýšení drsnosti o 58.04%. Strojní čas nutný pro dosažení stejné hloubky 50 mm se snížil o 26.10% .

2.4.4 Mikroobrábění

Na významu získává použití EDM k výrobě miniaturních detailů dosahujících rozměrů v desítkách až jednotkách mikrometrů. V některých případech je možno dosahovat i podmikronových velikostí. Mikroobrábění je prováděno buďto přímo pomocí EDM, nebo se EDM použije k výrobě rotujících nástrojů. V článku [19] se japonským výzkumníkům podařilo vyrobit podmikronové díry. Přesnost těchto děr není příliš dobrá, ovšem jejich velikost je úctyhodná. Tito výzkumníci použili k vrtání děr wolframové elektrody, které si předtím připravili pomocí elektrochemického obrábění. Velmi malé objekty se podařilo vyrobit také daleko lépe vybavenému kolektivu opět z Japonska. [20] Cheng et al. pro tento účel postavili velmi přesný šestiosý drátořezný stroj, jehož pomocí mohli připravit nástroje z PCD. Tyto nástroje pak použili k mikrofrézování zmíněných detailů. Pomocí těchto nástrojů se jim podařilo dosáhnout plochého dna s nanometrovou drsností. Při úběru třísky 0,1 - 0,3um. Rychlost vřetene dosahovala 120 000 otáček za minutu. Pomocí této metody se jim podařilo vytvořit miniaturní žebra o šířce cca 3 um a výšce 30 um. Jejich zařízení je tedy schopno produktivně vytvářet detaily mikronových a submikronových rozměrů. 2.25[20]

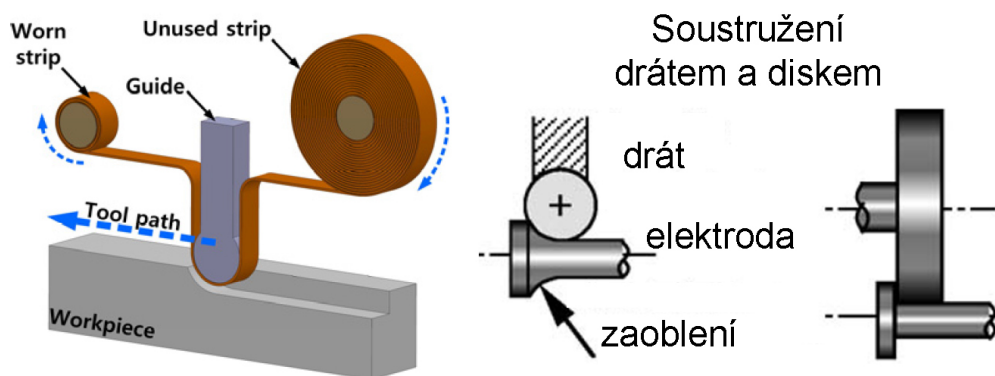
2.4.5 Méně rozšířené metody

V minulosti i v současnosti zkoušeli výzkumníci více možných způsobů EDM obrábění. Jedná se o způsoby, které se snaží jinak obnovovat čerstvou elektrodu, než odvíjením drátu. Jednou ze zkoušených metod je použití rotujícího disku.[18]



Obrázek 2.25: Submikronové díry, miniaturní žebra

Tato metoda používá rotující nabroušený kotouč se snahou obnovování elektrody. Tento disk má dva základní problémy. Jelikož se jedná o otáčející se disk, je nutno zajistit co nejmenší toleranci při valivém otáčení. Disk tedy vykazuje nenulové házení. Druhý problém je ten, že po otočení jedné obrátky se již nejedná o zbrusu novou elektrodu, ale jsou na ní již známky opotřebení. I přes tyto problémy je na rozdíl od blokové elektrody, při použití disku, výrazně delší dráha aktivní plochy elektrody a stálejší opotřebení. 2.26[23]

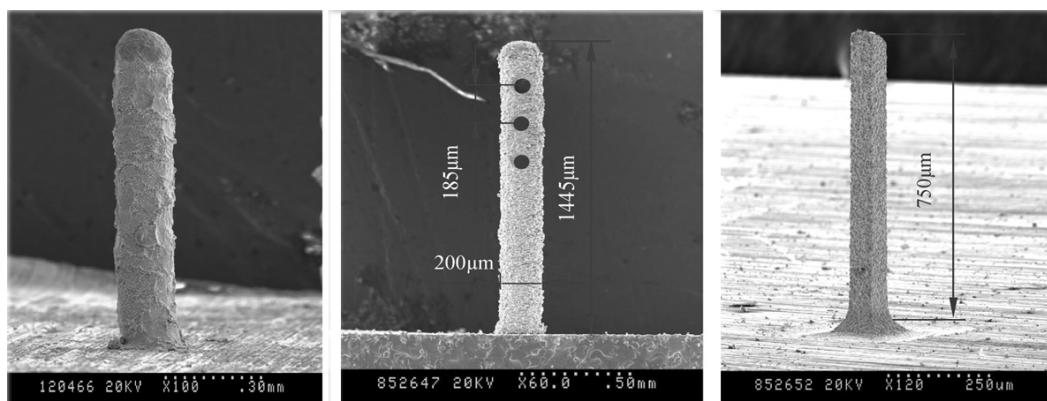


Obrázek 2.26: Použití pásku, vodička pro drát a disku pro EDM

Další možností pro zvětšení aktivní plochy nástroje je použití průběžného pásku. Tento přístup [23][24][25]2.26[23][8] se snaží stejně jako u drátové elektrody využít toho, že pásek neustále obnovuje svůj profil. Tím pádem probíhá obrábění stále na stejném místě. Tento postup byl zveřejněn v roce 2013 trojicí korejských vědců. Ve svých článcích Song et al. popisují zvýšení produktivity oproti obrábění elektrodou stejného tvaru bez použití pásku. Pásek má v jejich aplikaci význam obnovování povrchu elektrody, okolo které je veden. Jedná se o zajímavou aplikaci, která by mohla vést ke zkvalitnění obrábění pomocí EDM hloubení. Díky nerovnostem v pásku je prozatím v článcích Songa et al. povrch výsledných obrobků viditelně zdrsňen.

Zajímavou možností pro využití ED zdroje je mikrosvařování. Jedná se o využití řízených pulzů nikoliv k úběru, ale ke spojování součástí. Tato metoda se používá pro svařování tenkých plechů, kde má klasické svařování problémy s tepelným ovlivněním výrobků. Pro mikrosvařování se ale spíše používá laserů, elektronového paprsku a ECD [26].

Jelikož se při EDM může při některých parametrech zdroje objem obráběcí elektrody zvětšovat, nabízí se otázka, zda-li by nebylo možné využít EDM k depozici materiálu. V článku [27] se Peng et al. zabývají touto možností. Pro tento účel se nástrojová elektroda nastaví jako anoda a je použito krátkých časů on-time, aby se co nejvíce zvýšilo opotřebení elektrody a tím i objem deponovaného materiálu. Aby se zamezilo depozici uhlíku a nežádoucího materiálu, je tento proces prováděn nikoliv v tekutém, ale v plynném dielektriku. Na obrázku 2.27 [27] vidíme válcový materiál získaný EDM depozicí. Objekty získané depozicí mohou být posléze doobrobeny klasickým EDM na stejném stroji. Na obrázku dále vidíme vyhloubené díry do válcového sloupu a sloup obrobený na hranol. Materiálové zkoumání ukázalo, že vzniklé objekty se skládají ze stejného poměru zinku a mědi jako mosazná elektroda, s malou příměsí kyslíku o velikosti cca. 1%. Vědci usoudili, že došlo k mikrooxidaci, kvůli přítomnosti vzduchu jako pracovního média. Deponovaný materiál měl asi 2x větší tvrdost, než materiál původní elektrody. Vyrobené objekty dosahují slušných přesností i drsností. Termofyzikálním modelem EDM depozice se zabývá článek [28].



Obrázek 2.27: Objekty získané EDM depozicí

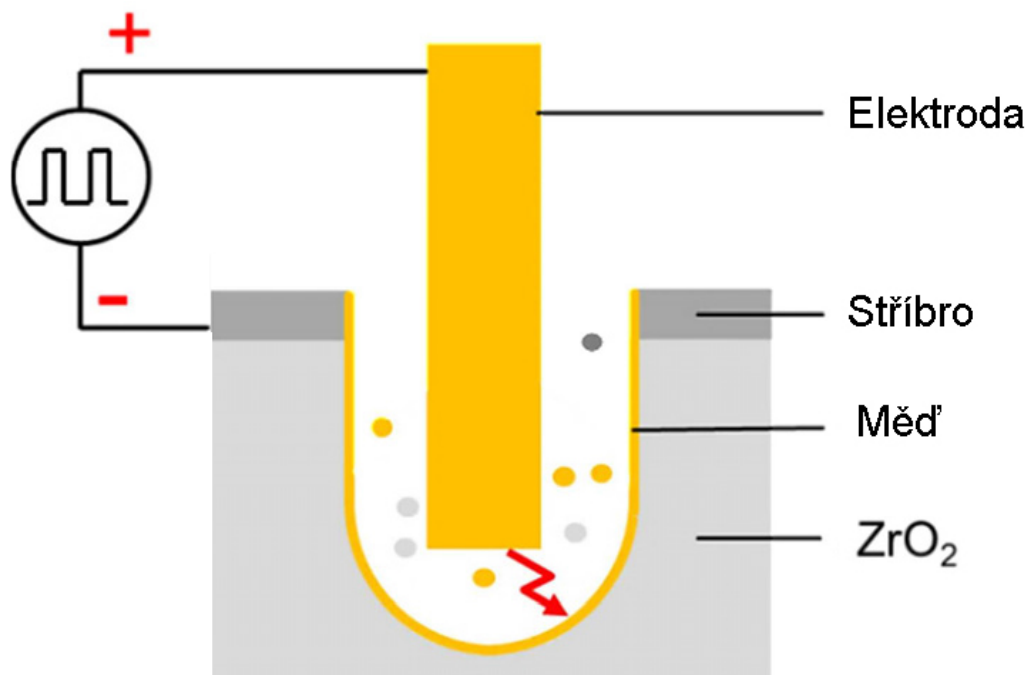
2.4.6 Obrábění nevodivých materiálů

Obrábění keramiky a keramických kompozitů je dnes důležitým odvětvím z důvodu velké pevnosti, teplotní a korozní odolnosti a odolnosti proti opotřebení [54]. Materiály jako je ZrO₂, Al₂O₃, Si₃N₄ a další mají však velmi malou elektrickou vodivost. Jsou to nevodiče. Tyto materiály jsou však stále více vyžadovány pro medicínské účely, povlakové vrstvy součástí, v letectví a jiných vysoce technických odvětvích. EDM je zde vhodnou alternativou, protože nezanašší mechanické napětí do těchto velmi křehkých materiálů. Vysoký elektrický odpor je ovšem náročnou překážkou pro EDM.

Pro funkčnost EDM je nutné dodat přídatné vodivé vrstvy na povrch obrobku (obr. 2.28 [52]). Po prvních několika výbojích se tato vrstva ovšem opotřebovává

a je tedy nutné vodivou vrstvu neustále obnovovat. Toto je možné docílit např. pomocí rozkladu olejového dielektrika a vysrážení uhlíkové vrstvy na povrchu obrobku. [53] Polarita elektrody a průběh pulzu hrají hlavní roli pro správné usazení uhlíkové vrstvy na povrchu obrobku.

Studie [53] se zabývala hloubením mikroděr do materiálu ZrO_2 . Schubert et al. hodnotili dosaženou drsnost a strukturu. Při správné kompenzaci opotřebení se jim podařilo vyrobit drážku s rovnoměrným dnem. Drsnost povrchu při obrábění ZrO_2 byla přibližně 2 - 3 krát větší než při obrábění kovu při použití stejných parametrů.

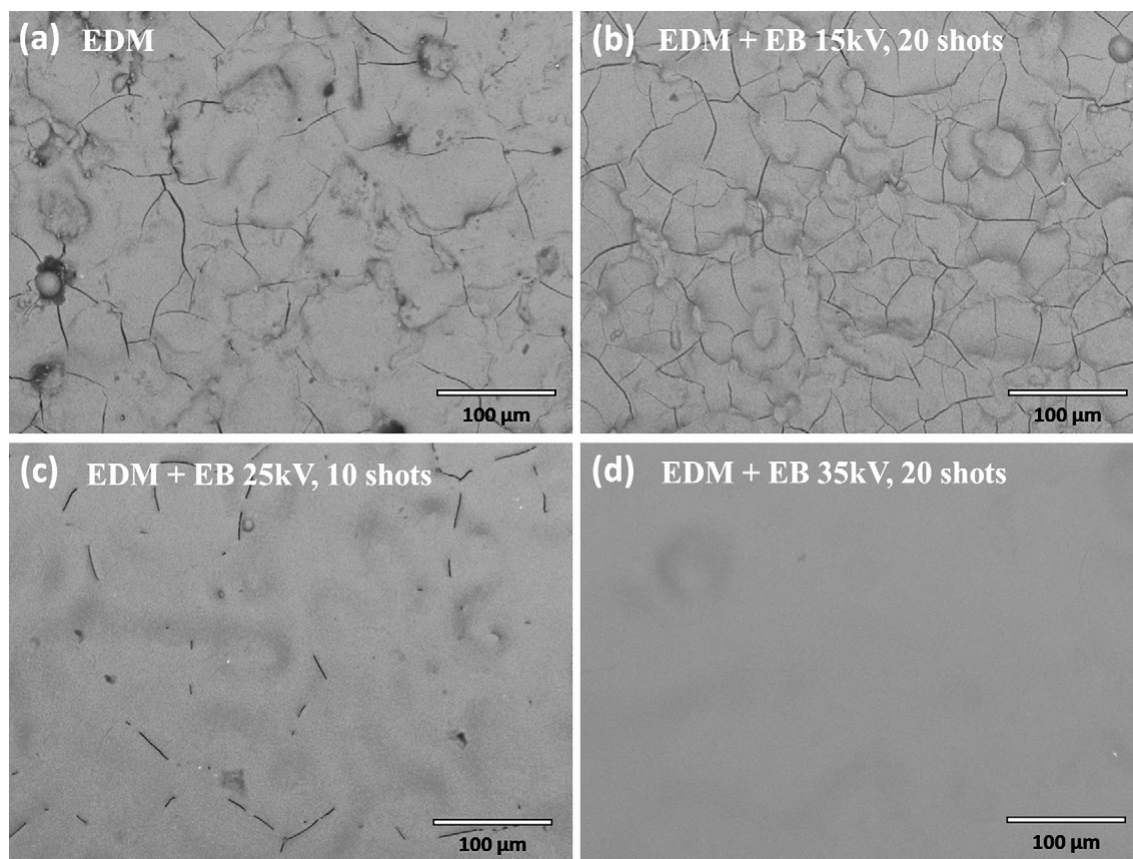


Obrázek 2.28: Schéma obrábění nevodivých materiálů

2.4.7 Úprava povrchu po EDM

Část materiálu se při EDM obrábění neodplaví s dielektrikem pryč, ale usadí se na povrchu obrobku. Znovuodlitá vrstva bývá zpravidla drsná, křehká a náchylná k praskání. Takové vlastnosti nejsou pro inženýrské aplikace příliš vhodné. Proto je vhodné povrch následně upravit. Jedním ze způsobů jak toho dosáhnout je ostřelování povrchu elektronovým paprskem. Studie [48] se zabývá takovýmto zušlechťováním a ukazuje zlepšení povrchu po jeho aplikaci. Pokrok v EDM s sebou přináší zvyšování rychlosti úběru materiálu, což zpravidla dále zhoršuje kvalitu znovuodlité vrstvy.

Únavová pevnost povrchové vrstvy se při výskytu mikrotrhlin výrazně zhoršuje, protože mechanismus, který provází prasknutí, se změní. Přejde ze stavu "vznik trhlin - rozšíření trhlin", pouze na stav "vznik trhlin". Z tohoto důvodu je důležité znovuodlitou vrstvu upravit. Ve studii [48] je dále odkázáno na další články, které prokázaly pozitivní účinek EP (elektronový paprsek) ostřelování pro zlepšení pevnosti, drsnosti a korozní odolnosti znovuodlité vrstvy. Tloušťka znovuodlité vrstvy je silně závislá na čase T_{on} . Je to doba po kterou proud prochází

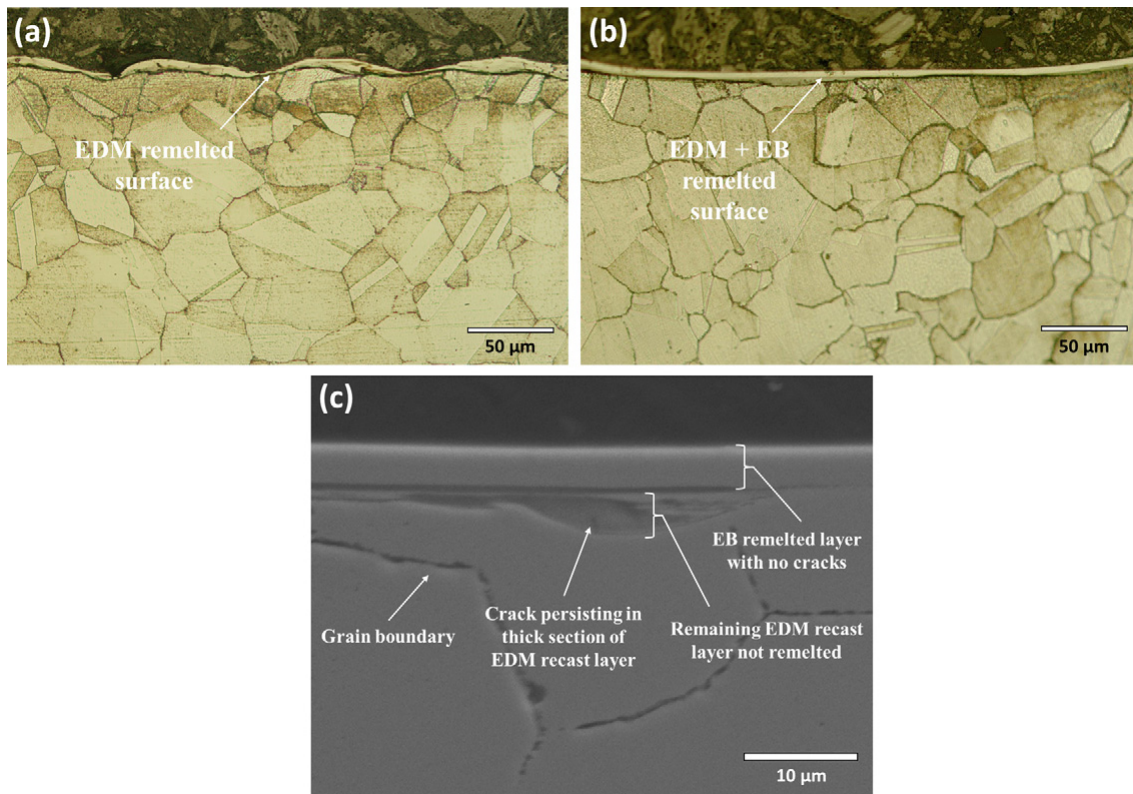


Obrázek 2.29: Povrch po ostřelování elektronovým paprskem

mezi elektrodami a odtavuje obrobek. Murray et al. použili pro své experimenty plusovou polaritu nástroje. Plusová polarita zajišťuje minimální opotřebení elektrody a toto nastavení je tedy často používáno pro hloubení.

Pro experimenty Murray et al. zkoušeli dva možné časy Ton 5 a 30 mikrosekund. Jelikož povrch při použití Ton 30 mikrosekund vykazoval výrazně více mikrotrhlin, má větší relevanci pro další zkoumání. Na obrázku 2.29[48] vidíme srovnání výsledných povrchů po ostřelování EP s různou intenzitou a různým počtem dávek. Při intenzitě EP 15 kV nedocházelo ke zlepšení s přibývajícím počtem dávek. Počet mikrotrhlin se náhodně měnil, takže po 5ti dávkách se zvýšil, po 10ti se snížil a po 20ti byl dokonce opět vyšší než po 5ti. Tím pádem je vidět, že se nejedná o dostatečně velkou energii pro odstranění mikrotrhlin. U energií 25 a 35 kV se povrch již výrazně měnil směrem k odstranění mikrotrhlin a po 20ti dávkách byly mikrotrhliny téměř odstraněny. Na obrázku 2.29[48] vpravo dole vidíme povrch po ostřelování 35 kV 20ti dávkami. Vidíme zde, že mikrotrhliny jsou téměř úplně vyhlazeny. V průběhu procesu po 10ti dávkách došlo k zajímavému jevu, že se snížil počet mikrotrhlin, ale jejich délka se zvýšila.

Na obrázku 2.30[48] vidíme znovuodlitou vrstvu z profilu. Pro zjištění tloušťky znovuodlité vrstvy rozřízli Murray et al. obrobek a odleptali jej. Po leptání je nově vzniklá znovuodlitá vrstva jasně rozpoznatelná od zbylé části obrobku. Tloušťku pak určili odečtem ze snímků z elektronového mikroskopu. Tloušťka vrstvy vytvořené ostřelováním je silně závislá na intenzitě paprsku. Maximální tloušťka byla $4,5 \mu\text{m}$ a byla naměřena po 10ti dávkách při 30 kV. Po více dávkách se u všech intenzit paprsku tloušťka znovuodlité vrstvy snížila. Murray et al.



Obrázek 2.30: Znovuodlitá vrstva po ostřelování

tento fakt připisují možnému odpaření části materiálu. Drsnost povrchu byla po jedné dávce nezměněna, ale již při třech až pěti dávkách výrazně poklesla. Murray et al. dále použili rentgenovou analýzu pro zkoumání krystalografické struktury povrchové vrstvy. Zjistili, že se v povrchové vrstvě vytvořila austenitová struktura (1 1 1) orientovaná rovnoběžně s povrchem. Tato struktura se vytvořila až po ozáření paprskem, nikoliv při samotném EDM.

2.4.8 Obrábění elektickým obloukem (BEAM)

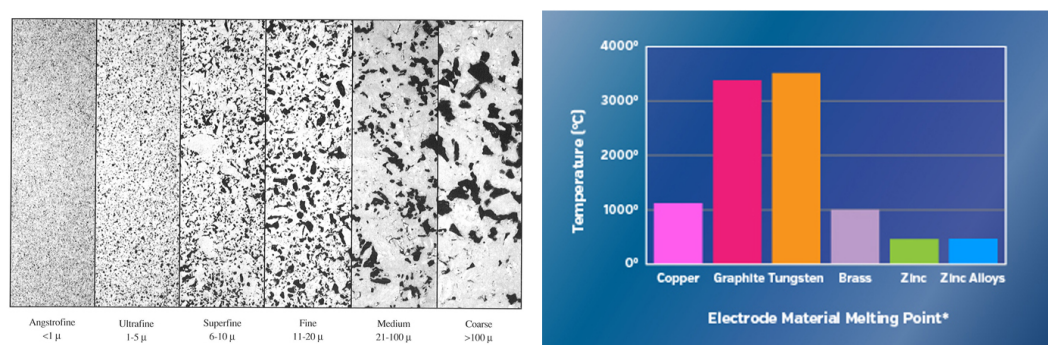
BEAM (Blastin erosion arc machining) je metoda využívající k obrábění elektrický oblouk. Elektrický oblouk mající vyšší energii je schopen rychlejšího obrábění než klasické jiskrové EDM. Stálý a mohutný oblouk má ovšem snahu koncentrovat se stále do jednoho místa. Z tohoto důvodu se výzkumníci snaží pomocí intenzivního vyplachování pohybovat obloukem.

2.5 Základní prvky EDM

Bezproblémový optimální chod obrábění je ovlivněn správným nastavením zdroje, materiálem použitým pro nástroj i obrobek, správným zvolením a udržováním dielektrika, včetně vlivu aditiv a způsobu vyplachování. Následující kapitola shrnuje poznatky z literatury s důrazem na tyto parametry.

2.5.1 Obráběcí elektrody

Drátové elektrody se neustále obnovují, proto není problém s jejich opotřebováváním. U blokových elektrod pro EDM hloubení tomu tak není. Materiálem elektrod bývá většinou kov, nebo grafit. Teoreticky by ovšem bylo možné použít jakýkoliv vodivý materiál. Grafit se jako materiál netaví, ale sublimuje při 3350°C. Grafit

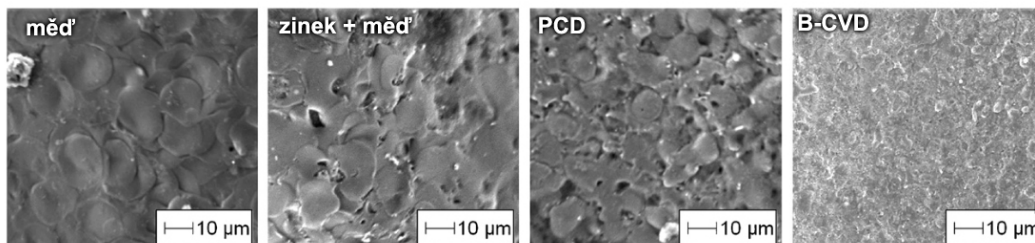


Obrázek 2.31: Zrnistosti grafitu a body tání jednotlivých materiálů

je dnes nejrozšířenějším materiálem pro výrobu elektrod, protože má větší poměr odebraného materiálu vůči opotřebení. Z kovových elektrod se grafitu vyrovná pouze wolfram, ten je ovšem velice těžko obrobitelný. Kovové elektrody se proto používají pro obrábění materiálů s nízkým bodem tání, jako jsou hliník, mosaz a měď. Pro ocel s vyšším bodem tání se používá grafit. Při výrobě velkých kovových elektrod, které by bylo vhodné vyrobít z dražšího kovu, se volí galvanické pokovení skeletu. Skelet je vyroben z pryskyřice a k později nanesené kovové vrstvě jsou přivedeny vodiče. Pro výrobu opakovaně používaných elektrod se používá směs wolframu a mědi, která je po sléze spečena. Tento postup vytváří elektrody v nízkých tolerancích. Grafit při obrábění nevytváří otřepty. Jeho nevýhodou je však, že díky malé zrnitosti se zbytky grafitu uvolňují do okolí jako jemný černý prach. Grafit je tedy nutno při obrábění intenzivně odsávat, aby nedošlo k poškození strojů. Grafitové elektrody mohou být také spékány. Další možností, jak vyrábět grafitové elektrody, je obtiskávání modelů do grafitového bloku, nebo výroba pomocí ultrazvuku. Grafit se dělí podle velikosti zrn na několik kvalitativních skupin. Pro aplikace požadující kvalitní povrch a malé detaily je vhodné volit grafit s nejmenšími zrnky, pro méně náročné aplikace stačí levnější grafit s drsnějšími zrny (2.31[6]).

Při mikro EDM je kvůli krátkým časům on-time nástrojová elektroda nabita jako katoda, kvůli menšímu opotřebení. Pro mikro EDM se používají materiály jako měď, povlakované karbidy, nebo slitina wolframu a mědi, jelikož mají při EDM malý úběr materiálu. Novějšími materiály pak jsou PCD, nebo borem

dopovaný CVD diamant. [35] Tyto nové materiály mají ještě menší opotřebení elektrod. Materiál elektrody také ovlivňuje topografii výsledného povrchu. Na obr. 2.32[35] vidíme vzhled povrchů po obrábění různými materiály. V článku [37] je použita elektroda povlakovaná materiálem Cu-ZrB₂. Elektrody s tímto materiálem vykazují vyšší přesnost při mikro EDM. V článku [36] jsou diskutovány další materiály, jako je například AgW. Elektrody z tohoto materiálu produkují obrobky s hladkým povrchem a zanedbatelnými povrchovými defekty.



Obrázek 2.32: Topografie povrchů po obrábění různými materiály

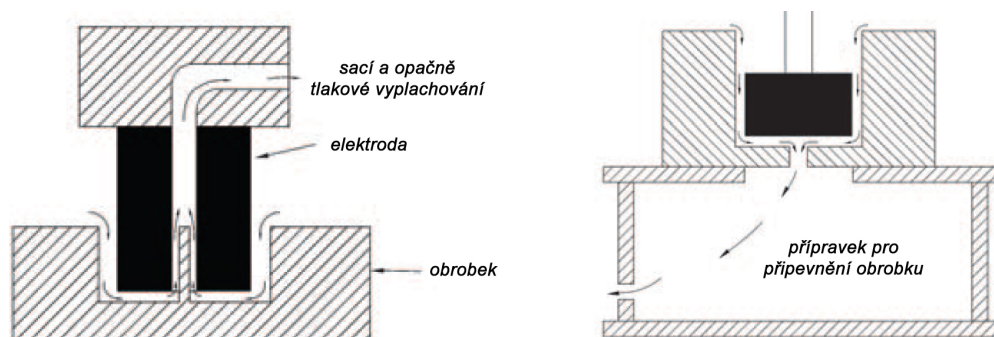
Důležitým parametrem při sledování elektrod pro EDM hloubení je jejich opotřebení. Jednou z možností je použít tzv. no-wear cyklus, což je cyklus používající dlouhé časy on-time, ve kterém se elektroda může dokonce zvětšovat kvůli nahromadění materiálu z obrobku. Tento cyklus ovšem nemá tak dobrou rychlost obrábění. Při hloubení slepých otvorů je vhodné hrubovat s dlouhou elektrodou, která se pro jemné doobrobení zkrátí a zachová si tak svůj profil. Největší opotřebení postihuje rohy elektrod, které se v průběhu obrábění zakulacují. Vhodným způsobem pro rovnoměrnější opotřebení a lepší výsledky řezu je možno dosáhnout pomocí tzv. "orbitingu". Tento způsob používá menší elektrody k hloubení větších děr, pomocí interpolace svých kontur. Při návrhu elektrod je nutno také počítat s přídavkem pro jiskrovou mezeru. Velikost jiskrové mezery záleží na proudu a napětí zdroje. Při hrubování je tedy mezera větší, než při dokončovacích operacích.

2.5.2 Dielektrikum

Jako dielektrikum se pro EDM hloubení používá dielektrický olej. Jedná se o minerální olej, s vhodnými vlastnostmi. Dostatečně vysoký zápalný bod, tedy teplota oleje, při které se vznítí páry z něj vycházející, je vhodný pro bezpečnost EDM procesu. Správná viskozita umožňuje kvalitní vyplachování třísek. Dostatečná odolnost proti oxidaci zlepšuje životnost dielektrika. Důležité jsou také barva, zápach a efekt na kůži obsluhy. Při pořizování oleje je vhodné poradit se s výrobcem daného EDM stroje.

Olej má tři základní úkoly. Musí zajistit dostatečný a stálý odpor, aby bylo možné udržovat stálou jiskrovou mezeru. Musí zajistit zchlazení přehřátých částí elektrody a obrobku. A musí zajistit dostatečné vyplachování nečistot z oblasti obrábění. Vyplachování výrazně ovlivňuje rychlost obrábění. Čím hlubší je vyhloubený otvor, tím těžší je pro čerstvé dielektrikum dostávat se k místu řezu. Špatné vyplachování má zásadní vliv na nestabilitu řezu. Pokud se tříška nachází v jiskrové mezeře, vzniká zkratování, které může poškodit elektrodu. Zkratování hrozí nejvíce při dokončovacích operacích, kvůli malé jiskrové mezeře. Správ-

né vyplachování pro EDM hloubení záleží na objemu a tlaku vháněné kapaliny. Správný tlak pro EDM hloubení je cca. 0,2 až 0,3 barů. Dokončovací operace vyžadují vyšší tlak, hrubování nižší. Důležitým parametrem je ovšem i zmíněný průtok proplachovacího média.



Obrázek 2.33: Sací a tlakové vyplachování

Pro EDM hloubení se používají čtyři základní typy vyplachování. Jsou to tlakové, sací, vnější a pulzní. Nejrozšířenější metodou je tlakové vyplachování. Výhodou tohoto způsobu je fakt, že obsluha stroje může vizuálně kontrolovat průtok dielektrika. Jedná se o metodu, kdy je dielektrikum tlačeno skrz elektrodu nebo obrobek do místa řezu (obr. 2.33[8]). Opačný postup, tedy vysávání dielektrika z vany skrz obrobek nebo elektrodu, používá sací způsob vyplachování. Při tlakovém vyplachování je do místa řezu vháněno čisté dielektrikum, avšak hrozí sekundární výboje při odcházení dielektrika dále do vany. Při sacím vyplachování je tento problém vyřešen, jelikož tříška se rovnou odsává. Je ovšem nutné, aby olej ve vaně byl co nejčistší. Obsluha ovšem nevidí proud dielektrika. Dalším problémem je možnost nahromadění plynů ve slepých místech elektrody, nebo obrobku. Nahromaděné plyny mohou při výbuchu zničit obrobek nebo elektrodu. Tyto dva způsoby se pro složité obrobky kombinují, čímž mohou být částečně eliminovány nevýhody obou. Vnější vyplachování není tak účinné, je ovšem velmi lehce realizovatelné. Jedná se o nasměrování vyplachovacích trysek směrem k obrobku. Pomocí CNC řízení stroje může být realizován další hojně využívaný způsob, pulzní vyplachování. Moderní stroje jsou vybaveny jump cyklem, který pohybuje s elektrodou nahoru dolů, čímž pumpuje do mezery mezi obrobkem a nástrojem čerstvé dielektrikum a vytlačuje dielektrikum s třískou. Díky tomuto vertikálnímu způsobu je možné vyrábět tenké planžety a žebra. Pro rotační elementy obrobků se používá rotační a orbitální vyplachování. Rotační vyplachování se používá například při rychlém EDM vrtání, kdy jsou do trubičkové elektrody navrtány díry. Rotování těchto elektrod pak pomáhá při vyplachování. Při orbitálním vyplachování pohybuje CNC řízení s elektrodou po předem definované dráze, čímž se zvětší jiskrová mezera a dojde k lepšímu vytlačování třísky z místa řezu.

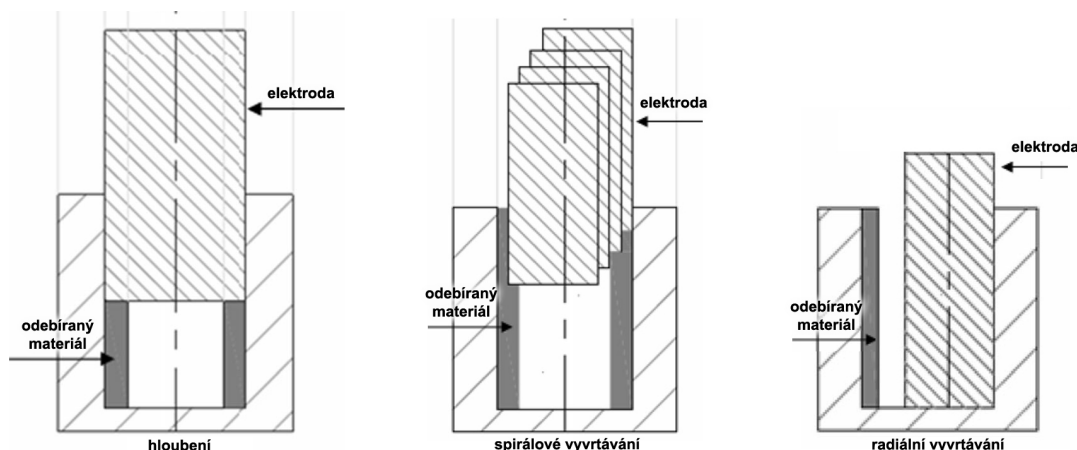
Pro drátové řezání a rychlé EDM vrtání se spíše používá dielektrikum na bázi vody. [34] [33]

Další možností pro prostředí oddělující elektrody je využití plynu. Při využití plynu se jedná o tzv. suché EDM, využívá se při něm vzduchu nebo kyslíku. Velkou výhodou tohoto přístupu je ekologická šetrnost a méně nepříjemností při manipulování s dielektrikem. [29] Při použití plynu jako média také nedochází

ke korozi[30]. Plyn je vysokorychlostně pumpován do místa řezu, čímž je zajištěno rychlé odstraňování třísky. Při použití kyslíku dosáhli japonští vědci výrazně vyššího úběru materiálu než při použití vzduchu. Opotřebení elektrody je u suchého EDM nižší než při použití tekutého dielektrika. Nevýhodou suchého EDM je celkově malý úběr materiálu a opětovné nachytávání třísky na povrch obrobenej součásti. Zlepšením těchto parametrů se zabývá studie [31], zabývající se optimalizací suchého EDM procesu. V studii [32] je použito chlazení obrobku, které zlepšilo úběr materiálu asi o 30 %. Tato studie také potvrzuje předešlou zjištění, že suché EDM s použitím kyslíku má více než dvojnásobný úběr materiálu než bez něj.

Srovnání různých typů vyplachování

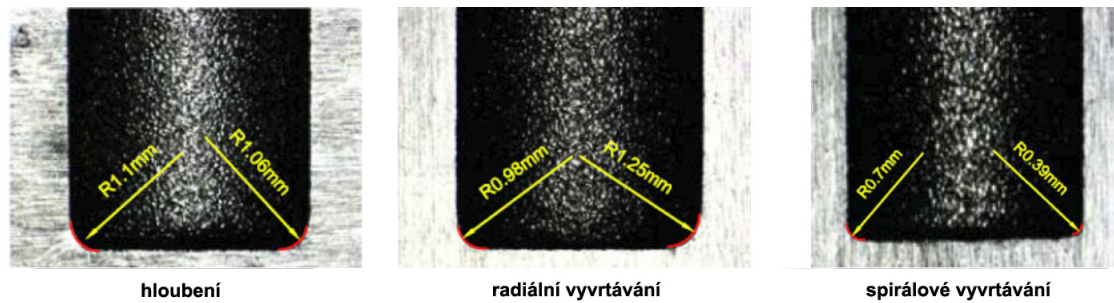
Studie [49] se zabývá experimentálním srovnáním tří metod pohybu elektrody při hloubení. Srovnává klasické EDM hloubení s přístupem, kde předvrtanou díru Kumar et al. rozšiřují spirálovým a radiálním vyvrtáváním (obr. 2.34[49]). U hloubení se tedy jedná o zasunování elektrody do obrobku shora s malou jiskrovou mezerou. Velikost elektrody odpovídá velikosti hloubené díry. Pro vyplachování je použit pouze jump cyklus. U spirálového vyvrtávání se obrobek odebrává pomocí pohybu po spirále, u radiálního vyvrtávání je elektroda od začátku procesu zasunuta v předvrtané díře a pohybuje se pouze v osách X a Y.



Obrázek 2.34: Tři metody vyplachování při hloubení

Pro studium povrchových vlastností použili Kumar et al. rozdělený obrobek. Ten byl už před obráběním rozdělen na dvě poloviny a ty byly potom těsně stlačeny k sobě. Vyhlobené otvory pak měly střed v rovině styku dvou polovin obrobku. Jako materiál elektrody byla použita měď s kladnou polaritou. Obrobek byl z austenitické oceli AISI 304. Experimenty byly prováděny dvakrát a výsledek byl poté zprůměrován. Kumar et al. zkoumali drsnost povrchu, podíl úběru elektrody a obrobku a odchylku kruhovitosti. Odchylka kruhovitosti byla určena jako vzdálenost opsané a vepsané kružnice všem bodům v rovině řezu kolmé k středové ose. Podíl úběru elektrody a obrobku byl nejmenší u radiálního vyvrtávání. U hloubení byl o 95% a u spirálového vyvrtávání o 94% vyšší. Tento jev se promítnul hlavně na rozích elektrody a hloubené díry (obr. 2.35[49]).

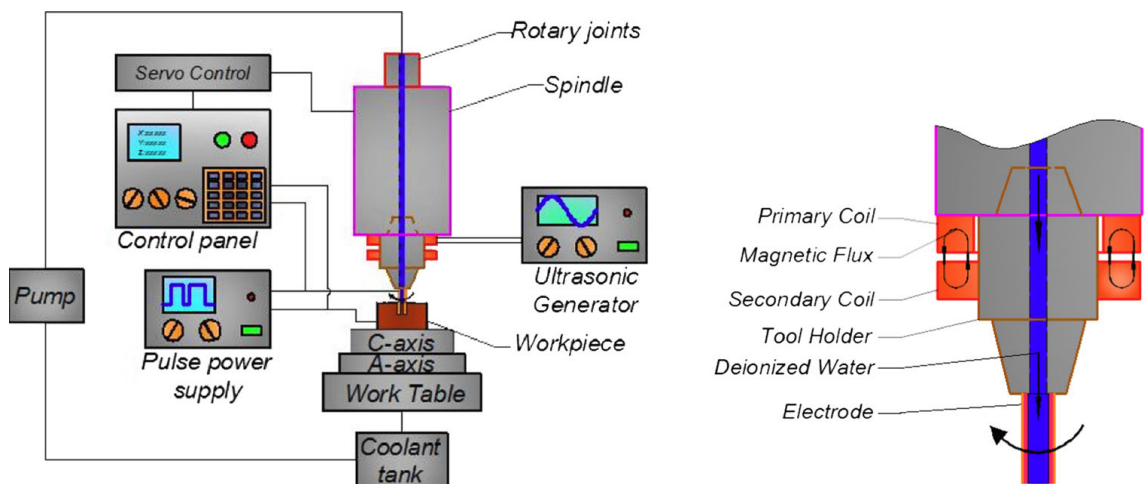
Odchylka kruhovitosti byla ze tří zkoušených metod nejnižší u radiálního vyvrtávání. Celková geometrická přesnost závisí na schopnosti vyčistit jiskrovou



Obrázek 2.35: Výsledné radiusy při různých metodách hloubení

mezeru od nečistot. Metody vyvrtávání vykazují lepší geometrickou přesnost, jelikož umožňují lepší vyplachování nečistot. Drsnost povrchu naopak byla lepší u hloubení, tento jev je také způsoben horším odplavováním odtaveného materiálu, který se usadí opět na povrchu obrobku a částečně vyplní krátery na povrchu obrobku. U vyvrtávacích metod došlo k lepšímu odsunu nataveného materiálu a tím pádem tvorbě větších kráterů.

Pro vyplachování se tedy používá vibrace[58], rotace nebo pumpování pomocí předvrtané díry. Článek [50] ukazuje kombinaci těchto tří způsobů do jednoho. Ultrazvuková vibrace je dalším možným způsobem zlepšení vyplachování. Literatura odkazovaná v článku dokládá čtyřnásobné zvýšení úběru materiálu a snížení tloušťky teplem ovlivněné a znovuodlité vrstvy. Ni et al. zkombinovali tyto tři metody na jednom stroji a zkoumali výsledný úběr materiálu při vrtání hlubokých děr do oceli Inconel 718. Zařízení pro ultrazvukové vyplachování je zobrazeno na obrázku 2.36[50].



Obrázek 2.36: Speciální ultrazvuková hlava pro kombinované vyplachování

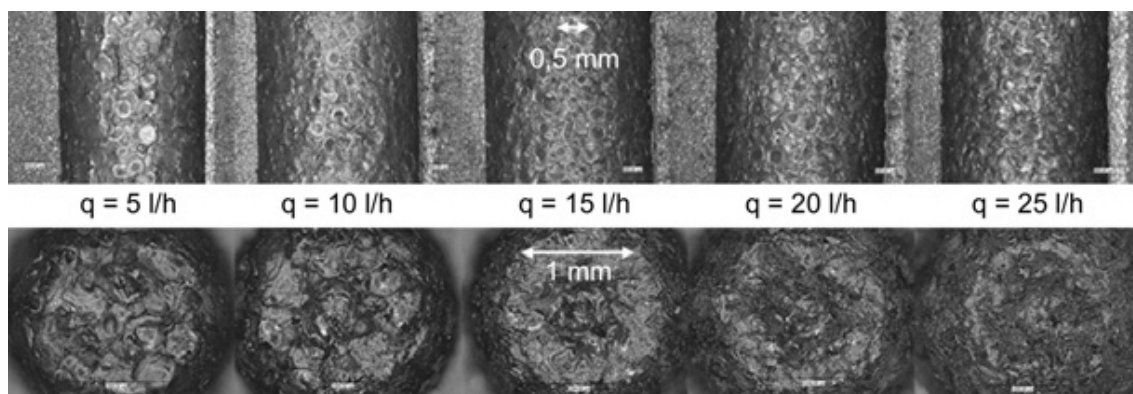
Ultrazvukový generátor je připevněn k elektrodě tak, aby elektroda mohla zároveň vibrovat a rotovat. Je použito vřeteno s otvorem pro přísun dielektrické kapaliny. Za použití metody konečných prvků Ni et al. stanovili vlastní frekvence systému a poté podle nich nastavili parametry generátoru. Vlastní frekvence závisí na hmotnosti elektrody, která se mění s opotřebením. Během obrábění by tedy docházelo k odchýlkám a účinnost vibračního vyplachování by se snižovala. Ni

et al. tedy dále upravili parametry ultrazvukového generátoru podle opotřebení elektrody.

Výsledky ukázaly zásadní význam tlakového vyplachování při vyplachování nečistot z řezaného otvoru. Efekt ultrazvukového vibračního vyplachování závisel významně na volbě správného obráběcího proudu. Při správném nastavení proudu se vibrační vyplachování ukázalo jako velmi efektivní. Pokud byl nastaven vysoký proud, úběr materiálu na použití vibračního vyplachování nezávisel. Pro hloubení hlubokých děr byla tedy alternativa kombinovaného typu vyplachování shledána jako přínosná.

Vliv průtoku dielektrika na ED vrtání

Studie [51] zkoumá vliv průtoku na parametry ED vrtání. Munz et al. zkoumali průtok od 5 do 25 l/h. Pro tento účel použili vysokotlaký kompresor. Munz et al. zkoumali čtyři různé hladiny energie výboje. Munz et al. zjistili, že při zvyšujícím se průtoku lze dosáhnout zvýšení úběru materiálu. V případě ED vrtání je úběr materiálu přímo úměrný rychlosti pohybu elektrody do obrobku (Z posuv elektrody). Pro danou hladinu energie výboje existuje ovšem maximum. Po překonání tohoto maxima průtoku se naopak rychlost Z posuvu elektrody začala snižovat. Se zvyšujícím se průtokem se totiž rychleji vyčistí jiskrová mezera a minimalizují se zkraty a oblouky. Při průtoku nad 20 l/h je silový účinek kapaliny již tak velký, že ovlivňuje a prodlužuje plasmový kanál výboje. Plasmový kanál je prodloužen, čímž se změní jeho vodivost, a tím se změní i napětí na výboji. Díky pružnosti plazmového kanálu pak přeskóčí jeho spodní bod po směru toku kapaliny, což zkrátí jeho délku a opět ovlivní napětí. Přeskakování plazma kanálu pak vede k oscilování napětí při vysokém průtoku. Zmírnění opotřebení elektrody při vysokých průtocích pak Munz et al. připisují lepšímu chlazení.

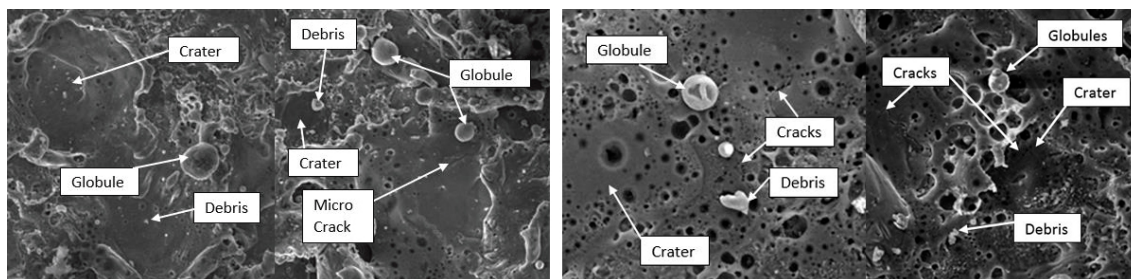


Obrázek 2.37: Vliv průtoku na povrch děr

Vliv průtoku na postranní část vyvrtaného otvoru je prakticky nulový (obr. 2.37[51]). U čelní části vidíme, že do průtoku 15 l/h jsou k vidění krátery vzniklé obráběním. U průtoku nad 15 l/h už vidíme jen velmi nezřetelné krátery. Munz et al. se domnívají, že intenzivní vyplachování při vysokých průtocích odplaví roztavený materiál rychle do strany. Munz et al. došli k závěru, že drsnost povrchu není ovlivněna různými hodnotami průtoku.

Srovnání různých typů dielektrik

Různá dielektrika jsou podrobována intenzivnímu zkoumání s ohledem na zvýšení úběru materiálu a zlepšení povrchové kvality obrobku Ra. Článek [44] se zabývá srovnáním kerosenu a destilované vody jako dielektrika.



Obrázek 2.38: Snímky vlevo - kerosen (6 a 12 A), vpravo voda (6 a 12 A)

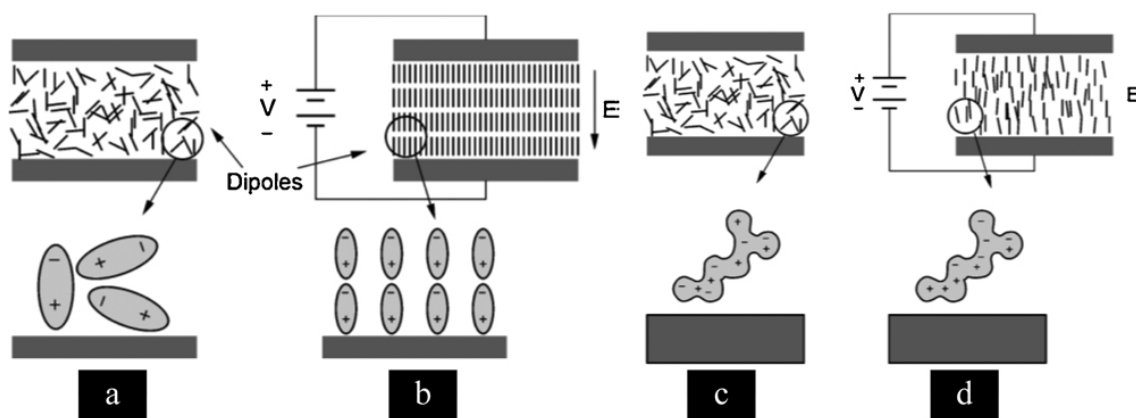
Na obrázku 2.38[44] vlevo vidíme mikroskopické snímky ukazující použití kerosenu. V levé části levé poloviny je zobrazeno obrábění s proudem 6 A a v pravé s proudem 12 A. Čas Ton byl 45 mikrosekund. Porovnání těchto snímků při 6 A a 12 A pro kerosen ukázalo, že při vyšším proudu se tvoří větší krátery a více trhlin. Stejně tomu bylo i u destilované vody. Dále se ukázalo, že při použití kerosenu byla dosažena lepší drsnost povrchu Ra. Úběr materiálu je totiž spíše způsobován odtavováním a vypařováním kovu, zatímco u destilované vody nastává více odtavování a rozšiřování trhlin. Pro experimenty byla použita hliníková slitina 6061 T6. Autoři článku došli k závěru, že největší úběr materiálu nastává při největším proudu a nejdelšímu času Ton. Úběr materiálu je vyšší pro kerosen, kvůli vzniku elektrického oblouku, vznikajícího při použití destilované vody. Vyšší čas Ton vykazoval nižší úběr materiálu elektrody. Kerosen vykazoval nižší opotřebení elektrody, protože povrch elektrody se pokryl uhlíkem, což zabránilo dalšímu opotřebení. Hrubší povrch vykazovalo použití destilované vody. Tato zjištění vedla autory k závěru, že pro toto nastavení parametrů je kerosen vhodnější než destilovaná voda.

Dielektrikum smíchané s vodivým práškem

Pro zvýšení možností EDM se také používá dielektrikum smíchané s vodivým práškem, potom hovoříme o PMEDM (Powder mixed EDM).[45] Přimíchání vodivého prášku snižuje dielektrickou konstantu dielektrika a zvětšuje jiskrovou mezeru. Díky tomu je EDM proces stabilnější, zvýší se úběr materiálu alepší se i povrchová drsnost obrobku. Povrch obrobku je pak také odolnější vůči abrazi a korozi.

Princip PMEDM se poněkud liší od principu běžného EDM. Při tomto procesu se vhodný prášek přimíchá do dielektrika buďto ve stejné, nebo v oddělené nádrži. Aby nedocházelo k usazování částic prášku, je do nádrže přidán míchací systém. I cirkulační systém dielektrika je modifikován. Na spodu nádrže jsou umístěny permanentní magnety, aby oddělily prášek od nečistot vzniklých při obrábění. Typy prášků používaných pro PMEDM jsou hliník, chrom, grafit, křemík, měď, nebo karbid křemíku. Jiskrová mezera je naplněna částicemi prášku. Napětí mezi 80-320 V je zapnuto, při mezeře šířky 25-50 mikrometrů. Částičky

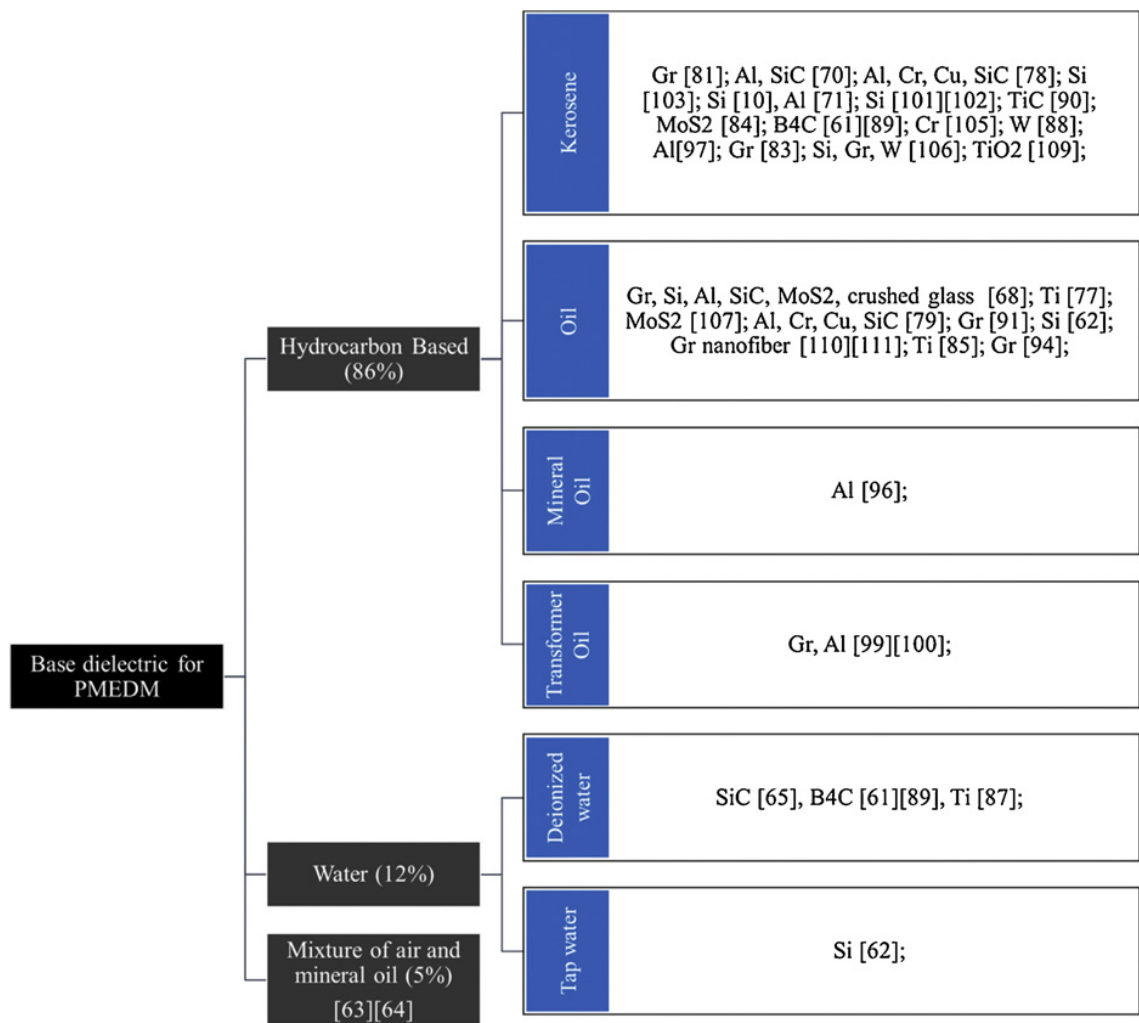
prášku se nabíjí a pohybují se cik-cak. Částičky jsou uspořádány elektrickým polem a chovají se jako vodiče [45]. Tím pádem nastane prolomení elektrického odporu dřívě a zvětší se jiskrová mezera. Částičky se uspořádají do řetězu ve směru toku proudu (obr. 2.39[46]). Dále nastane sériové vybití mezi jednotlivými uspořádanými částičkami, obrobkem a elektrodou. Dojde k rychlejší tvorbě jisker, což zvýší úběr materiálu. Plazmový kanál se rozšíří. Jelikož je vyjiskřeno rovnoměrně rozmístěno mezi částičky kovu, elektrická hustota jisker se sníží. Kvůli rovnoměrné distribuci jisker vniknou mělké krátery, což zlepší kvalitu povrchu obrobku.



Obrázek 2.39: V levé části PMEDM, v pravé běžné EDM

Podrobnější pohled zejména na materiál, velikost a koncentraci prášku je rozpracován v článku [46]. Marashi et al. v něm uvádí různé materiály prášku a diskutují jejich vhodnost pro použití v kombinaci s různými dielektriky (obr. 2.40[46]). Článek nabízí srovnání celého pole dielektrik od kerosenu a minerálních olejů přes destilovanou i kohoutkovou vodu až po plynná média. Uhlovodíková dielektrika jsou stále nejrozšířenějšími dielektriky kvůli jejich lepší produktivitě hlavně při hloubení. Při použití uhlovodíkového dielektrika vzniká menší jiskrová mezera, což umožňuje výrobu komplikovanějších tvarů obrobku. Dále nenastává problém s korozí. Při použití uhlovodíkových dielektrik hrozí riziko požáru a při jejich tepelném rozkladu vzniká celá řada zdravotně závadných látek, jako je například benzen, nebo benzopyren, které jsou karcinogenní. Marashi ukazuje alternativy v použití plynných dielektrik a dielektrik na bázi vody. Při použití vody je výhodou nižší viskozita, menší znečištění jiskrové mezery a bezpečnější a zdravější pracovní prostředí. Nevýhodou je přítomnost koroze. Při použití plynu (tzv. suché EDM) je výhodou nízké opotřebení nástroje, tenká znovuodlitá vrstva a zdravější a bezpečnější pracovní prostředí. Problémem je opětovné přisávání třísky a nečistot na obrobený povrch a výskyt elektrického oblouku.

Hlavní změnou oproti klasickému EDM je, že u PMEDM je vyšší frekvence jisker a nižší energie jednotlivé jiskry. Proto právě dochází k vytvoření hladšího povrchu. Studie [46] se soustředila hlavně na hustotu zrn prášku a jejich elektrickou a tepelnou vodivost. Tyto parametry mají hlavní vliv na elektroerozivní proces. Při studiu prášků Gr, Si, Al, SiC MoS₂ a rozemletého skla bylo prokázáno, že všechny prášky kromě skla nejméně zdvojnásobily jiskrovou mezera. Jiskrová mezera se nejvíce zvýšila u prášku Al. U tohoto prášku došlo k dvanásťnásobnému zvětšení mezery.



Obrázek 2.40: Přidané prášky používané v kombinaci s dielektriky

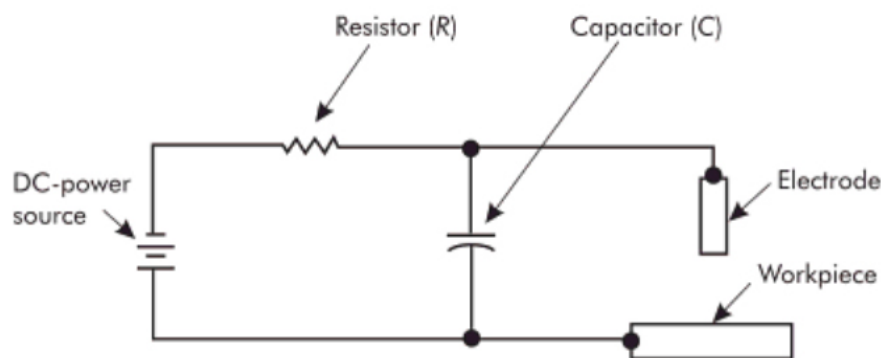
Nejvíce používané prášky jsou dnes grafit a hliník, jelikož nejlépe upravují úběr materiálu a drsnost povrchu. U prášků Gr (grafit), Al, Ti, W, TiC, Si a SiC se ukázalo zlepšení vlastností povrchu materiálu. Prášky MoS2 and Gr zlepšují mazací schopnost. Keramické prášky jako SiC a B4C vytváří menší mezeru než kovové, kvůli menší elektrické vodivosti. Koncentrace prášků se běžně pohybují pod 20 g / l dielektrika a velikost zrn mezi 20 a 150 nanometry.

Studie [47] se zabývá přimícháním zrn granátu do dielektrika na bázi vody a vytvořením hybridního systému používajícího EDM kombinované s řezáním vodním paprskem. Jedná se tedy o PMEDM pod tlakem vody s abrazivní složkou. Jelikož pro mikro-EDM je používána koncentrace granátu podobná jako u mikro řezání vodním paprskem, napadlo Modicu et al. prozkoumat tento přístup. Studie shrnuje pokusy postupně s deionizovanou vodou, deionizovanou vodou s granátem, kohoutkovou vodou a kohoutkovou vodou s granátem. U těchto dielektrik byla měřena elektrická vodivost a experimenty prokázaly, že při vyšší vodivosti se snížila rychlost úběru materiálu. U obráběcí elektrody se při vyšší elektrické vodivosti rychlost úběru elektrody snížila. Co se týče tvaru a velikosti kráterů, tyto parametry závisí spíše na obráběcím režimu než na volbě vybraných dielektrik. Modica et al. došli k závěru, že se jedná o slibný přístup, u kterého bude

ještě nutné zoptimalizovat parametry obráběcího procesu.

2.5.3 Napájecí zdroj

Napájecí zdroj je srdcem EDM stroje. Původní zdroj používaný Lazarenkovými je zdroj používající RC obvod k vytváření stálých neměnných pulzů. Tento zdroj je i dnes používán pro některé aplikace. [38] Tento zdroj má jednoduchou konstrukci



Obrázek 2.41: Zdroj využívající RC obvod

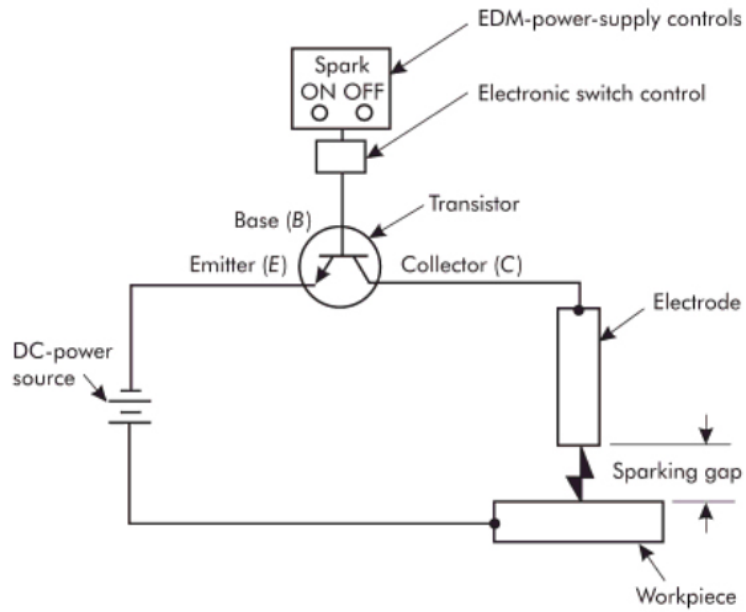
(obr. 2.41[8]). Zdroj stejnosměrného napětí nabíjí kondenzátor. Jakmile dosáhne napětí na kondenzátoru hodnotu potřebnou pro vytvoření jiskry, prorazí se odpor dielektrika při dané jiskrové mezeře a vytvoří se výboj. Energie a délka výboje je dána velikostí odporu a kondenzátoru. Průběh pulzu a frekvence pulzů jsou také pevně dány konstrukcí obvodu. Pro ovlivňování průběhu pulzů je EDM stroj vybaven přepínačem mezi jednotlivými odpory a kondenzátory. Pokud by např. vzdálenost jiskrové mezery nebyla správná pro přeskočení jiskry, kondenzátor zůstává nabitý a zdroj je připraven kdykoliv jiskru vyrobit.

Spínaný zdroj je tvořen tranzistorovým zapojením. Pulzně-šířková modulace stáleho DC zdroje umožňuje požadované nastavení velikosti napětí v každém okamžiku obráběcího cyklu. Je tak možno lépe kontrolovat průběh pulzů a optimalizovat obráběcí proces. Pokud ovšem nedojde k přeskočení jiskry, zdroj nezůstává nabit a nečeká na vhodnou příležitost pro výboj (obr. 2.42[8]).

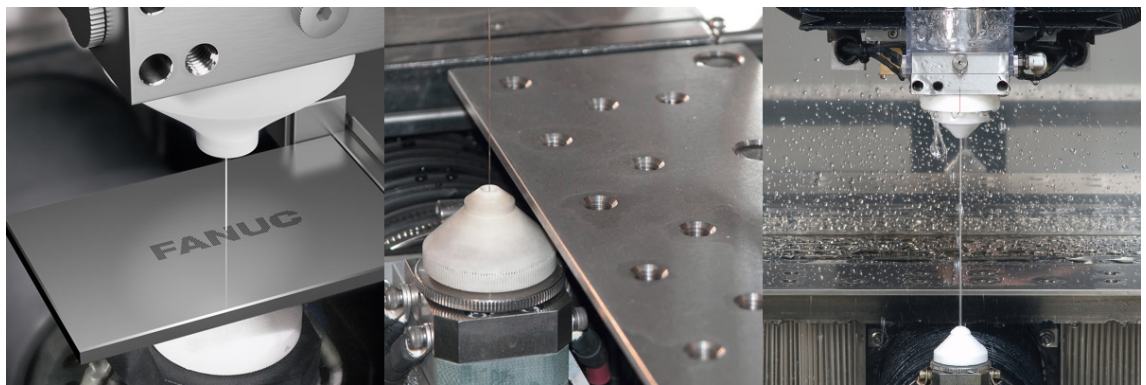
Oba typy zdrojů jsou dnes používány pro hloubení i drátové řezání. RC obvod se používá spíše pro aplikace s dobrou drsností povrchu a pro výrobu přesných detailů a mikroder. Spínaný zdroj je vhodnější pro aplikace vyžadující vyšší proudy.

2.5.4 Pevná vodítka

Přesné navedení drátu do místa řezu je nejdůležitějším požadavkem pro přesnost drátového řezání. Pro splnění tohoto požadavku se jako poslední člen, který navádí drát k obrobku používají pevná přesná vodítka. Tato vodítka mají třecí spojení s drátem, jelikož třecí spojení má větší přesnost než valivé. Běžně se používají průvlačná rubínová nebo diamantová vodítka. Na obr.2.43[63] jsou zobrazena průvlačná vodítka. Jedná se vlastně o kruhový otvor velikosti drátu s určitou vůlí. Například pro drát průměru 100 mikrometrů je otvor vodítek 105 mikrometrů. Každý výrobce má pro svůj stroj svá vodítka a tyto systémy nejsou kompatibilní.



Obrázek 2.42: Spínaný tranzistorový zdroj



Obrázek 2.43: Běžná vodítka používaná pro EDM drátové řezání

Na obr. 2.44[64] je zobrazen jiný typ průvlačných vodítek, která vzniknou složením dvou součástí, které po svém přiblížení vytvoří výsledný vodící otvor. Výhodou těchto vodítek je fakt, že drát se do nich nemusí prostrkovat koncem drátu, ale lze navléct i prostřední část drátu.

V průmyslových aplikacích jsou tato průvlačná vodítka standardem. Materiálem vodítek bývá většinou diamant, safír nebo rubín. Výrobce Sodick uvádí, že diamantová vodítka mají 5x vyšší životnost než safírová.



Obrázek 2.44: Běžná vodítka používaná pro EDM drátové řezání

2.6 Závěr

Elektroerozivní obrábění je již zavedený proces, který je schopen v mnoha aspektech předčít konvenční obrábění, zejména v oblastech přesnosti obrábění, výroby jemných detailů, obrábění v místech nedostupných pro konvenční obrábění, či obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Bezkontaktní povaha elektroerozivního obrábění umožňuje vytvářet jemné detaily bez silového ovlivnění okolního materiálu. Drátořezné obrábění se již dnes v mnoha aplikacích ekonomicky vyrovná konvenčnímu, jelikož obrábí pouze kontury obrobku a neodebírá celý nepotřebný objem mnohdy drahého materiálu. Elektroerozivní obrábění je velice přesný a sofistikovaný druh obrábění, jehož největší nevýhodou je jeho produktivita. S rozšiřováním zájmu o EDM se však do vývoje zapojuje čím dál tím více firem, produktivita EDM se zvyšuje a v budoucnu je pravděpodobné, že EDM bude ještě více konkurovat klasickému obrábění v oblasti vodivých materiálů.

Na příkladech studií uvedených v rešeršní části jsem demonstroval, že efektivita EDM obrábění je stále aktuální a široce řešený problém s mnoha parametry, které ho mohou ovlivnit. Na základě uvedených přístupů jsem se rozhodl realizovat zařízení, které používá průběžný pásek. Toto zařízení využívá fakt, že u obnovující se elektrody je místo řezu stále ve stejné pozici a není ovlivněno opotřebením elektrody. Mohutnost pásku by oproti drátu měla zajistit zvýšení efektivity obrábění.

3. Předpoklady a cíle disertační práce

Předkládaná disertační práce řeší dvě hlavní témata týkající se zlepšení možností výroby EDM mikroelektrod pomocí drátořezného obrábění.

První z témat mé disertační práce se zabývá myšlenkou zvýšení produktivity drátového EDM obrábění využitím pásku na místo pouhého drátu. K tomuto účelu zkonstruuji a vyrobím originální zařízení. Toto zařízení bude používat místo klasického drátu s průřezem kruhu drát o průřezu obdélníku (pásek), který bude pomocí pevných kovových vodiček veden do místa řezu. Cílem práce je otestovat funkčnost zařízení a jeho efektivnost. K experimentům budu používat měděný pásek o průřezu 0,1 mm x 10 mm.

Zařízení bude pracovat ve dvou režimech. Prvním režimem je obrábění plochou stranou pásku. Účinná plocha drátu o průřezu obdélníku 0,1 mm x 10 mm je cca stokrát vyšší než plocha drátu o průřezu 0,1 mm. Předpokladem tedy je, že pomocí zvýšení účinné plochy drátu bude dosaženo většího počtu náraz probíhajících výbojů a tím se zvýší i úběr materiálu.

V druhém režimu bude pásek natočen kolmo k řezu. V tomto případě by styková plocha mezi nástrojem a obrobkem sice nebyla zvýšena. Předpokladem ale je, že zvýšení příčného rozměru drátu umožní zvýšení parametrů řezání tzn. proudu, napětí a poměru on-time / off-time EDM stroje. Pokud dojde u klasického drátu k překročení kritických hodnot těchto parametrů, může totiž dojít k přetržení drátu, což rapidně snižuje produktivitu, kvůli opětovnému navlékání drátu. Mým cílem je zvýšení úběru materiálu a zvýšení rychlosti řezání páskem oproti použití drátu.

Dalším tématem, kterým se v této práci budu zabývat, je obrábění elektrod pro mikroobrábění. Pro tento účel zkonstruuji a vyrobím drátořezné zařízení. Toto drátořezné zařízení se bude připínat k stolu EDM stroje Sodick APL1 a bude umožňovat obrábění různých typů elektrod, které bychom bez něj vyrábět nemohli. Pomocí drátořezného zařízení bude možno vyrábět elektrody například mnohoúhelníkových tvarů, elektrody s různými šterbinami apod.

Při realizaci takto zkonstruovaného drátořezu je problémem vysoká cena vodiček drátu, která jsou obvykle vyrobena z rubínu nebo diamantu. Rozhodl jsem se proto zamyslet se nad otázkou, jestli by nebylo možné tuto vodítka nahradit jiným levnějším typem. V rámci této disertační práce navrhnu nové typy vodiček a experimentálně ověřím, zda-li je možné s jejich použitím úspěšně vyrábět elektrody pro mikroobrábění.

Výzkumným úkolem bude otestovat realizovatelnost a funkčnost tří nových typů vodiček drátu, které zajišťují konstantní polohu drátu při obrábění. Zkoumaná vodítka budou postupně realizována jako vyerodovaná V drážka. Druhý typ bude tvořen dvojicí na sebe kolmých čepů. Třetí typ bude vytvořen pomocí vysoustruženého osazení.

Toto nové řešení otestuji z pohledu vlivu na šířku obrobené drážky a vlivu opotřebení abrazí.

4. Experimenty s novými typy vodítek

Tato kapitola popisuje dvě originální zařízení, které jsem zkonstruoval a vyrobil. Pomocí těchto zařízení jsem posléze testoval funkčnost tří typů nově navržených vodítek pro EDM drátové řezání. V prvních třech podkapitolách popisují nejprve stroje a přístroje, které jsem použil při experimentech, a dále pak konstrukci mnou vyrobených zařízení. V dalších podkapitolách jsou pak popsány experimenty, které jsem prováděl pro ověření funkčnosti nově navržených vodítek a zhodnocení těchto experimentů.

4.1 Použitá zařízení

Pro experimenty byla použita elektroerozivní hloubička Sodick AP1L. Pro zobrazování a měření výsledků byl použit mikroskop Karl Zeiss, rozšířený o zobrazovací systém Navitar Zoom 6000. Pro vyhodnocení abraze vodítek byl použit konfokální mikroskop Olympus. Všechny tyto stroje a přístroje jsou popsány v následující kapitole.

4.1.1 Sodick AP1L

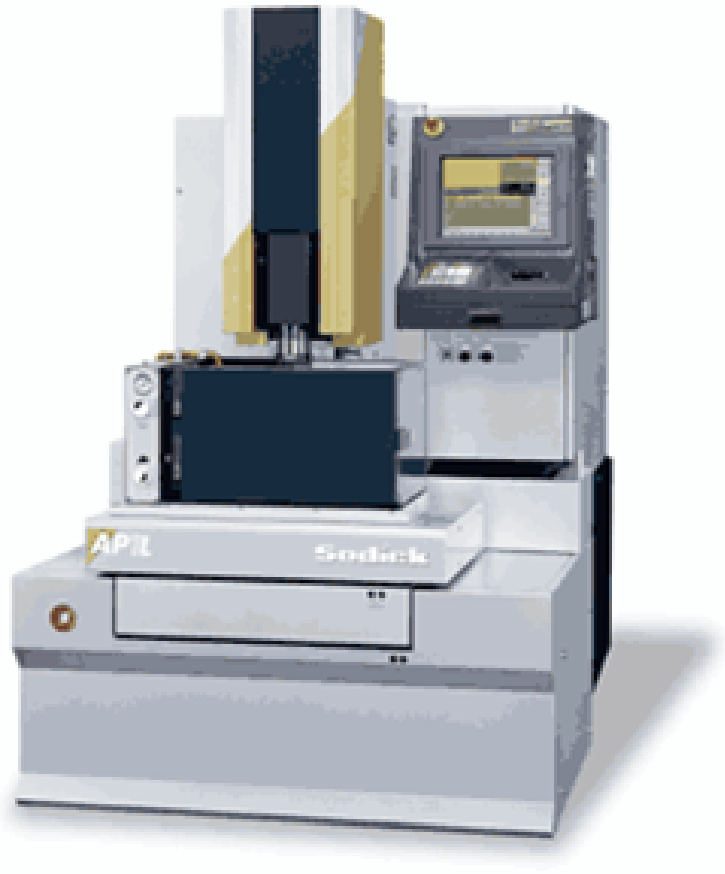
Pro elektroerozivní obrábění je náš odbor vybaven elektroerozivní hloubičkou Sodick AP1L (obr. 4.1[1]). Základní technické parametry stroje jsou zobrazeny v tabulce 4.1. Stroj je schopen pracovat s vysokým rozlišením polohy. Výrobce udává opakovatelnost polohování 1 mikrometr. Rozlišení polohování je na desetiny mikrometru. Stroj je také opatřen rotací osy C, která dosahuje rychlosti až 2000 otáček za minutu. Stroj je osazen pneumaticky odpruženou osou Z, umožňující rychlejší jump cyklus.

| | |
|--|-----------------|
| X/Y/Z pojezdy os (mm) | 200 x 120 x 200 |
| Velikost pracovního keramického stolu (mm) | 360 x 220 |
| Rozměry pracovní nádrže (mm) | 503 x 349 x 250 |
| Hladina kapaliny v pracovní nádrži (min max, mm) | 80 200 |
| Max. hmotnost obrobku (kg) | 25 |
| Max. hmotnost elektrody (kg) | 5 |

Tabulka 4.1: Parametry stroje Sodick AP1L

Při obrábění pomocí tohoto stroje je nutno věnovat pozornost parametrům obrábění.

- **PL - polarita** - Určuje polaritu elektrody upnuté do vřetena stroje. Pro většinu operací se používá kladná polarita. Kladná polarita zpravidla znamená menší úběr elektrody upnuté do vřetena a větší úběr materiálu obrobku. Záporná polarita se používá hlavně pro finišovací operace a dosahuje se při ní lepšího povrchu.



Obrázek 4.1: Hloubička Sodick AP1L

- **ON - on time** - Určuje délku zapnutí zdroje během obráběcího cyklu. Na stroji Sodick AP1L je ještě před údajem o délce zapnutí číslo 0 - standartní obrábění , nebo 1 - vyšší jakost povrchu. Čím déle trvá zapnutí zdroje, tím větší je energie pulzu a tím větší je i jiskrová mezera a rychlejší úběr materiálu.
- **OFF - off time** - Určuje délku vypnutí zdroje mezi jednotlivými výboji. Tato doba je nutná k odplavení nečistot a znovuobnovení vlastností dielektrika. Během tohoto času nedochází k úběru materiálu a je tedy vhodné snažit se o jeho zkrácení.
- **IP - maximální vybíjecí proud** - Spolu s časem on time se nejvíce podílí na určení množství energie výboje. Proud se u stroje APL1 pohybuje v rozmezí 7 mA - 7,7 A. Při nastavení tohoto parametru je nutno dbát i na ostatní parametry, jelikož stejná hodnota IP může u různého nastavení dalších parametrů dodávat jiný proud. Přesné hodnoty je nutno najít v manuálu stroje. Pro jemné detaily je nutné mít co nejnižší proud. Při mikroobrábění je proto proud nastaven vždy na 000.0.
- **S - rychlost serva** - Určuje rychlost servomotoru. Pokud bude rychlost servomotoru malá, bude i pomalejší obrábění. Příliš velká rychlost serva může způsobit vibrace a nestabilitu obráběcího procesu.

- **V - hlavní napětí** - Určuje napětí před započítáním výboje. Po započítání výboje se napětí zpravidla sníží, hodnotu napětí při výboji určuje parametr SVC. Hlavní napětí se výrazně podílí na výši energie výboje.
- **UP, DN, JS - parametry jump cyklu** - Určuje parametry Jump cyklu. Jump cyklus je používán při hloubení, jedná se o pohyby v ose Z, které zajišťují vyplachování nečistot. Parametr UP udává dobu zvednutí elektrody a parametr DN dobu jejího spuštění. JS určuje rychlost skoku.
- **LNS, STEP, LS, LNM - nastavení Loran** - Určuje parametry pro Loran. Loran je funkce pro obíhání kolem osy X a Y. Jedná se o takzvaný orbiting, tedy způsob pro vyplachování třísek. Pomocí orbitingu je možné dosáhnout ostré rohy, jelikož jsou využívány i hrany obráběcí elektrody.
- **další parametry** - Pro obrábění je možné nastavit ještě několik dalších parametrů. Podmínky jsou většinou předem určeny pro různé kombinace slitin a tak se při obrábění většinou používá již ověřené nastavení.

Pro nastavení podmínek se často používá grafické rozhraní LN Assist, kde operátor vybere materiál nástroje a elektrody, promítnutou plochu obrábění a další možnosti. Program LN Assist pak vygeneruje optimální podmínky sám.

4.1.2 Mikroskop Karl Zeiss

Pro zobrazování vyrobených elektrod a obrobků byl použit mikroskop Karl Zeiss (obr. 4.2). Inventární číslo tohoto mikroskopu je ČVUT FSI/ZP 7804. Tento mikroskop slouží pro rychlé ověření vyrobených výrobků. Lze na něm i měřit, jelikož je osazen digitálním odměřovacím systémem ve všech třech osách. Při recalibraci mikroskopu bylo zjištěno, že nejistota odečítání polohy na digitálním indikátoru činí +/- 1,5 mikrometru v celém rozsahu měřicí plochy 150 x 250 mm².

4.1.3 Zobrazovací systém Navitar Zoom 6000

V rámci modernizace byl mikroskop Zeiss dovybaven paralelním zařízením pro snímání obrazu předmětu Navitar Zoom 6000. Jde o makroskop s předsádkou umožňující proměnné zvětšení od 0,5x až 12x, které zobrazuje předmět na 2MP BW kameru USA 3.0 Imaging Source DMK 23U274. Tento makroskop je možné použít pro fotodokumentaci vzorků, ale také pro jejich měření s využitím pracovních pohybů a odečítání polohy mikroskopem Zeiss nebo vyhodnocování rozměrů přímo z obrazových dat pomocí SW IC_Measure s nejistotou +/- 3 mikrometry. Inventární číslo je ČVUT I3-12100327/000.

4.1.4 Konfokální mikroskop Olympus Lext 3000

Konfokální laserový rastrovací měřicí mikroskop, je osazen několika objektivy s rozsahem zvětšení 120x až 1400x. Konfokální mikroskop netvoří obraz vcelku, nanejvýš, ale řádkováním optických řezů v ose Z. Obraz je vždy zaměřen díky inteligentnímu softwarovému zaměřování ohnisek. Servopohon mikroskopu odměřuje přesné kroky mezi jednotlivými snímky a následným spojením jednotlivých řezů vznikne 3D obraz součásti.



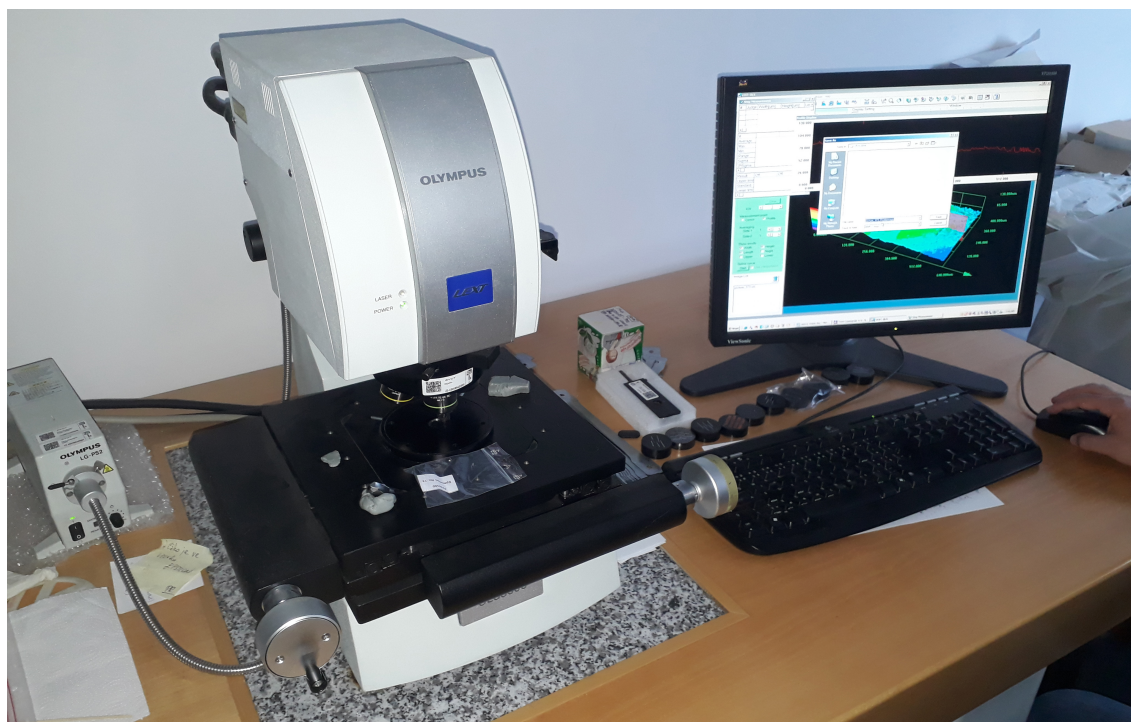
Obrázek 4.2: Mikroskop Karl Zeiss

4.2 Drátořezné zařízení s inovativními ocelovými vodítky

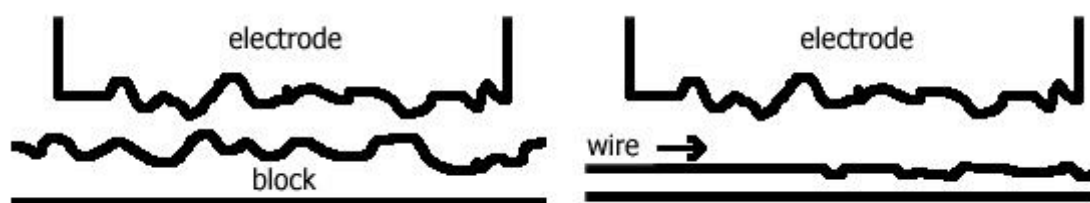
Tato kapitola se soustředí na otázku, zda-li je možné vyrábět elektrody pro mikroobrábění na drátořezném zařízení osazeném speciálními kovovými vodítky.

Na našem odboru se zabýváme mikroobráběním těžko obrobitelných materiálů. K tomuto účelu používáme EDM hloubičku Sodick AP1L. Pro přípravu elektrod jsme byli omezeni faktem, že jsme neměli drátořezné zařízení pro přesnou výrobu například čtvercových a mnohoúhelníkových elektrod. Rozhodl jsem se vyrobit zařízení pro přípravu elektrod. Dosud jsme používali pro přípravu obráběcích elektrod pevného kamene. Příprava elektrod pomocí kamene má jednu zásadní nevýhodu a to nestálost tvaru kamene v průběhu obráběcího procesu. Porovnáním použití kamene a drátu se zabývá můj článek [66].

Na obr. 4.4[66] vidíme principiální srovnání těchto dvou metod. Vlevo je vyobrazeno obrábění blokovou elektrodou. Je zde vidět, že bloková elektroda (obr. 4.5[66]) se hned po začátku obrábění začíná opotřebovávat. Po opotřebení elektroda změni svůj rozměr, obrábění probíhá na jiném místě a výsledný tvar obrobku tak záleží na tom, jak se kámen opotřebil. Opotřebení je sice možné zmírňovat pomocí rotace elektrody, nebo vhodného nastavení polarity a dalších parametrů napájecího zdroje. U obrábění kamenem ale není tím pádem možné připravit přesnou velikost elektrody. Elektroda musí být neustále odměřována, což způsobuje značné zvýšení časové náročnosti obrábění.



Obrázek 4.3: Konfokální mikroskop Olympus Lext 3000



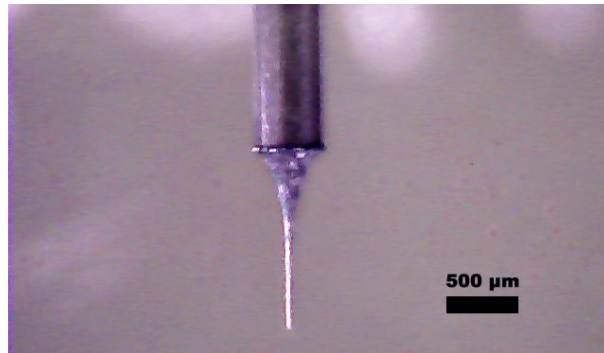
Obrázek 4.4: Principiální srovnání blokové a drátové elektrody

Oproti tomu drátová elektroda (obr. 4.4[66]) vpravo je po obrobení odvinuta a v místě obrábění je tedy vždy nově obnovená elektroda stále stejného tvaru. Tím pádem není nutné odměřovat jak velkou elektrodu člověk vyrobil. Pro výrobu přesného rozměru stačí pouze započítat předpokládanou jiskrovou mezeru. Ta je při obrábění určena především parametry elektrického zdroje a je proto velmi snadno předpokládatelná. Drátová elektroda je také vhodná pro výrobu mnouhóhelníkových tvarů a výrobu štěrbin. Nakonec i k výrobě komplexnějších součástí jako například šroubovic za pomoci polohovacího systému EDM stroje.

4.2.1 Požadavky na konstrukci zařízení

Drátořezné zařízení pro výrobu elektrod musí splňovat několik základních požadavků.

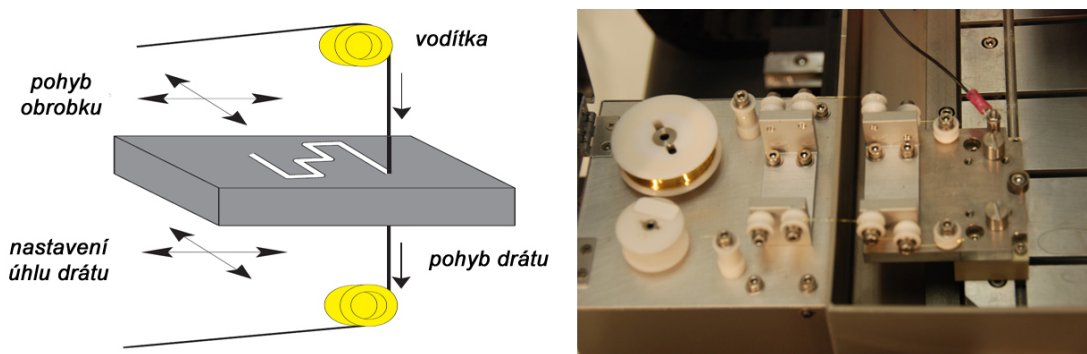
- Drát musí být dostatečně napnut, aby co možná nejméně měnil svou pozici a místo řezu zůstávalo stále stejné
- Je nutné zajistit dostatečnou a nastavitelnou rychlost navíjení drátu, tak aby se drát netrhal a bylo možné použít více různých průměrů drátu



Obrázek 4.5: Válcová elektroda vyrobená pomocí pevného kamene

- Přesné vedení drátu do místa řezu, zajištěné pevnými přesnými vodítky
- Malé rozměry, které umožní osazení zařízení na stroj Sodick APL1
- Zajištění vodivého spojení drátu a stolu stroje Sodick APL1

Inspiraci pro výrobu zařízení jsem čerpal převážně u zařízení firmy Smaltec EM203 (obr. 4.6[60]), jedná se o zařízení pro výrobu elektrod.



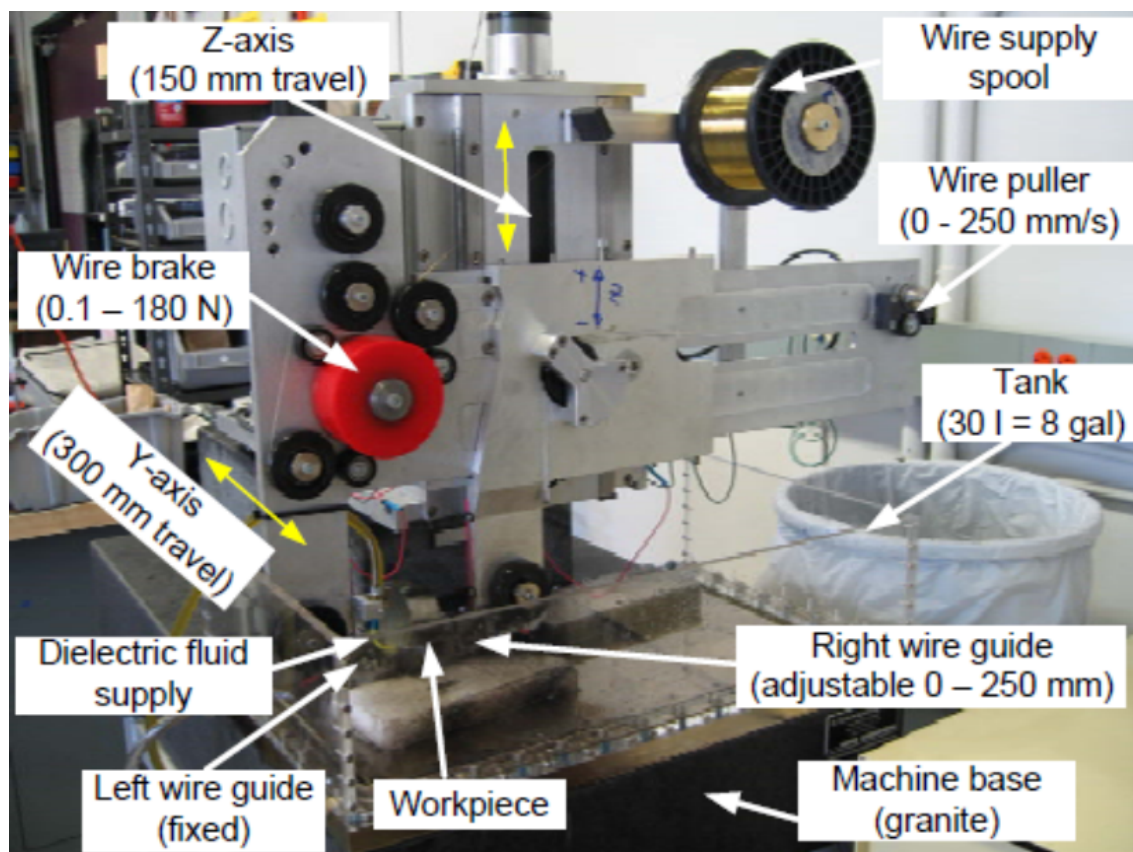
Obrázek 4.6: Drátřez pro přípravu elektrod pro mikroEDM

Navíjecí část s motorem a brzdou je umístěna mimo obráběcí vanu stoje. Soustava pro řezání je umístěna uvnitř vany. Drát je převinut na speciální menší špulku, zařízení tedy není možné osadit běžnými sériově vyráběnými špulkami.

Další zajímavé zařízení je vyobrazeno na obr. 4.7[61]. Toto zařízení je výrazně větší a má i sofistikovanější řízení rychlosti a napínání drátu. Systém pro napínání drátu je osazen elektromagnetickou brzdou, brzdící síla může být nastavena v rozmezí 0,1 - 180 N. Tato elektromagnetická brzda má velice klidný chod a zajišťuje stabilní brzdový moment. Systém je dále osazen motorem s řízením rychlosti navíjení drátu a odměřováním napětí v drátu.

4.2.2 Konstrukce a výroba drátořezného zařízení

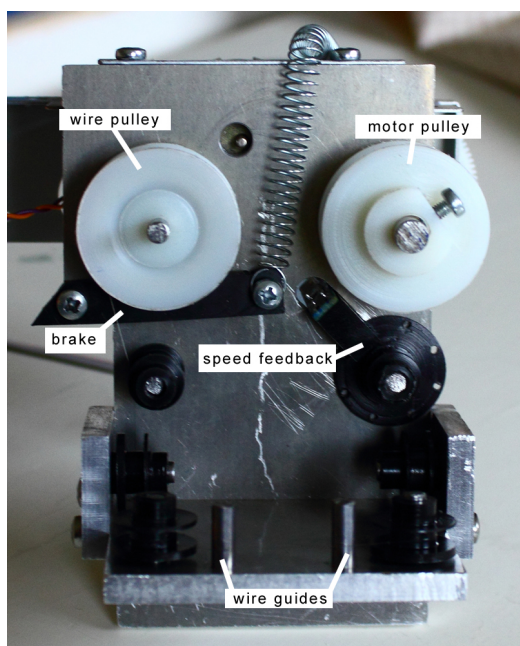
Pro konstrukci vlastního zařízení jsem použil kombinaci vlastností dvou zařízení z předešlé kapitoly. Omezujícími parametry pro mě byly malé rozměry a v neposlední řadě také nízká cena celého zařízení. Jako drát jsem zvolil drát o průměru 50 mikrometrů z wolframu. Wolframový drát je vhodný díky vysokého bodu tání



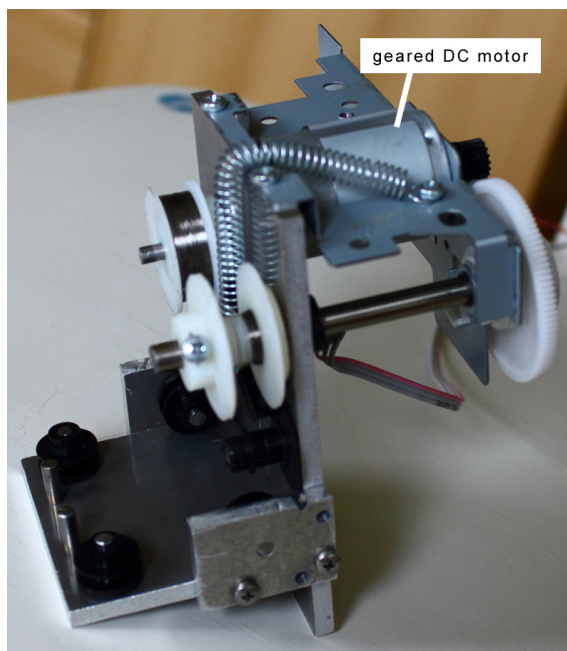
Obrázek 4.7: Robustnější drátořezné zařízení

a vysoké pevnosti wolframu. Tím pádem může být drát napnut poněkud více, než například drát mosazný. Vyšší napětí v drátu pak sníží odchylky polohy, které by mohly vzniknout kmitáním drátu, nebo působením elektromagnetických a povrchových sil mezi obrobkem a drátem. Tento 50 mikrometrový drát je vhodný právě pro mikroobrábění, jelikož průměr drátu určuje nejmenší možný obrobitelný radius. S tímto drátem je tedy možno vyrobít radiusy od velikosti cca. 30 mikrometrů. Nejmenší obrobitelný radius vznikne totiž součtem průměru drátu a mezery nutné pro obrábění, která se v závislosti na parametrech zdroje pohybuje přibližně mezi pěti a dvaceti mikrometry. Pro další experimenty jsem také používal drát průměru 100 mikrometrů. Tento drát byl vyroben z ocelového jádra a mosazného povlaku. Jelikož plocha tohoto drátu je 4 krát větší, než plocha drátu 50 mikrometrového, nedochází u něj k tak častému přetrhávání. Obráběcí složkou je mosazný povlak, který využívá vhodných teplotně-vodivostních vlastností mosazi. Radiusy, které je možné vyrobít s tímto drátem, se pohybují od velikosti 55 mikrometrů.

Pro navíjení drátu jsem použil stejnosměrný motor vymontovaný z inkoustové tiskárny. Motor je převodován a převodový poměr vyhovuje požadavkům na výslednou rychlost navíjení drátu. Převodovka je také ze stejné tiskárny Canon PIXMA IP4850. Převodovka je tvořena pastorkem s 16 zuby, dvoukolem s čelním ozubením s 52 a 40 zuby a kolem s čelním ozubením na výstupní hřídeli se 112 zuby. Ozubená kola jsou vyrobena z polyamidu. Z rovnice 4.1 je patrné, že celkový převodový poměr pro rychlost je 0,1099 .



Obrázek 4.8: Drátořez zepředu



Obrázek 4.9: Drátořez ze strany

$$C = z_1/z_2 * z_3/z_4 = 16/52 * 40/112 = 0,1099 \quad (4.1)$$

C .. celkový převod

z_{1-4} .. počty zubů jednotlivých kol Dojde tedy k cca devítinásobnému zpoma-

lení, což je již přijatelná rychlost pro odvíjení drátu. Rychlost odvíjení se pohybuje v rozmezí 0-6 m/min.

Rychlost motoru může být regulována pomocí změny napětí na jeho svorkách. Jmenovité otáčky jsou dosaženy při hodnotě napětí 24 V. Snížením tohoto napětí můžeme snižovat i rychlost 4.2.

$$U - U_e = K_e * \omega \quad (4.2)$$

U .. napětí zdroje

U_e .. elektromotorické napětí vznikající indukci proudu proti směru pohybu

K_e .. konstanta motoru

ω .. úhlová rychlost motoru

Pro regulaci rychlosti pomocí změny napětí se nabízí dva přístupy. První je použití pulzně šířkové modulace vstupního napětí. K tomuto přístupu by bylo zapotřebí mikropočítače nebo nějakého elektronického obvodu. Jelikož jsem měl k dispozici napěťový zdroj s již vestavěnou regulací, použil jsem tento nastavitelný zdroj napětí. Jmenovité napětí stejnosměrného motoru je 24 V. Toto napětí by se nemělo překračovat na příliš dlouho, aby nedošlo k spálení motoru. Používané otáčky ovšem odpovídají napětím okolo 10 V, takže použitý motor plně vyhovoval požadavkům drátořezu. Rychlost navíjení drátu se pohybuje v rozmezí 0 - 6 m/min.

Dalším členem soustavy pro navíjení drátu je kladka pro odměřování rychlosti. Inkrementální rotační čítač, který je připevněn k této zpětnovazební kladce,

udává počet otáček za minutu, nebo vteřinu. Jelikož u této aplikace stačí znát rychlost s poměrně velkou tolerancí, nebylo nutné použít průmyslového enkodéru. Namísto enkodéru jsem použil pouze optozávoru TCST 2103 (obr. 4.10[62]), která přemostuje kolečko vyrobené z polyamidu.

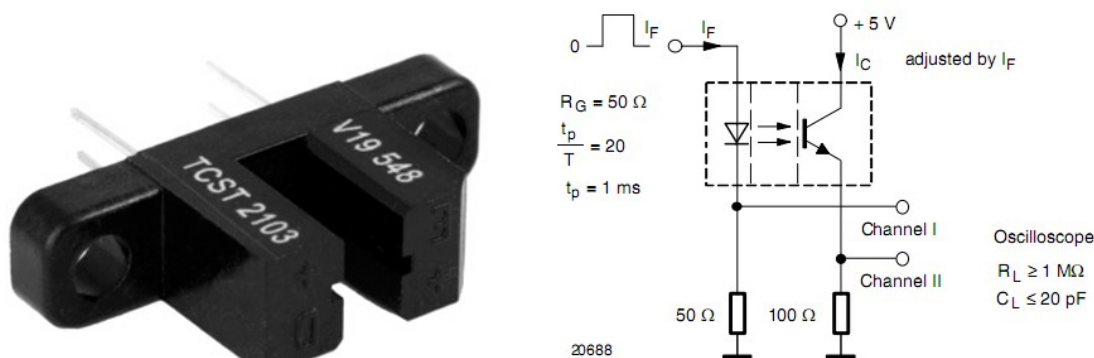


Fig. 2 - Test Circuit for t_{on} and t_{off}

Obrázek 4.10: Optozávora TCST 2103 pro odečítání rychlosti a schéma jejího zapojení

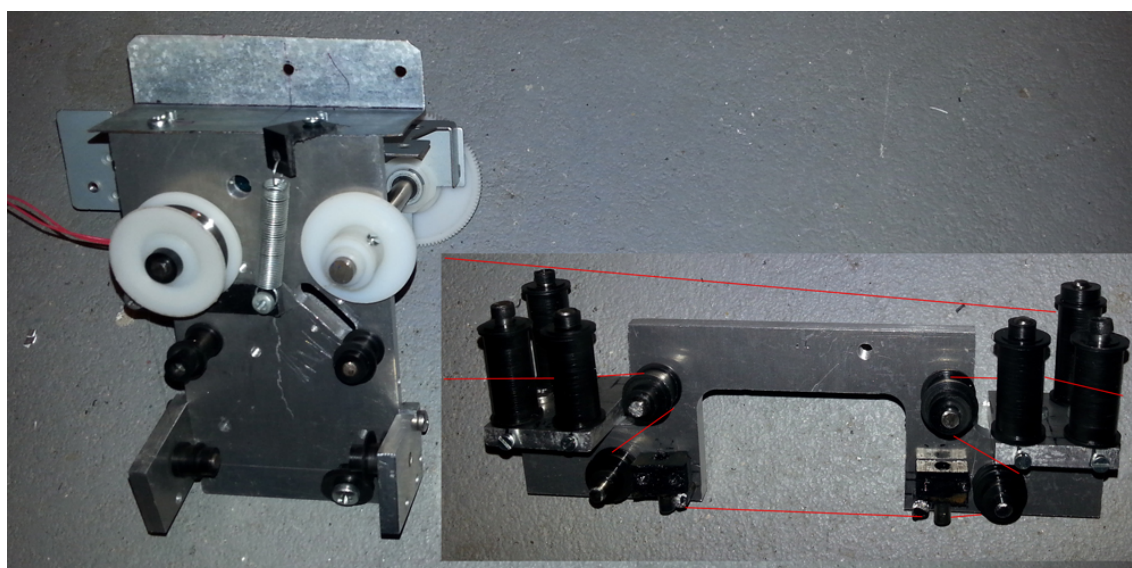
Pulzy z optozávory jsem pak odečítal pomocí obvodu, který jsem měl z jiné aplikace. Otáčky jsem nastavoval ručně pomocí regulovatelného zdroje. Další možností by byl automatický řídicí obvod, který by sám otáčky reguloval podle zpětné vazby, ten jsem ale u této aplikace nepoužil. Počet otáček se u této zpětnovazební kladky pohybuje v rozmezí 0-200 otáček za minutu a rychlost drátu je tím pádem 0-6 m/min. Jelikož bylo nutné, aby se celé zařízení vešlo do prostoru pracovní vany stroje Sodick AP1L, nebylo možné použít sériově dodávané špulky s drátem. Drát musel být pečlivě navinut na vlastní polyamidovou špulku. Drát musel být navinut velmi rovnoměrně, aby se při odvíjení zařízení nezadrhávalo. Zadrhávání by totiž mohlo výrazně snížit jeho výkonnost. Pro navíjení jsem zhotovil speciální přípravek, který drží drátořez i odvíjenou špulku v klidu a navíjení může probíhat rovnoměrně. Pro brždění, tedy napínání drátu je možno použít elektromagnetické brzdy. Jedná se vlastně o stejný motor, jako je motor navíjecí, a společným elektronickým řízením je možno dosáhnout požadovaného napětí a požadované rychlosti odvíjení drátu. Celý tento řídicí systém je ale poněkud složitý. Proto jsem se rozhodl použít pouze jednoduchou třecí brzdou. Tato třecí brzda se skládá z polyamidového hranolu, který je pomocí pružiny přitlačován na brzdnu kladku. Tato brzdná kladka je zároveň odvíjecí špulkou s navinutým drátem. Mírnou nevýhodou této brzdy je nárůst brzdného momentu při rozjezdu drátořezu, brzdný moment při pohybu je ovšem dostatečně rovnoměrný. Tato brzda se dá jednoduše nastavovat pomocí prodloužení nebo zkracování napínací pružiny. Rám zařízení je vyroben ze dvou na sebe kolmých hliníkových desek. Dále jsou zde ještě dvě podpůrné menší desky. Tloušťka těchto desek je 5mm. Do těchto desek jsou nalisovány ocelové hřídelky, které drží vodící kladky. Kladky jsou z materiálu POM a mají vhodné kluzné vlastnosti při styku s ocelovými hřídelkami, které jsou zaručeny samomazným spojením plast-kov. Kladky jsou rozmístěny tak, aby eliminovaly rozdílnou polohu drátu při různém stupni odvínutí odvíjecí špulky. Kovové tělo drátořezu umožňuje jeho jednoduché připojení k

EDM stroji, jelikož k zajištění vodivého spojení jej stačí položit na kovový vodivý stůl stroje.

4.2.3 Konstrukce a výroba nástavce do vřetena

Po úspěšné realizaci a otestování fixního zařízení jsem se rozhodl realizovat modifikovanou verzi, která již není fixní, ale zcela pohyblivá se čtyřmi pracovními osami ve vřetenu stroje s pracovními rozsahy.

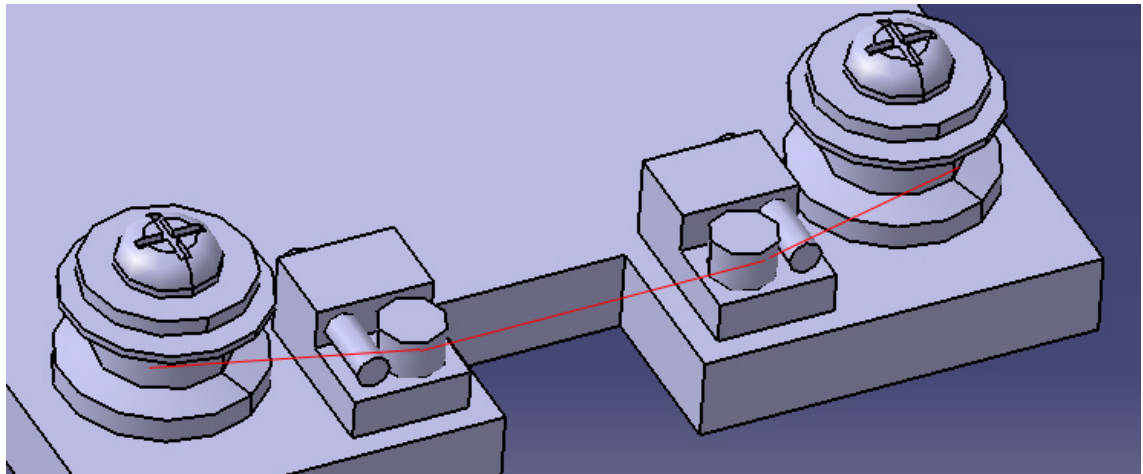
Drátořezné zařízení, které obrábí elektrody upnuté ve vřeteně hloubičky, jsem rozšířil o nástavec, který se upíná do vřetena stroje a obrábí elektrody nebo obrobky upnuté na stole hloubičky. Zásadní problém byl zajistit natáčení nástavce tak, aby umožňoval natáčení okolo osy vřetena. Použil jsem zde zajímavé řešení, aby bylo možné vřeteno natáčet a obrábět pod různými úhly (obr. 4.11).



Obrázek 4.11: Otočný nástavec pro obrábění obrobků na stole hloubičky

Zásadní problém byl zajistit natáčení nástavce, tak aby umožňoval natáčení okolo osy vřetena minimálně v rozsahu 360° . Problém bylo zajistit kontinuální přivedení a odvedení pracovního drátu z nástavce při jeho otáčení bez kontaktu drátu s kovovými částmi zařízení a bez zkrřížení obou konců drátu. To jsem vyřešil rozšířením osvědčené konstrukce pevného drátořezu [65] o čtveřici pomocných vodicích kladek. Při natáčení nástavce do směru $+180^\circ$, nebo -180° dochází k postupnému odvíjení, nebo navíjení obou konců drátu na jednotlivé pomocné kladky, takže přívodní dráty jsou vždy v určité minimální vzdálenosti vedle sebe, nikdy se nedotýkají a ani se nemohou přiblížit. Toto vyvinuté řešení je zobrazeno na obrázku 4.11 vpravo v jedné z krajních poloh. Kladky v pravé části přípravku jsou zcela využity a odvádějí přívodní drát mimo osu rotace přípravku. Naopak kladky v levé části přípravku jsou v této poloze zcela odvinuty. Tento princip tak rozšiřuje možnosti běžného 2D řezání na obecné 3D řezání tvarů, při upevnění na vřeteno s dostatečným počtem stupňů volnosti.

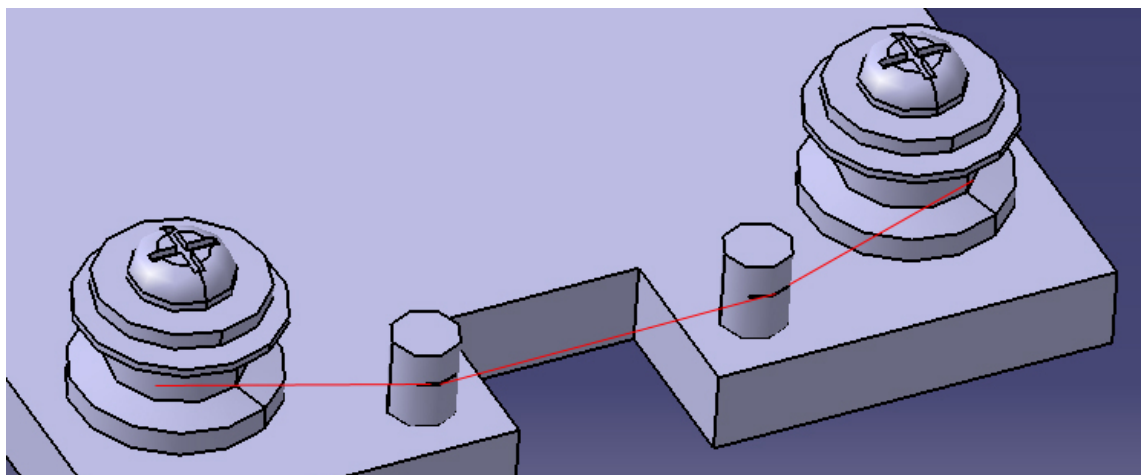
Při umístění přímo na vřeteno hloubičky by bylo celé zařízení příliš těžké a zabíralo by příliš mnoho místa. Proto je navíjecí část s motorem a brzdou umístěn na dveřích hloubičky. Dále je drát veden k vřetenovému nástavci. Na



Obrázek 4.12: Model složených vodiček

obr. 4.11 je červeně znázorněna dráha, kterou drát na nástavci prochází. Drát je přiveden na tři kladky v levé části a veden mezi nimi. Dále vede přes další dvě kladky na pevná vodítka, která jsou tentokrát řešena pomocí dvou na sebe kolmých ocelových hřídelek (obr. 4.12) tvořících dohromady vodítko ve tvaru pravoúhlého trojúhelníku. Kladky jsou umístěny tak, aby se drát při napnutí opíral o vnitřní hranu vzniklého pravého úhlu. Drát pak pokračuje na druhé vodítko a přes symetricky řešenou druhou část kladek odchází směrem k navíjecí části umístěné na dveřích.

4.2.4 Pevná vodítka

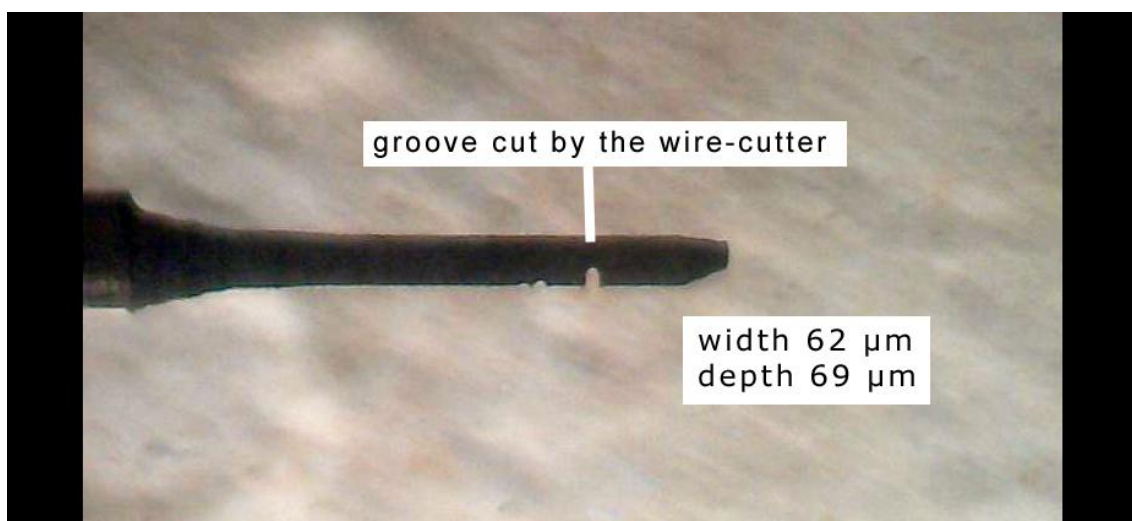


Obrázek 4.13: Model vodiček s V drážkou

Průvlačná vodítka dodávaná výrobcí strojů jsou dosti drahá (vodítka od výrobců stojí cca. 3000 Kč za kus) a pro každý průměr drátu je nutno zakoupit jiná vodítka. Životnost těchto vodiček je ale velmi dlouhá a v průmyslových aplikacích se proto vyplatí do nich investovat. Pro experimentální použití jsem se rozhodl použít vodítka jiného typu a ověřit, zda-li je možné s takovými vodítky úspěšně nahradit vodítka průmyslová. Postupně jsem s tímto zařízením používal dva typy

vodítek. Pro výrobu prvního typu jsem nalisoval dvě ocelové struny o průměru 4mm do spodní desky drátořezu. Poté jsem pomocí úzké elektrody udělal do těchto ocelových tyček zářezy o velikosti 200 mikrometrů na okraji. Tyto zářezy se zužovaly ve tvaru V a je v nich tedy možné používat drát až do průměru 200 mikrometrů. Oba zářezy jsem dělal najednou, aby byly oba v jedné ose (obr. 4.13).

S těmito vodítky jsem poté vyzkoušel několik prvních řezů. Podařilo se mi vyříznout drážku do válcové elektrody (obr. 4.14[65]). Drážka měla šířku 62 mikrometrů, což při použití padesáti mikrometrového drátu znamenalo jiskrovou mezeru 6 mikrometrů.



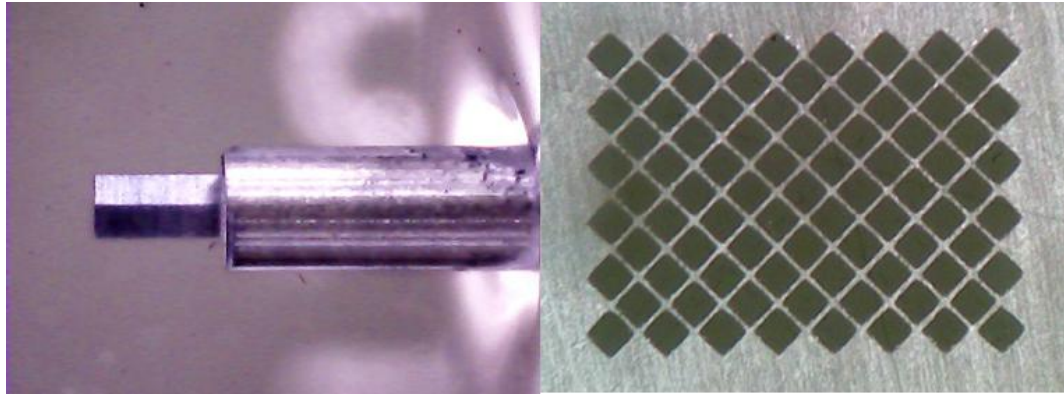
Obrázek 4.14: První drážka vytvořená drátořezem

Na obrázku 4.15 je již funkční elektroda použitelná k hloubení obdélníkové drážky. Elektroda byla vyrobena za použití wolframového drátu a má šířku 0,1 mm a délku 1 mm. Výroba této elektrody ukazuje, že drátořez funguje při použití speciálních ocelových vodítek s V drážkou. Drát se na vodítkách nepohybuje a nedochází ke změnám poloh drátu. Na obrázku 4.15 vidíme mírné zmenšení šířky elektrody, to je způsobeno mírně šikmým upnutím elektrody ve vřetenu stroje.



Obrázek 4.15: Elektrody

Na obrázku 4.16 vidíme další vyrobenou elektrodu. Jedná se o čtvercovou wolframovou elektrodu dlouhou 2 mm a širokou 0,6 mm. Výroba této elektrody trvala tři hodiny a 56 minut. Pomocí této elektrody jsme poté vyrobili síť děr vyobrazenou na obrázku vpravo [68].



Obrázek 4.16: Čtvercová elektroda a výrobek

K výrobě této a jiných obdélníkových elektrod jsem napsal parametrický NC program (Příloha 1). Pro výrobu takovýchto elektrod tedy stačí do programu zadat požadovanou velikost elektrody a velikost polotovaru. Operátor dále nastaví nulovou pozici souřadnicového systému stroje na dolní roh polotovaru. Operátor pak zapne drátořez a nastaví optimální rychlost odvíjení drátu. Tím je zařízení připraveno a stroj pak pomocí programu sám vyrobí elektrodu obdélníkového průřezu s požadovanými rozměry.

4.2.5 Zhodnocení výsledků

Byl vyvinut samostatný systém pro drátové řezání a zejména pro přípravu elektrod pro mikroobrábění. Pomocí kompaktního přípravku je stroj schopen vytvářet elektrody upnuté ve vřetenu. Zařízení je vhodné zejména pro přípravu elektrod mnohoúhelníkového průřezu a elektrod se šterbinami a zářezy různých tvarů. Systém byl dále rozšířen o otočný přípravek, který se umísťuje do vřetena a obrábí obrobky na stole stroje Sodick AP1L. Systém je tedy schopen obrábět elektrody ve vřeteně a jiné obrobky na stole stroje v osách X,Y,Z a U.

Drátořezný systém byl osazen dvěma inovativními typy vodítek. Prvním typem byla ocelová vodítka s vyerodovanou drážkou. Druhým typem byla vodítka složená z dvou na sebe kolmých ocelových hřidelí.

Experimenty prokázaly, že je možné použít ocelová vodítka s V drážkou na místo běžně používaných diamantových, nebo rubínových vodítek. Stejně tak prokázaly i možnost použití vodítek vytvořených z dvou na sebe kolmo umístěných ocelových strun.

Dále bylo vytvořeno několik parametrických programů pro výrobu různých typů elektrod. Tyto elektrody byly dále použity v praxi a při psaní dalších vědeckých publikací.

4.3 Drátořezné zařízení s trubkovými vodítky

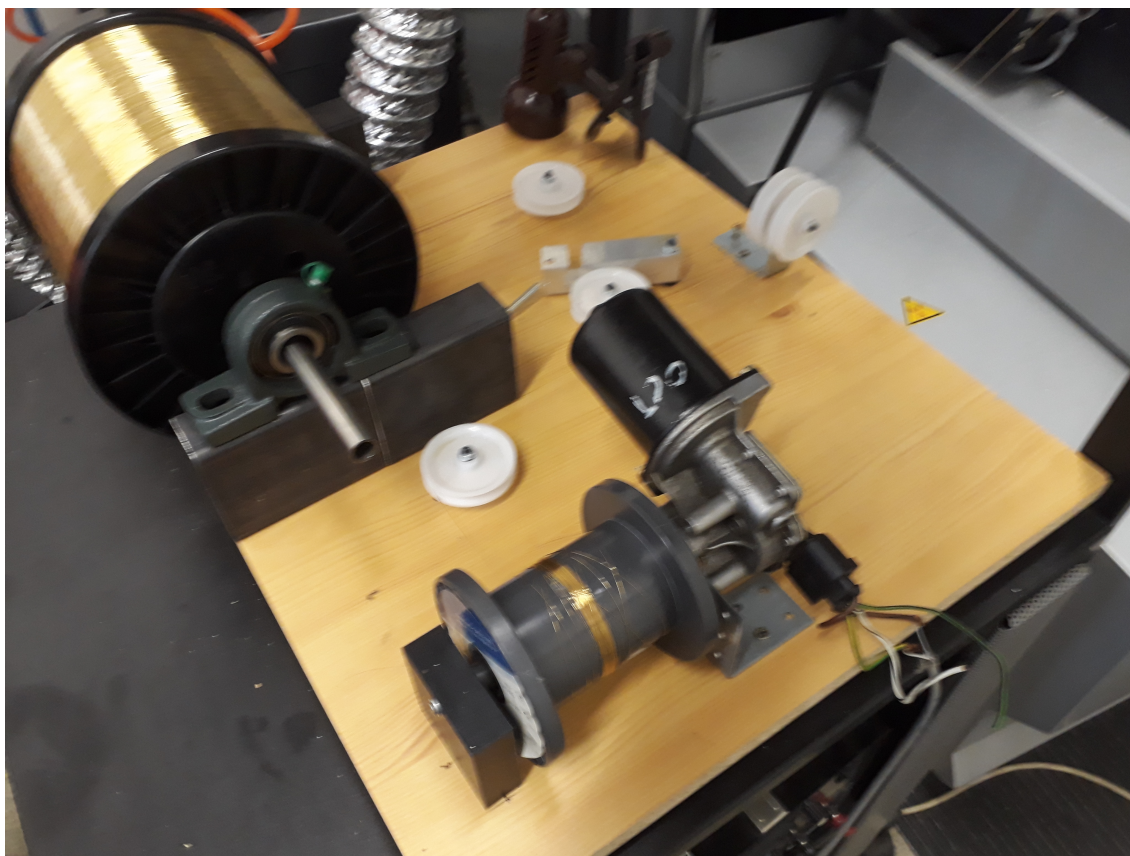
Tato kapitola popisuje drátořezné zařízení s novým typem trubkových vodítek a vyměnitelnými špulkami drátu.

4.3.1 Požadavky na konstrukci zařízení

Zařízení pro řezání drátem musí splňovat několik základních požadavků.

- Je nutné zajistit navíjení a brždění drátu
- Přesné vedení drátu do místa řezu, zajištěné pevnými, přesnými vodítky
- Konstrukce umožňující použití zařízení se strojem Sodick APL1, tak aby navíjecí a odvíjecí mechanismus byly umístěny vně stroje a řezná část uvnitř
- Dostatečně velké kladky, aby nedocházelo k deformaci drátu 0,3 mm

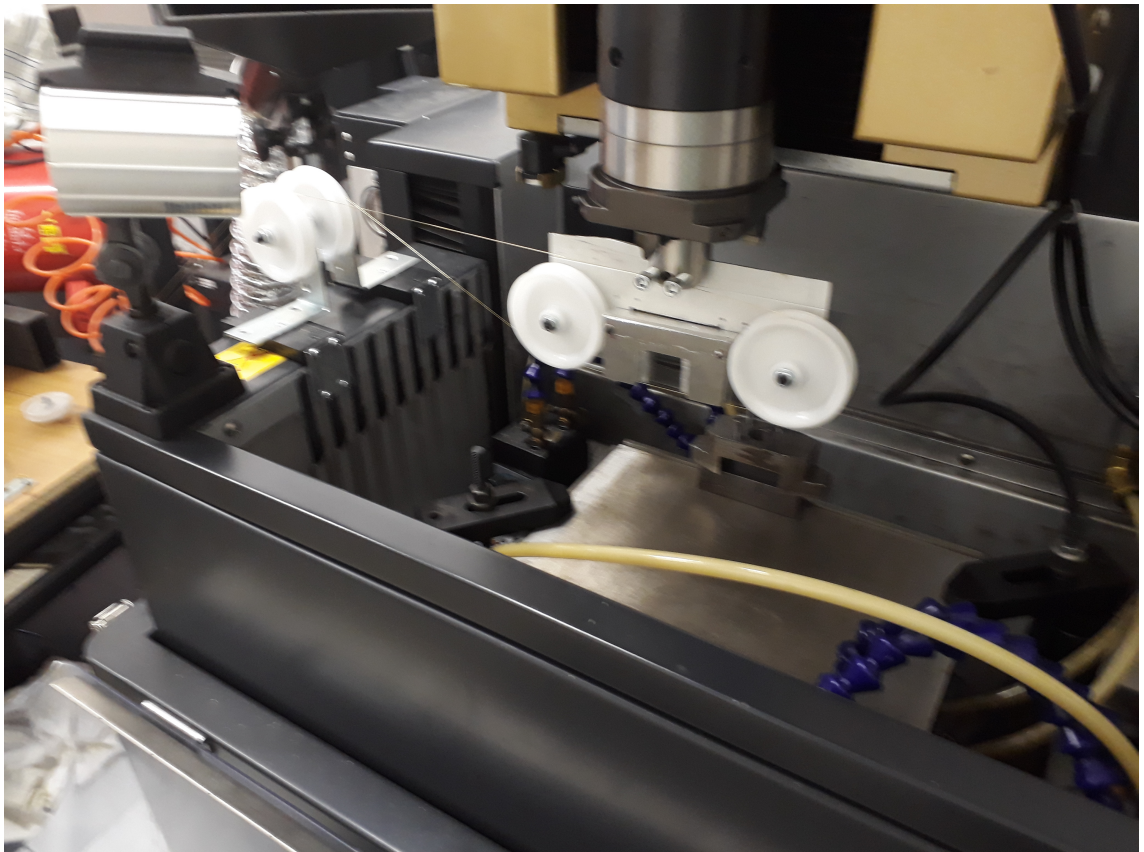
4.3.2 Konstrukce a výroba zařízení



Obrázek 4.17: Navíjecí část vyrobeného zařízení

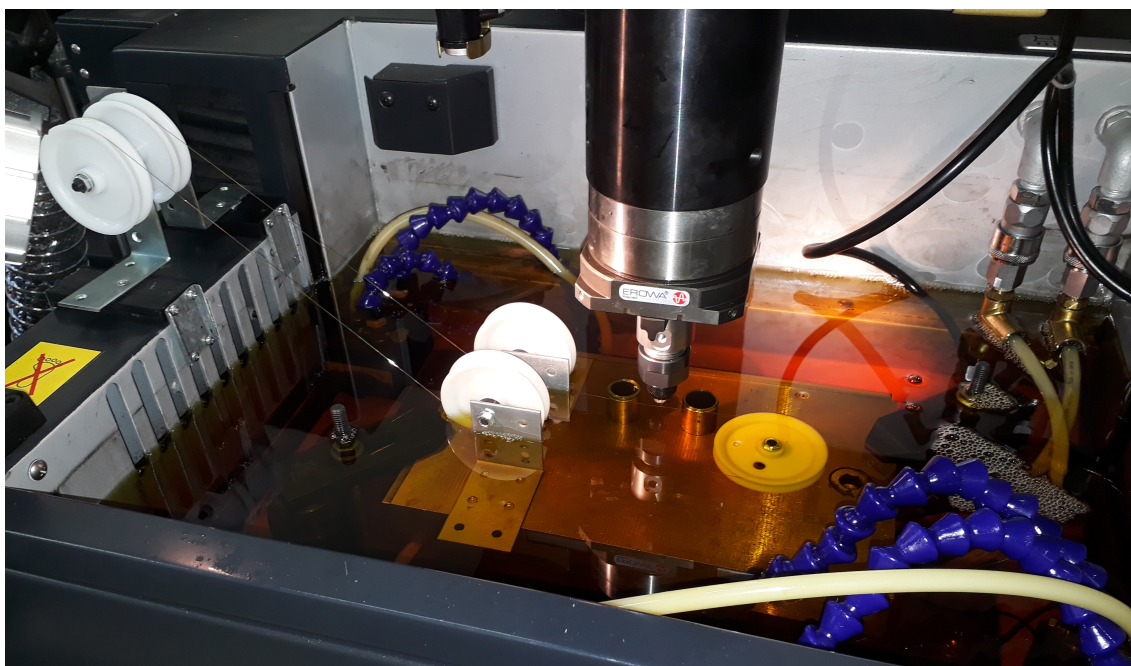
Jak vidíme z obrázku 4.17, drát o průměru 0,3 mm je dodáván v dosti velkých špulkách a není možné jej dostat do obráběcího prostoru Sodick AP1L. Z tohoto důvodu bylo nutné odvíjecí a navíjecí část umístit mimo prostor stroje. Navíjení zajišťuje jako u řezného pásu zpřevodovaný motor stěračů Škody Octavia. Jako navíjecí špulku jsem použil již vypotřebovanou špulku na pokusy s wolframovým drátem průměr 50 mikrometrů. Od této navíjecí špulky je drát veden systémem kladek přes dveře stroje dovnitř stroje k místu řezu, kde je přiveden na vřetenovou část drátořezu. Z vřetenové části je pak opět přes dveře veden systémem kladek k třecí brzdě. Třecí brzda je zkonstruována z hliníkového profilu, který brzdí jednu

z odvíjecích kladek. Na této kladce je drát vícekrát opásán, jelikož při jednom opásání v kladce prokluzoval. Drát je odvíjen z původní sériově vyráběné špulky, na které byl koupen. Tato špulka je uložena ve dvou ložiskových domečcích. Výhodou tohoto přístupu je, že se dráty dají jednoduše měnit. Drátořez je tak schopen fungovat se všemi druhy drátů.



Obrázek 4.18: Obráběcí část vyrobeného zařízení ve vřetenu stroje

Vřetenová část je vyobrazena na obr. 4.18, drát je od dveří stroje přiveden přes kladky o průměru 50 mm k místu řezu. Jelikož tyto kladky jsou dosti velké, nevejde se jich do prostoru pod vřetenem mnoho, proto jsem se rozhodl použít pouze dvě kladky. Tato konfigurace neumožňuje otáčení jako u předešlého drátořezu. Z kladek je drát veden na pevná vodítka. V tomto případě jsou vodítka vyrobená z dvou hliníkových desek, v kterých je vyfrézované okénko pro uříznutý výrobek.



Obrázek 4.19: Obráběcí část vyrobeného zařízení na stole stroje

Na obr. 4.19 je vyobrazna obráběcí část pro obrábění elektrod nebo obrobků upnutých do vřetena stroje. Drát je veden od dveří ke kladce umístěné na stole. Z této kladky pak dále pokračuje na pevná vodítka. Vodítka jsou vyrobena z nerezových trubek o průměru 20 mm. Tyto trubky jsou na horní části opatřeny osazením. Roh vzniklý osazením vytváří samotné vodítko. Drát pak odchází přes dvě další kladky zpět na dveře stroje. Drátořez je na obrázku 4.19 zobrazen při obrábění elektrody upnuté ve vřetenu. Drát je při obrábění vždy ponořen do dielektrického oleje.

4.3.3 Zhodnocení výsledků

Byl vytvořen robustní drátořezný systém, který může být osazen všemi běžnými typy drátů pro EDM řezání. Zlepšení oproti původnímu drátořeznému zařízení spočívá především ve snadné výměně drátů.

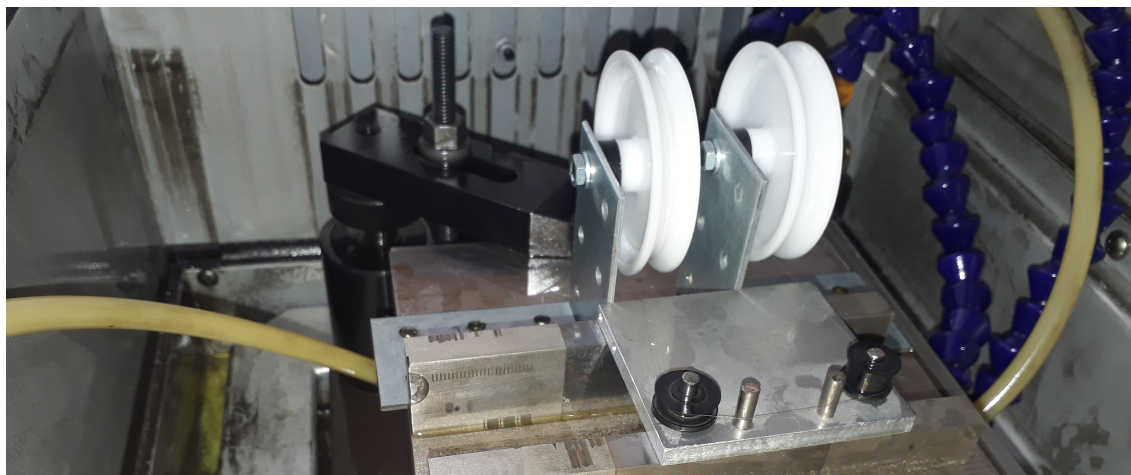
Na zařízení byla osazena nově navržená trubková vodítka, která vznikla vysoustružením osazení na ocelové trubce. Tato vodítka se dají velmi snadno polohovat na magnetickém stole stroje.

Experimenty prokázaly, že je možné použít trubková vodítka na místo běžně používaných diamantových nebo rubínových vodítek.

4.4 Ověření přesnosti vodítek

Tato kapitola se zaměřuje na posouzení přesnosti jednotlivých typů vodítek. Experimenty byly prováděny pomocí druhého drátořezného zařízení, jelikož se s tímto zařízením lépe pracuje. Do měděného pásku byly vždy vyerodovány zářezy a pak byla pomocí mikroskopu vyhodnocena šířka vyerodovaných drážek v několika hloubkách. U složených vodítek, která jsem používal nejdéle, byl dále vyhodnocen vliv abraze na přesnost obrábění.

4.4.1 Vodítka s V zářezy, drát 0,1mm



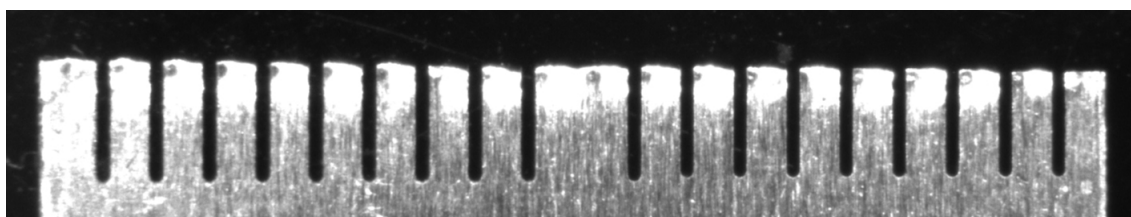
Obrázek 4.20: Experiment pro ověření přesnosti vodítek

Schématický model vodítek je zobrazen na obrázku 4.13. Pro ověření přesnosti vodítek byl proveden experiment dle obr. 4.20. Do měděného plátku o průřezu 0,1 x 10 mm bylo postupně vyerodováno 9 a 9 drážek ve směru osy Z s rozstupem 0,5mm. Drážky byly hloubeny do hloubky 1mm. Byl použit povlakovaný drát průměr 0,1 mm . Jádru drátu je z oceli, povlak je z mosazi. Podmínky hloubení byly:

Prvních 9 drážek : PL - ON 1020 OFF 0010 IP 0.000 SV 150 S 99 V 11

V druhé polovině experimentu byly zachovány obráběcí podmínky, kromě otočení polarity na +. S kladnou polaritou bylo vyerodováno 9 drážek

Cílem experimentu bylo určit odchylku šířky drážky při použití ocelových vodítek upnutých na stole stroje. Ocelová vodítka vznikla vyerodováním V drážky do ocelové struny o průměru 4 mm. Následným cílem pak bylo vyhodnotit, zda-li je tato odchylka dostatečně nízká, aby umožňovala použití takovýchto vodítek pro výrobu obrobků a elektrod. Dalším cílem experimentu bylo vyhodnotit vliv polarity na kvalitu vyerodovaných drážek.

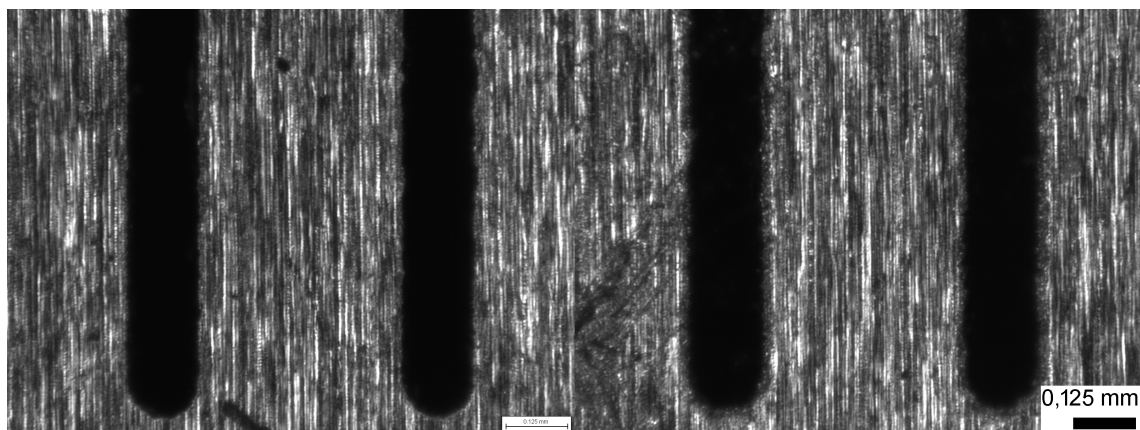


Obrázek 4.21: Celkový pohled na vyerodované drážky

Na obr. 4.21 je zobrazen celkový pohled na vyerodované zářezy pod mikroskopem. Pomocí kamery na mikroskopu a vyhodnocovacího software byly pak naměřeny hodnoty šířky drážek. Drážky jsou číslovány od 1 do 18 postupně tak, jak byly erodovány po sobě, první drážka je na obr. 4.21 vpravo. Tabulka 4.2 zobrazuje naměřené výsledky ve třech různých hloubkách štěrbin pro všech 18 štěrbin.

| | | | | |
|-------------------------|----------|----------|----------|-----------------------|
| hloubka[mm] | 0,25 | 0,5 | 0,75 | délka obrábění[min:s] |
| šířka drážky č. 1 [mm] | 0,1265 | 0,1291 | 0,1291 | 01:29 |
| šířka drážky č. 2 [mm] | 0,1330 | 0,1278 | 0,1303 | 01:29 |
| šířka drážky č. 3 [mm] | 0,1317 | 0,1278 | 0,1304 | 01:29 |
| šířka drážky č. 4 [mm] | 0,1304 | 0,1278 | 0,1252 | 01:30 |
| šířka drážky č. 5 [mm] | 0,1317 | 0,1278 | 0,1265 | 01:30 |
| šířka drážky č. 6 [mm] | 0,1278 | 0,1265 | 0,1278 | 01:30 |
| šířka drážky č. 7 [mm] | 0,1323 | 0,1278 | 0,1278 | 01:29 |
| šířka drážky č. 8 [mm] | 0,1291 | 0,1291 | 0,1266 | 01:33 |
| šířka drážky č. 9 [mm] | 0,1317 | 0,1317 | 0,1317 | 01:33 |
| Průměr | 0,1307 | 0,1284 | 0,1284 | 01:30 |
| Směrodatná odchylka | 0,002502 | 0,001470 | 0,002145 | 00:02 |
| Dolní kvartil | 0,1291 | 0,1278 | 0,1266 | 01:29 |
| Horní kvartil | 0,1323 | 0,1291 | 0,1303 | 01:30 |
| hloubka[mm] | 0,25 | 0,5 | 0,75 | |
| šířka drážky č. 10 [mm] | 0,1327 | 0,1313 | 0,1249 | 00:49 |
| šířka drážky č. 11 [mm] | 0,1371 | 0,1256 | 0,1274 | 00:49 |
| šířka drážky č. 12 [mm] | 0,1274 | 0,1288 | 0,1301 | 00:46 |
| šířka drážky č. 13 [mm] | 0,1346 | 0,1327 | 0,1301 | 01:14 |
| šířka drážky č. 14 [mm] | 0,1384 | 0,1307 | 0,1317 | 01:23 |
| šířka drážky č. 15 [mm] | 0,1314 | 0,1314 | 0,1314 | 01:09 |
| šířka drážky č. 16 [mm] | 0,1288 | 0,1275 | 0,1287 | 00:46 |
| šířka drážky č. 17 [mm] | 0,1339 | 0,1275 | 0,1301 | 00:51 |
| šířka drážky č. 18 [mm] | 0,1327 | 0,1275 | 0,1314 | 00:46 |
| Průměr | 0,1330 | 0,1292 | 0,1295 | 00:57 |
| Směrodatná odchylka | 0,003555 | 0,002386 | 0,002218 | 00:14 |
| Dolní kvartil | 0,1314 | 0,1275 | 0,1287 | 00:46 |
| Horní kvartil | 0,1346 | 0,1313 | 0,1314 | 01:09 |

Tabulka 4.2: Hodnoty pro vodička s V drážkou



Obrázek 4.22: Detailní pohled : vlevo PL-, vpravo PL+

Na obr. 4.22 je zobrazen detailnější pohled na vyerodované drážky, vlevo jsou dvě drážky erodované se zápornou polaritou, vpravo s kladnou. Už při obrábění bylo patrné, že obráběcí čas se při použití kladné polarity výrazně měnil (směrodatná odchylka 14s), naproti tomu u záporné polarity byl stále přibližně stejný (směrodatná odchylka 2s). Tento fakt ukazuje na horší stabilitu obrábění při použití kladné polarity. Z obr. 4.22 je vidět horší jakost obrobeného povrchu u drážek erodovaných s kladnou polaritou. Doba obrábění je u kladné polarity kratší, což je naopak výhodou takového nastavení.

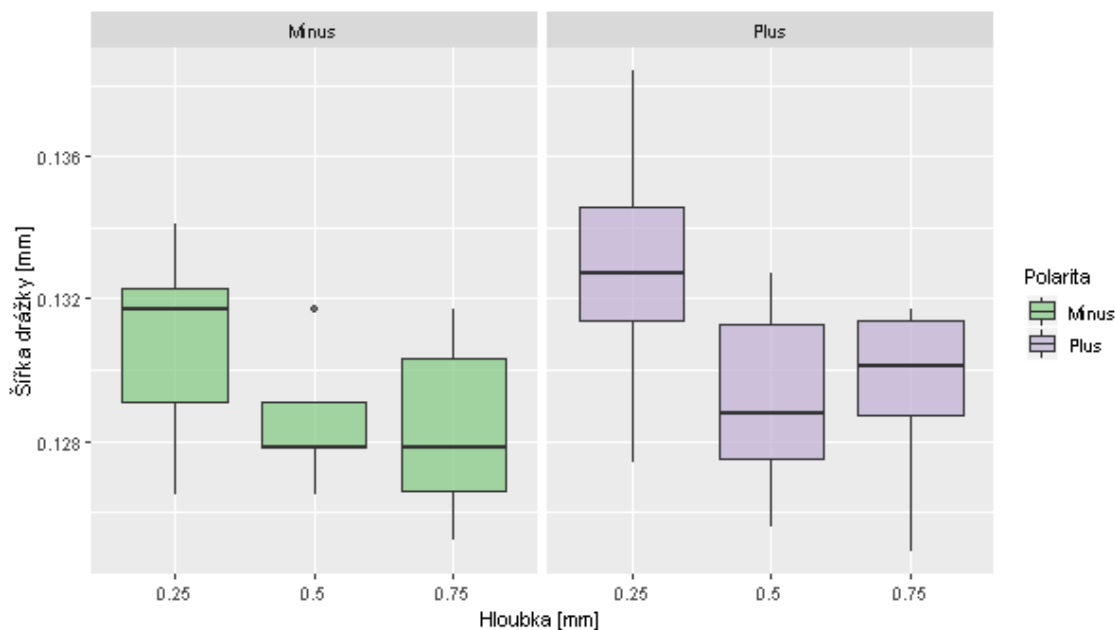
Směrodatná odchylka byla vypočtena pomocí programu Openoffice Calc. Podrobnější statistická analýza je zpracována do grafu ??, graf byl vytvořen ve statistickém programu R.

”Krabicová” část grafu, obarvená světle zelenou a světle fialovou barvou, je vždy ohraničena 1. kvantilem zdola a 3. kvantilem shora, tlustá středová čára znázorňuje medián hodnot. Přesahující svíslé čáry pak ukazují variabilitu dat pod prvním a nad třetím kvantilem. Osamělé body vyznačují tzv. ”odlehlá pozorování”, jsou to body, které se svou hodnotou výrazně liší od ostatních.

Z grafu 4.23 je patrné, že variabilita dat (a tedy i směrodatná odchylka) se s hloubkou řezu příliš nemění. U záporné polarity byla nejnižší směrodatná odchylka naměřena u hloubky 0,5 mm (sm. odch. 0,001470 mm), nejvyšší u hloubky 0,25 mm (sm. odch. 0,002502). Tento rozdíl není statisticky významný (otestováno testem na shodu rozptylů v statistickém programu R) a není nijak velký ani z pohledu praktického použití. U kladné polarity jsou pak rozdíly ve variabilitě dat v závislosti na hloubce řezu podobné a také nejsou nijak velké. Směrodatná odchylka šířky drážky se tedy s hloubkou řezu mění jen zanedbatelně a rozdíly mohou být pravděpodobně připsány nepřesnosti měření.

Ačkoliv u kladné polarity byla naměřena o něco vyšší směrodatná odchylka než u záporné polarity, ani tyto rozdíly nejsou z pohledu praktického použití nijak velké a nejsou ani statisticky významné (testováno opět ve statistickém programu R).

U obou polarit pak byla šířka drážky v průměru největší u hloubky 0,25 mm. Rozdíly v šířce drážky pro různé hloubky byly vyhodnoceny jako statisticky významné. Vzhledem k tomu, že se ale jedná o rozdíl 2,3 mikrometru pro zápornou polaritu, respektive 3,8 mikrometru pro kladnou polaritu, není tento rozdíl z praktického pohledu nijak velký.

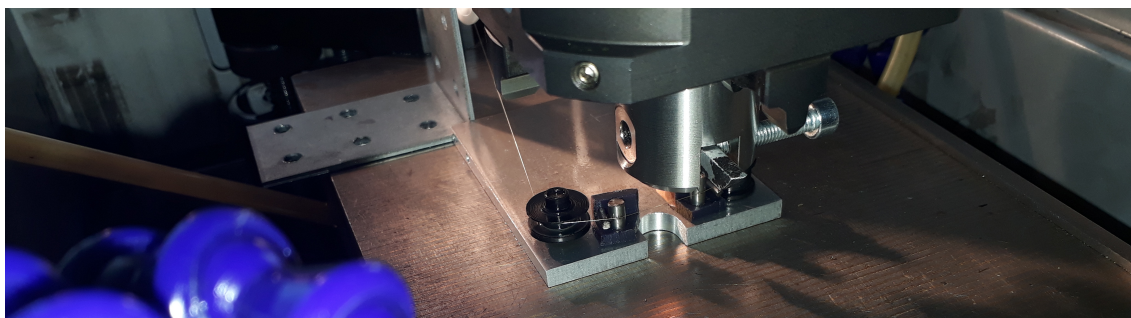


Obrázek 4.23: Boxplot hodnot pro vodítka s V drážkou

Zhoršení přesnosti s přibývajícím počtem drážek se neprojevovalo.

Ukázalo se tedy, že odchylky v šířce drážky jsou dostatečně malé, nemění se s hloubkou řezu, jsou o něco větší pro kladnou polaritu, ale tento rozdíl není velký. Celkový průměr šířky drážek je 0,1299 mm se směrodatnou odchylkou 0,002848 mm.

4.4.2 Složená vodítka, drát 0,1mm



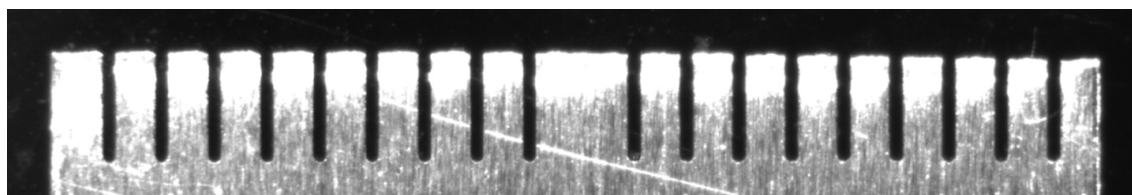
Obrázek 4.24: Experiment pro ověření přesnosti vodítek

Vodítka jsou zobrazena na obr. 4.12. Pro ověření přesnosti vodítek byl proveden experiment dle obr. 4.24. Do měděného plátku o průřezu 0,1 x 10 mm bylo postupně vyradováno 9 a 9 drážek ve směru osy Z s rozstupem 0,5mm. Drážky byly hloubeny do hloubky 1mm. Byl použit povlakovaný drát průměr 0,1 mm. Jádru drátu je z oceli, povlak je z mosazi. Podmínky hloubení byly:

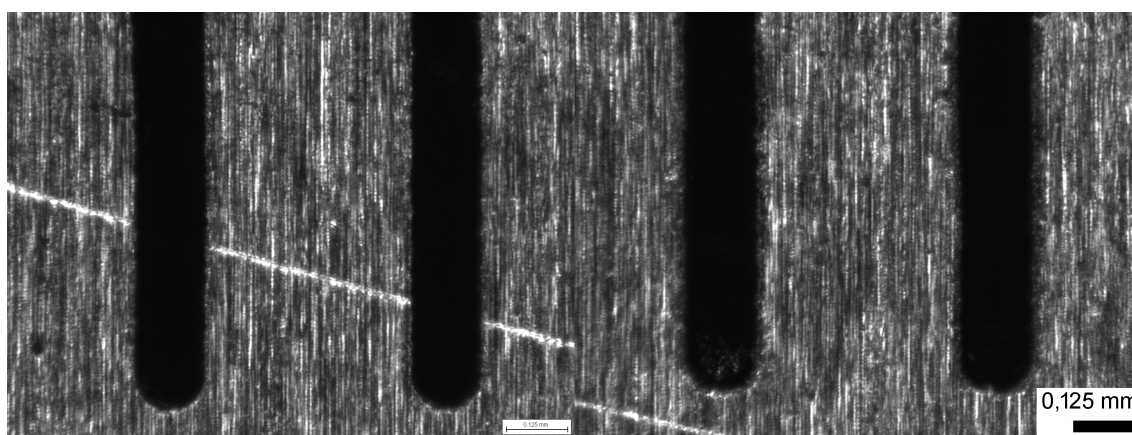
Prvních 9 drážek : PL + ON 1008 OFF 0010 IP 0.000 SV 150 S 99 V 11

V druhé polovině experimentu byly zachovány obráběcí podmínky, kromě otočení polaritu na -.

Cílem experimentu bylo určit odchylku šířky drážek při použití ocelových vodiček upnutých na ose stroje. Ocelová vodička byla vytvořena pomocí zkřížení dvou na sebe kolmých ocelových strun.



Obrázek 4.25: Zářezy vyerodované do měděného pásku



Obrázek 4.26: Zářezy vyerodované do měděného pásku

Na obr. 4.25 je zobrazen celkový pohled na vyerodované zářezy pod mikroskopem. Tabulka 4.3 zobrazuje naměřené výsledky ve třech různých hloubkách štěrbin pro všech 18 štěrbin.

Na obr. 4.26 je zobrazen detailnější pohled na vyerodované drážky, vlevo jsou dvě drážky erodované se zápornou polaritou, vpravo s kladnou. Obráběcí čas opět u kladné polarity značně kolísal, zatímco u záporné byl stále prakticky stejný.

Z grafu 4.27 i z tabulky 4.3 lze vidět, že průměrná šířka ani směrodatná odchylka této šířky se s hloubkou řezu výrazně nemění. Toto platí jak pro zápornou, tak i pro kladnou polaritu. Rozdíly byly otestovány příslušnými statistickými testy v programu R a vyhodnoceny jako statisticky nevýznamné.

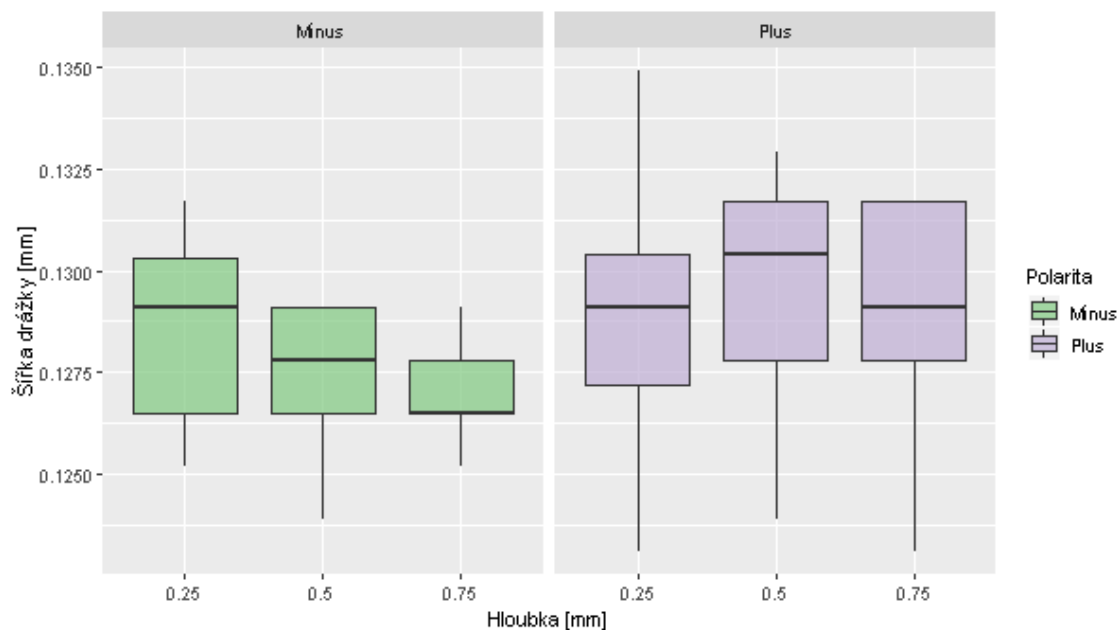
Pro kladnou polaritu byly opět naměřeny vyšší směrodatné odchylky než pro zápornou polaritu (např. v hloubce 0,25 mm sm. odch. 0,003697 pro kladnou polaritu a sm. odch. 0,002156 pro zápornou polaritu). Tento rozdíl byl vyhodnocen jako statisticky významný. Kladná polarita tedy vychází jako přesnější.

Zhoršení přesnosti s přibývajícím počtem drážek se neprojevalo.

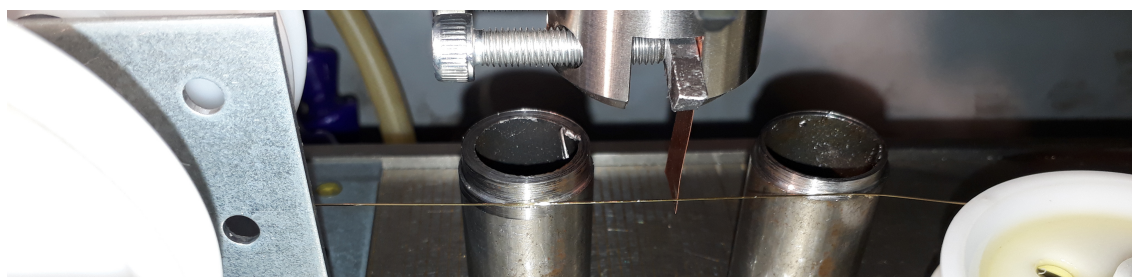
Odchylky v šířce drážky jsou dostatečně malé, nemění se s hloubkou řezu, jsou o něco větší pro kladnou polaritu. Celkový průměr šířky drážek je 0,1288 mm se směrodatnou odchylkou 0,002688 mm.

| | | | | |
|-------------------------|----------|----------|----------|-----------------------|
| hloubka[mm] | 0,25 | 0,5 | 0,75 | délka obrábění[min:s] |
| šířka drážky č. 1 [mm] | 0,1291 | 0,1291 | 0,1252 | 01:31 |
| šířka drážky č. 2 [mm] | 0,1317 | 0,1265 | 0,1265 | 01:31 |
| šířka drážky č. 3 [mm] | 0,1303 | 0,1278 | 0,1265 | 01:30 |
| šířka drážky č. 4 [mm] | 0,1291 | 0,1291 | 0,1287 | 01:31 |
| šířka drážky č. 5 [mm] | 0,1278 | 0,1278 | 0,1278 | 01:30 |
| šířka drážky č. 6 [mm] | 0,1265 | 0,1239 | 0,1291 | 01:30 |
| šířka drážky č. 7 [mm] | 0,1265 | 0,1265 | 0,1252 | 01:30 |
| šířka drážky č. 8 [mm] | 0,1304 | 0,1291 | 0,1278 | 01:30 |
| šířka drážky č. 9 [mm] | 0,1252 | 0,1291 | 0,1265 | 01:30 |
| Průměr | 0,1285 | 0,1277 | 0,1270 | |
| Směrodatná odchylka | 0,002156 | 0,001773 | 0,001405 | |
| Dolní kvartil | 0,1265 | 0,1265 | 0,1265 | |
| Horní kvartil | 0,1303 | 0,1291 | 0,1278 | |
| hloubka[mm] | 0,25 | 0,5 | 0,75 | |
| šířka drážky č. 10 [mm] | 0,1304 | 0,1304 | 0,1231 | 00:38 |
| šířka drážky č. 11 [mm] | 0,1343 | 0,1317 | 0,1291 | 00:49 |
| šířka drážky č. 12 [mm] | 0,1272 | 0,1291 | 0,1317 | 00:42 |
| šířka drážky č. 13 [mm] | 0,1291 | 0,1239 | 0,1265 | 01:08 |
| šířka drážky č. 14 [mm] | 0,1231 | 0,1317 | 0,1317 | 01:14 |
| šířka drážky č. 15 [mm] | 0,1349 | 0,1329 | 0,1304 | 00:42 |
| šířka drážky č. 16 [mm] | 0,1304 | 0,1304 | 0,1278 | 01:06 |
| šířka drážky č. 17 [mm] | 0,1291 | 0,1278 | 0,1317 | 01:18 |
| šířka drážky č. 18 [mm] | 0,1265 | 0,1278 | 0,1278 | 01:06 |
| Průměr | 0,1294 | 0,1295 | 0,1289 | |
| Směrodatná odchylka | 0,003697 | 0,002742 | 0,002907 | |
| Dolní kvartil | 0,1272 | 0,1278 | 0,1278 | |
| Horní kvartil | 0,1304 | 0,1317 | 0,1317 | |

Tabulka 4.3: Naměřené hodnoty pro složená vodítka



Obrázek 4.27: Boxplot hodnot pro složená vodítka



Obrázek 4.28: Experiment pro ověření přesnosti vodítek

4.4.3 Trubková vodítka, drát 0,1mm

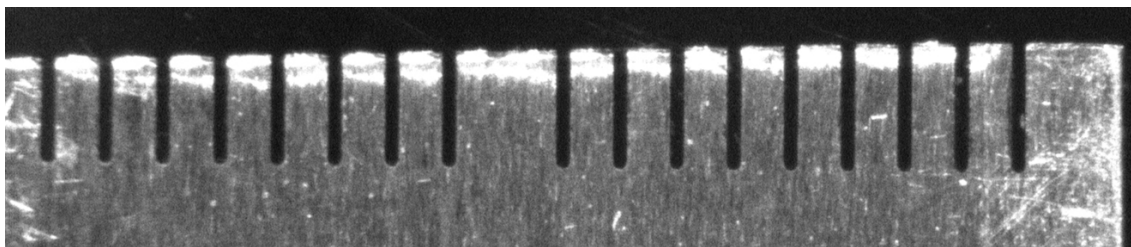
Pro ověření přesnosti vodítek byl proveden experiment dle obr. 4.28. Do měděného plátku o průřezu 0,1 x 10 mm bylo postupně vyerodováno 9 drážek ve směru osy Z s rozestupem 0,5mm. Drážky byly hloubeny do hloubky 1mm. Byl použit povlakovaný drát průměr 0,1 mm . Jádru drátu je z oceli, povlak je z mosazi. Podmínky hloubení byly:

PL - ON 1008 OFF 0010 IP 0.000 SV 150 S 99 V 11

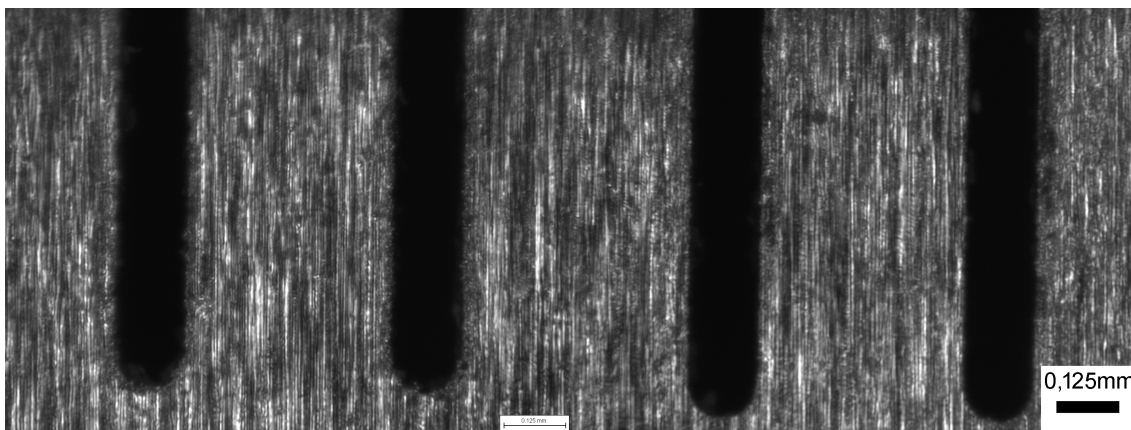
V druhé polovině experimentu byly zachovány obráběcí podmínky, kromě otočení polaritu na +. S kladnou polaritou bylo vyerodováno 8 drážek

Cílem experimentu bylo určit odchylku šířky drážek při použití ocelových vodítek upnutých na ose stroje. Ocelová vodítka vznikla vysoustružením osazení na nerezeové trubce. Následným cílem pak bylo vyhodnotit, zda-li je tato odchylka dostatečně nízká, aby umožňovala použití takovýchto vodítek pro výrobu obrobků a elektrod.

Na obr. 4.29 je zobrazen celkový pohled na vyerodované zářezy pod mikroskopem. Pomocí kamery na mikroskopu a vyhodnocovacího software byly pak naměřeny hodnoty šířky drážek. Drážky jsou číslovány od 1 do 17 postupně tak, jak byly erodovány po sobě, první drážka je na obr. 4.29 vpravo. Tabulka 4.4 zob-



Obrázek 4.29: Zářezy vyerodované do měděného pásku



Obrázek 4.30: Zářezy vyerodované do měděného pásku

razuje naměřené výsledky ve třech různých hloubkách štěrbin pro všech devět štěrbin.

Na obr. 4.30 je zobrazen detailnější pohled na vyerodované drážky, vlevo jsou dvě drážky erodované s kladnou polaritou, vpravo se zápornou. Už při obrábění bylo patrné, že obráběcí čas se při použití kladné polarity výrazně měnil, naproti tomu u záporné polarity byl stále přibližně stejný. Tento fakt ukazuje na horší stabilitu obrábění při použití kladné polarity. Z obr. 4.30 je vidět horší jakost obrobeneho povrchu u drážek erodovaných s kladnou polaritou. Doba obrábění je u kladné polarity kratší, což je naopak výhodou takového nastavení.

Z grafu 4.31 i z tabulky 4.4 lze vyčíst, že pro kladnou polaritu se průměrná šířka drážky s hloubkou řezu výrazně nemění. Pro zápornou polaritu je největší šířka drážky v hloubce 0,25 mm (průměr 0,1280 mm), nejmenší v hloubce 0,75 mm (průměr 0,1255 mm). Tento rozdíl byl vyhodnocen jako statisticky významný, z praktického pohledu však je malý, jedná se o rozdíl 2,5 mikrometru.

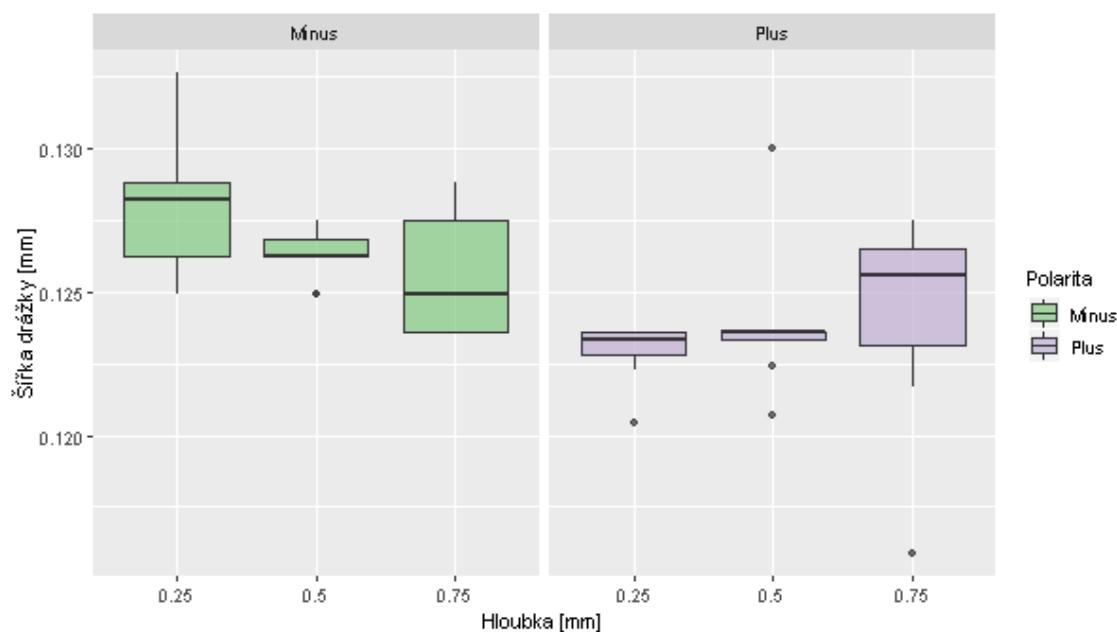
Pro kladnou polaritu byly tentokrát naměřeny vyšší směrodatné odchylky pouze v hloubkách 0,5 mm a 0,75 mm. Rozdíly byly ve všech hloubkách statisticky nevýznamné.

Zhoršení přesnosti s přibývajícím počtem drážek se neprojevalo.

Celkový průměr šířky drážek je 0,1254 mm se směrodatnou odchylkou 0,002812 mm.

| | | | | |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------------------------------|
| hloubka[mm] | 0,25 | 0,5 | 0,75 | délka obrábění[min:s] |
| šířka drážky č. 1 [mm] | 0,1262 | 0,1249 | 0,1236 | 01:28 |
| šířka drážky č. 2 [mm] | 0,1326 | 0,1275 | 0,1275 | 01:33 |
| šířka drážky č. 3 [mm] | 0,1288 | 0,1262 | 0,1249 | 01:33 |
| šířka drážky č. 4 [mm] | 0,1262 | 0,1262 | 0,1249 | 01:30 |
| šířka drážky č. 5 [mm] | 0,1282 | 0,1262 | 0,1249 | 01:30 |
| šířka drážky č. 6 [mm] | 0,1285 | 0,1268 | 0,1288 | 01:26 |
| šířka drážky č. 7 [mm] | 0,1300 | 0,1262 | 0,1275 | 01:29 |
| šířka drážky č. 8 [mm] | 0,1262 | 0,1275 | 0,1236 | 01:28 |
| šířka drážky č. 9 [mm] | 0,1249 | 0,1249 | 0,1236 | 01:28 |
| Průměr | 0,1280 | 0,1263 | 0,1255 | |
| Směrodatná odchylka | 0,002382 | 0,000941 | 0,001962 | |
| Dolní kvartil | 0,1262 | 0,1262 | 0,1236 | |
| Horní kvartil | 0,1288 | 0,1268 | 0,1275 | |
| hloubka[mm] | 0,25 | 0,5 | 0,75 | |
| šířka drážky č. 10 [mm] | 0,1230 | 0,1236 | 0,1262 | 00:48 |
| šířka drážky č. 11 [mm] | 0,1236 | 0,1236 | 0,1262 | 01:10 |
| šířka drážky č. 12 [mm] | 0,1223 | 0,1236 | 0,1249 | 00:43 |
| šířka drážky č. 13 [mm] | 0,1236 | 0,1300 | 0,1275 | 01:10 |
| šířka drážky č. 14 [mm] | 0,1236 | 0,1236 | 0,1236 | 00:54 |
| šířka drážky č. 15 [mm] | 0,1230 | 0,1207 | 0,1275 | 00:44 |
| šířka drážky č. 16 [mm] | 0,1236 | 0,1236 | 0,1217 | 00:42 |
| šířka drážky č. 17 [mm] | 0,1204 | 0,1224 | 0,1159 | 01:11 |
| Průměr | 0,1229 | 0,1239 | 0,1242 | |
| Směrodatná odchylka | 0,001108 | 0,002677 | 0,003887 | |
| Dolní kvartil | 0,1228 | 0,1233 | 0,1231 | |
| Horní kvartil | 0,1236 | 0,1236 | 0,1265 | |

Tabulka 4.4: Naměřené hodnoty pro trubková vodítka



Obrázek 4.31: Boxplot hodnot pro trubková vodítka

4.4.4 Zhodnocení výsledků

Byly vyvinuty tři typy alternativních vodítek pro EDM řezání. Tato vodítka byla následně podrobena zkoumání z hlediska tolerance tloušťky s nimi vyřezaných drážek. Experimenty byly vždy rozděleny na část, kdy řezání probíhalo s kladnou polaritou a část se zápornou polaritou. Při řezání kladné polarity byla dosažena horší jakost povrchu, než při použití záporné polarity. Čas obrábění byl s kladnou polaritou velmi nestálý (směrodatná odchylka 14s). Se zápornou polaritou velmi stálý (směrodatná odchylka 2s).

Drážky měly na svém konci symetrický půlkruhový tvar, což ukazuje dobré vedení drátu.

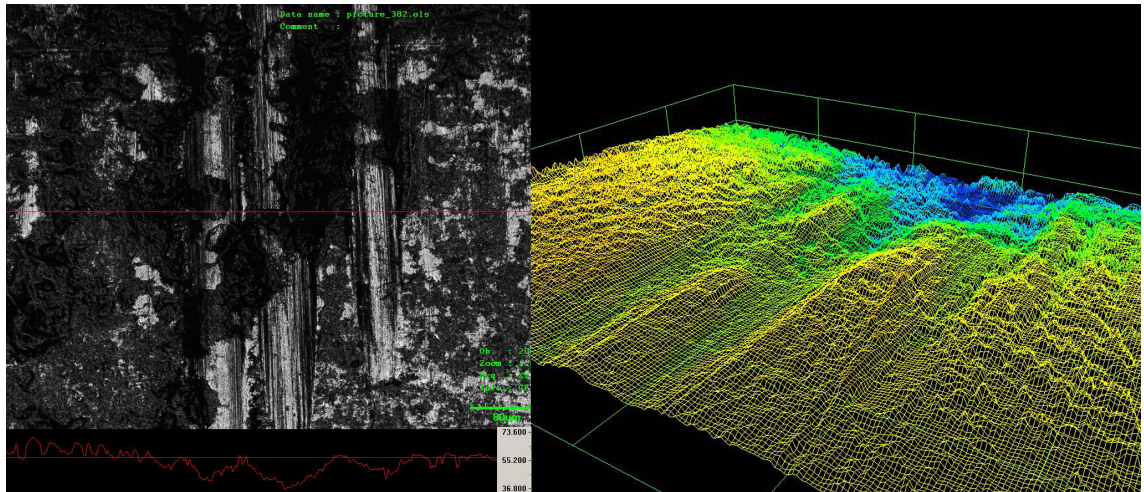
U všech tří typů vodítek byla naměřena směrodatná odchylka tloušťky drážky do ± 3 mikrometrů. Jedná se o odchylku, která spadá do nejistoty měření s přístrojem Navitar Zoom 6000. Z toho vyplývá, že vedení drátu je velmi přesné a drážky se s hloubkou nezužují ani nerozšiřují.

Byla tedy prokázána vhodnost všech tří typů vodítek pro použití při drátovém EDM řezání.

4.5 Abraze složených vodítek

Abraze vodítek je nejkritičtější parametr, který ovlivňuje použitelnost, a tedy i životnost vodítek. Na kontaktu obráběcího drátu s vodítky dochází k postupnému otěru materiálu a toto opotřebení výsledně ovlivňuje dosažitelnou přesnost vedení drátu a pasivní odpory. Růst pasivních odporů drátu ve vznikající drážce vede až k nepoužitelnosti a nutné výměně vodítek z důvodu zvýšené pravděpodobnosti přetržení drátu.

Pro přípravu obráběcích elektrod jsem nejvíce používal složená vodítka. Proto jsem se rozhodl vyhodnotit jejich opotřebení abraží. S těmito vodítky jsem



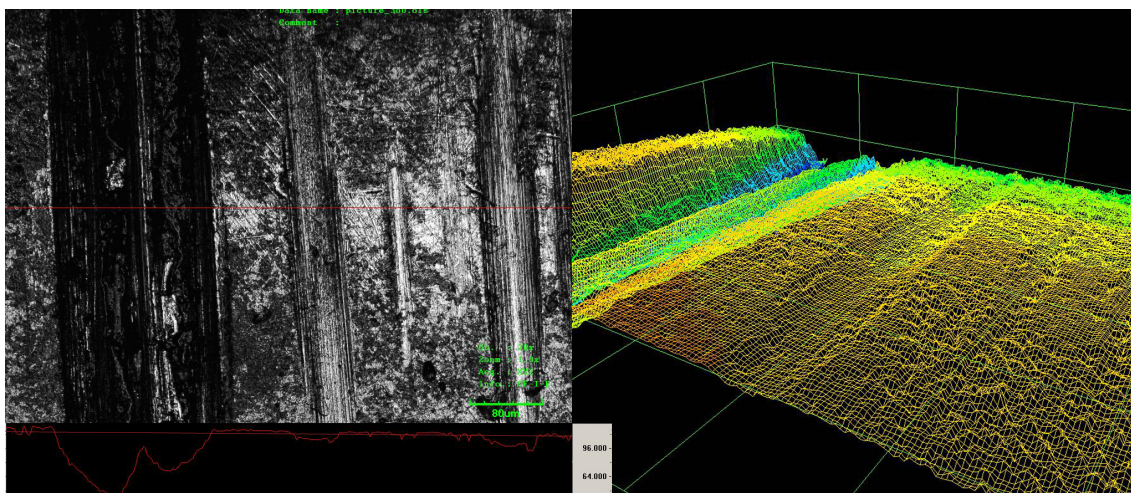
Obrázek 4.32: Abraze první ocelové struny 4 mm

odvinul celkem 6000 m wolframového drátu 0,05 mm. Vodítka jsou tvořena dvěma zkříženými válcovými plochami o průměru 4 a 2 mm vyrobené z ocelového strunového drátu. Opotřebení vodítek jsem posléze vyhodnotil pomocí snímků z konfokálního mikroskopu, s jeho pomocí byly měřeny 3D snímky opotřebeného povrchu ocelových strun a z nich byl vyhodnocen profil a hloubka opotřebení. Ocel jsem jako materiál volil ze dvou důvodů. Jedná se o velmi dostupný materiál a celková cena vodítek, i se započtením práce na jejich výrobu, je cca. 100 Kč. Druhý důvod je, že jsem předpokládal, že ocel bude vykazovat znatelné opotřebení, které bude možné posléze vyhodnotit. Pokud bych například použil tvrdokov, bylo by nejspíše opotřebení daleko méně znatelné.

Na obr. 4.32 vlevo nahoře je zobrazen horní pohled na obroušené vodítko. Vlevo dole pod horním pohledem je zobrazen hloubkový profil vyhodnocený pomocí konfokálního mikroskopu, měřítko vpravo od profilu je v mikrometrech. Do hloubkového profilu jsem umístil středovou linku, která znázorňuje středovou čáru původní výšky povrchu. Vpravo je pak zobrazen celkový 3D profil získaný snímkováním pomocí konfokálního mikroskopu.

Na obr. 4.32 tedy vidíme tři zářezy od drátu. Toto je způsobeno častou manipulací s vodítky. Tato vodítka byla používána v rozmezí tří let a při manipulaci došlo k posunutí ocelové struny, která je nalisována do plastového držáku. Celkové opotřebení lze tedy vyhodnotit jako součet hloubek vyerodovaných drážek, které bylo způsobeno abrazí drátem o celkové délce 6000 m.

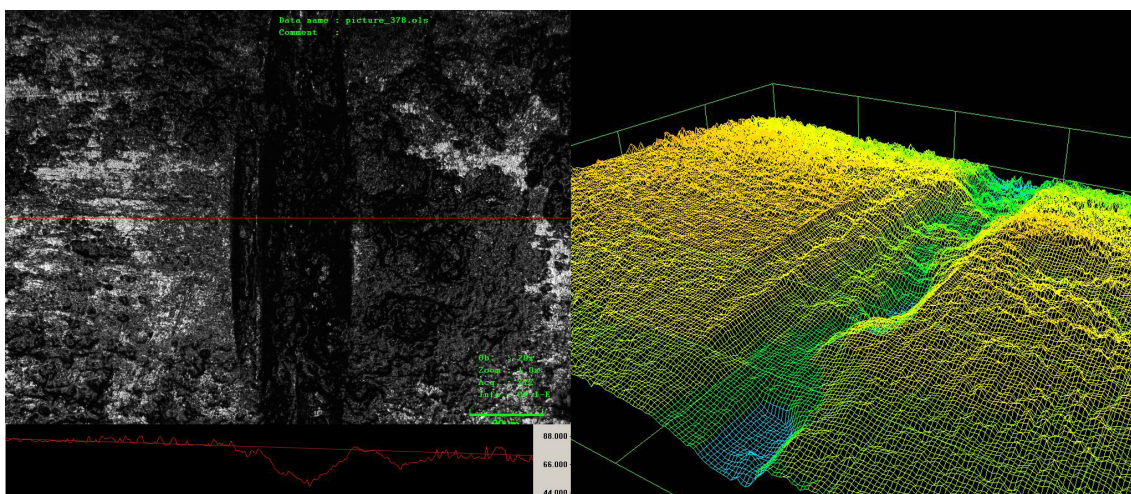
Hloubku tří drážek jsem postupně odměřil jako 0,015 mm , 0,022 mm a 0,013 mm. Celkem je to tedy 0,050 mm. Rychlost odvíjení drátu se při pokusech pohybovala mezi 2 - 4 m / min. Pro výpočet budu uvažovat 3 m / min a 180 m / hod. Celkem je tedy míra abraze rovna 1,5 mikrometru za hodinu.



Obrázek 4.33: Abraze druhé ocelové struny 4 mm

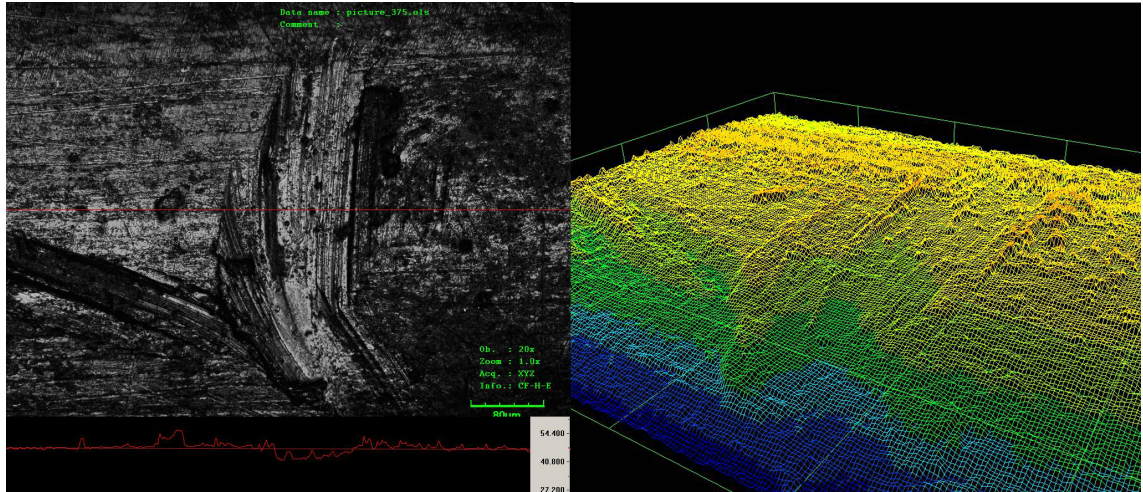
Na obr.4.33 jsou opět zobrazeny vybroušené zářezy, hloubkový profil a celkový 3D profil. Vidíme zde čtyři zářezy od drátu. Celkové opotřebení budu opět brát jako součet hloubek drážek.

Hloubku čtyř drážek jsem postupně odměřil jako 0,072 mm, 0,044 mm, 0,009 a 0,011 mm. Celkem je to tedy 0,134 mm. Rychlost odvíjení je 180 m / hod. Celkem je tedy míra abraze rovna 4 mikrometry za hodinu.



Obrázek 4.34: Abraze první ocelové struny 2 mm

Na obr.4.34 je zobrazena situace pro třetí část vodítek - první strunu průměru 2 mm. Vidíme zde dva zářezy. Hloubku dvou drážek jsem postupně odměřil jako 0,010 mm a 0,030 mm. Celkem je to tedy 0,040 mm. Rychlost odvíjení je 180 m / hod. Celkem je tedy míra abraze rovna 1,2 mikrometru za hodinu.



Obrázek 4.35: Abraze druhé ocelové struny 2 mm

Na obr.4.35 je zobrazena situace pro čtvrtou část vodiček - druhou strunu průměru 2 mm. Na obr. 4.35 jsou zářezy dosti nepatrné, vyhodnotil jsem je jako dva zářezy oba stejné výšky 0,06 mm. Celkem je to tedy 0,12 mm. Rychlost odvíjení je 180 m / hod. Celkem je tedy míra abraze rovna 0,36 mikrometru za hodinu.

4.5.1 Zhodnocení výsledků

Byla vyhodnocována životnost ocelových složených vodiček. Vodička byla rozebrána a jednotlivé součásti byly podrobeny měření na konfokálním mikroskopu a z naměřených 3D dat profilu byly vyhodnoceny hloubky jednotlivých stop drátu na povrchu jednotlivých částí vodiček.

Největší míra abraze byla naměřena u druhé ocelové struny 4 mm. Míra abraze zde dosahovala 4 mikrometry za hodinu. První ocelová struna 4 mm vykazovala míru abraze 1,5 mikrometru za hodinu. Rozdíl mezi opotřebením u čtyř milimetrových strun je dán rozdílným průměrem naváděcí kladky. První naváděcí kladka měla větší průměr a tím se zmenšila síla působící opotřebením struny. U 2 mm ocelových strun byla míra abraze postupně 1,2 a 0,36 mikrometru za hodinu. Rozdíl hodnot je opět dán postavením naváděcích kladek.

Největší míra abraze byla tedy naměřena 4 mikrometry za hodinu. Jedná se již o znatelnou odchylku, ovšem pro výrobu elektrod, jejichž velikost je většinou v řádu stovek mikrometrů, je tato odchylka přijatelná. Při znalosti opotřebením je tuto odchylku možné lineárně kompenzovat. Pro zmírnění abraze jsem navrhl větší trubková vodička, která jsem již popsal v předchozích kapitolách. S těmito vodičky jsem zatím neprovedl dostatečné množství řezů, abych vyhodnotil míru abraze při jejich používání. Předpokladem ovšem je, že se velikost geometrických odchylek sníží, protože větší množství opásaného materiálu při podobném silovém rozložení bude mít u těchto vodiček za následek nižší opotřebení ve směru osy kolmé k řezu.

5. Experiment s drátem obdélníkového průřezu

Tato kapitola se zabývá otázkou, zda-li je možné zvýšit produktivu EDM řezání změnou tvaru drátu a popisuje experimentální zařízení, které jsem pro tento účel zkonstruoval a vyrobil. Dále pak popisuje výsledky dosažené s tímto zařízením.

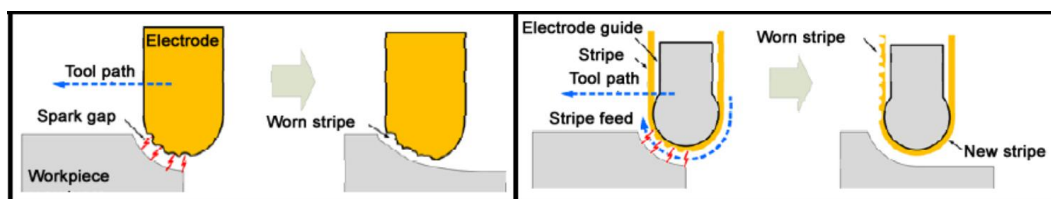
Drátové řezání trpí jednou zásadní nevýhodou, a to je nízká produktivita. Protože rychlost úběru materiálu závisí zejména na dvou parametrech - velikosti kontaktní plochy elektrody a velikosti hodnoty elektrického proudu při obrábění, rozhodl jsem se otestovat, zda dojde ke zvýšení produktivity obrábění použitím tenkého pásku namísto pouhého drátu. Tato myšlenka vychází z předpokladu, že v případě obrábění velmi tenkými dráty je rychlost obrábění ovlivněna zejména dovoleným maximálním proudem při obráběcím čase daným průřezem drátu. Nahrazením drátu páskem s větším průřezem bude moci probíhat obrábění s mnohem vyšším proudem, což by mělo vést ke zvýšení produktivity obrábění. Rozhodl jsem se proto zkonstruovat zařízení, které bude řezat pomocí měděného pásku[67]. Předpokládal jsem, že plochý pásek bude schopen zároveň odebírat materiál po celé stykové ploše a dojde tak k výraznému zrychlení úběru materiálu. Popřípadě, že pokud bude pásek použit jako drát, zvýší se zbytkový průřez drátu, což sníží pravděpodobnost přetržení. Protože i po úběru části materiálu bude zbývat dostatečně velká část, na další odvíjení.

5.1 Požadavky na konstrukci zařízení

Zařízení pro řezání páskem musí splňovat několik základních požadavků.

- Pásek musí být dostatečně napnut, aby co možná nejméně měnil svou pozici a místo řezu zůstávalo stále stejné
- Je nutné zajistit navíjení a brždění pásku
- Přesné vedení drátu do místa řezu, zajištěné pevnými, přesnými vodítky
- Konstrukce umožňující použití zařízení se strojem Sodick APL1
- Vodítka pro řezání širokou i úzkou hranou pásku

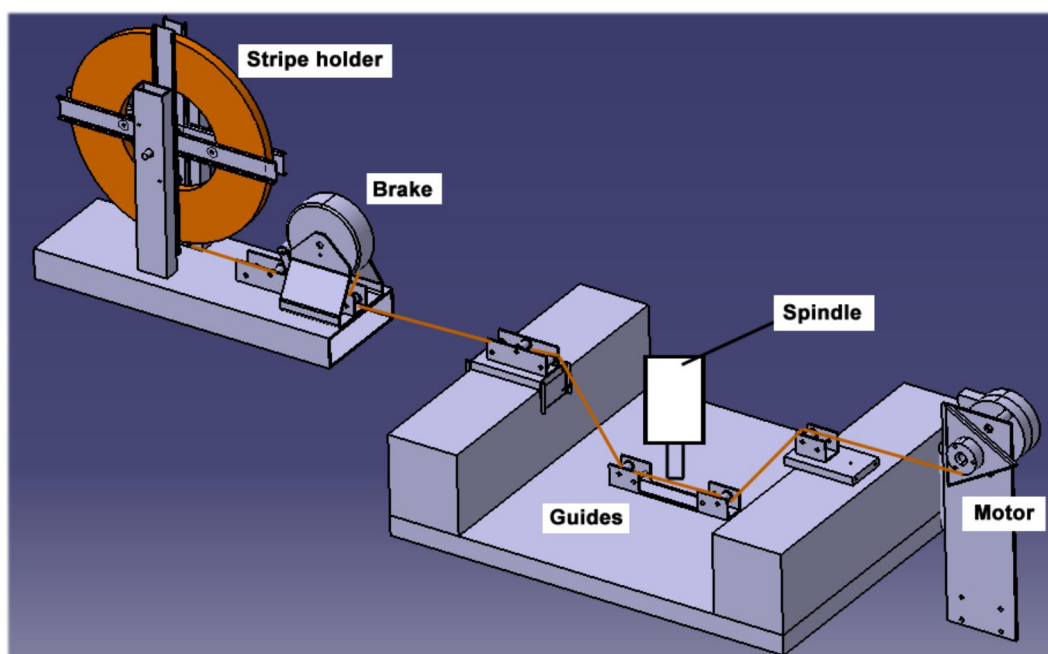
Během rešerše, zda-li existuje podobný přístup, jsem narazil na články[23][24][25], ve kterých se jejich autoři zabývali použitím pásku společně s vodítky o které se pásek opíral (obr. 5.1[24]). V těchto publikacích je popsáno zvýšení produktivity oproti hloubící elektrodě o padesát procent. Využívá principu, že při opásání pevné hloubící elektrody a odvíjení pásku se opotřeбенý kus elektrody odvine a nová část elektrody je stále na stejném místě, jako kdyby byla neopotrebovaná. Já jsem se rozhodl použít dvojice vodítka, mezi nimiž je pásek napnut, a snažit se vylepšit EDM drátové řezání. A zlepšit tvar kontury obrobku při EDM hloubení.



Obrázek 5.1: Použití pásku opřehého o jedno vodičko

5.2 Konstrukce zařízení

Samotný pásek nebylo možné umístit dovnitř stroje, jelikož se do prostoru nad stolem nevešel. Musel jsem tedy zvolit konstrukci, kde navíjecí a brzdící část bude umístěna mimo stroj a na stole stroje budou pouze pevná vodička (obr. 5.2). Pásek jsem koupil smotaný do tvaru disku. Na tento smotaný pásek jsem vyrobil držák, na kterém byla také umístěna třecí brzda. Brzda se skládá z pogumovaného kola a kladky s pružinou, která přitlačuje pásek ke kolu a brzdí jej. Jelikož pro napnutí pásku bylo potřeba výrazně vyšší síly, než pro napínání drátu, použil jsem i výkonnější motor. Jedná se o motor stěračů z vozu Škoda Octavia. Tento motor má jmenovité napětí 12 V a je osazen šnekovou převodovkou. Mírnou nevýhodou této převodovky je její samosvornost. Díky samosvornosti převodovky není možné s motorem otáčet pomocí vnější síly a motor se otáčí jen, pokud je připojeno napětí. Při navíjení pásku to ale nevádí. Převodovka zajišťuje vhodné otáčky navíjecí kladky a tím i vhodnou rychlost navíjení pásku. Rychlost stejnosměrného motoru s permanentními magnety je řízena změnou napětí, kterou zajišťuje laboratorní zdroj s nastavitelným napětím.



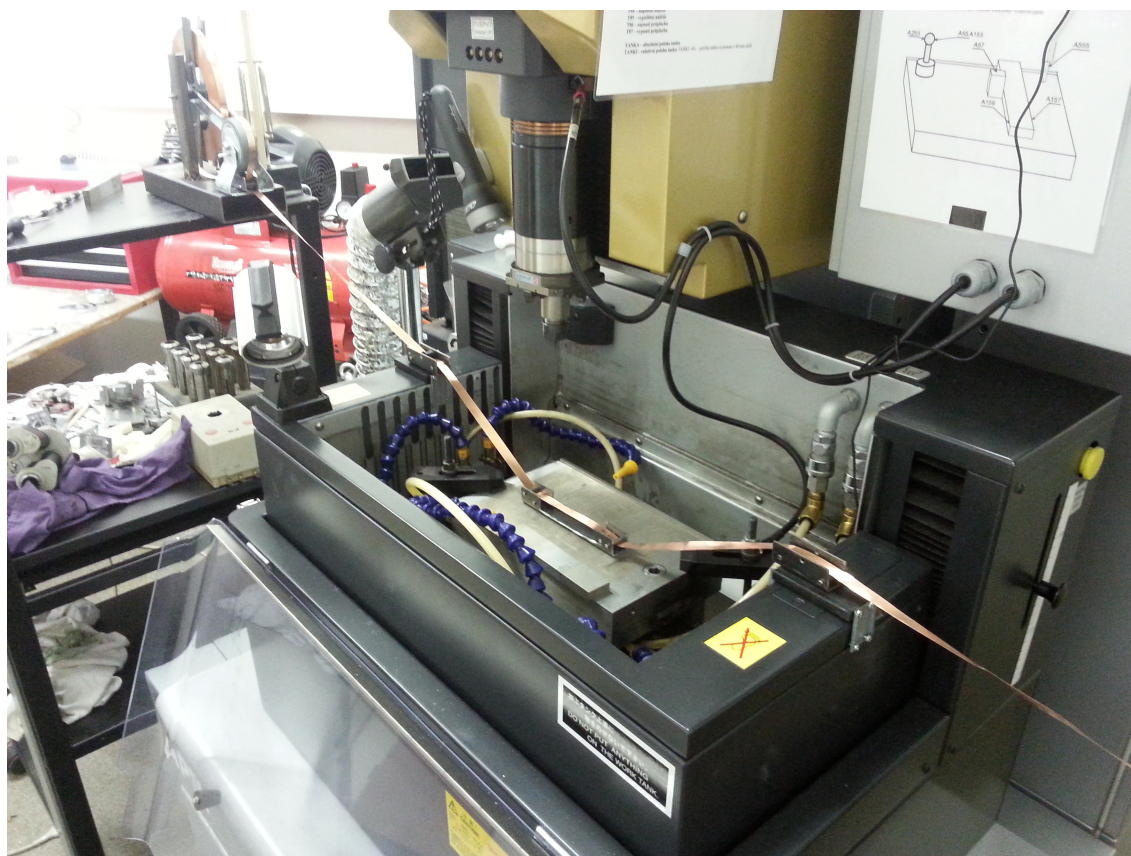
Obrázek 5.2: Model zařízení pro řezání páskem

Na dveřích stroje Sodick APL1 jsou namontovány vodičí kladky, které umožňují zvyšování a snižování výšky zdvihu dveří a tím i výšku hladiny dielektrika v nádrži stroje. Na magnetickém stole jsou poté položena vodička. Vodička jsou

vytvořena z ocelového profilu U, do něj jsou nalisovány hřídelky z ocelové struny. Obě vodička jsou nalisována do jednoho kusu U profilu, aby bylo zajištěno zarovnání obou vodiček do jedné roviny.

5.3 Vlastní vyrobené zařízení

Na obr. 5.3 vidíme celkový pohled na vyrobené zařízení. Průchod pásku je realizován v jedné rovině. Tím pádem je pásek ohýbán pouze v osách kolmých k této rovině, tedy pouze na jeho ploché straně. Na obrázku vidíme, že rozpětí celého zařízení je dosti velké a zabírá cca. 2 metry. Zásobník pásku je umístěn na stole vedle stroje, pásek pak pokračuje přes dveře hloubičky do pracovního prostoru. Dále prochází vodičkem na pracovním stole stroje. Zařízení v této konfiguraci tedy obrábí obrobky upnuté do vřetena stroje Sodick AP1L. Dále je pásek přiveden přes druhou část vodička na druhé dveře stroje a směřuje k navíjecí části zařízení.



Obrázek 5.3: Celkový pohled na zařízení na stroji SODICK AP1L

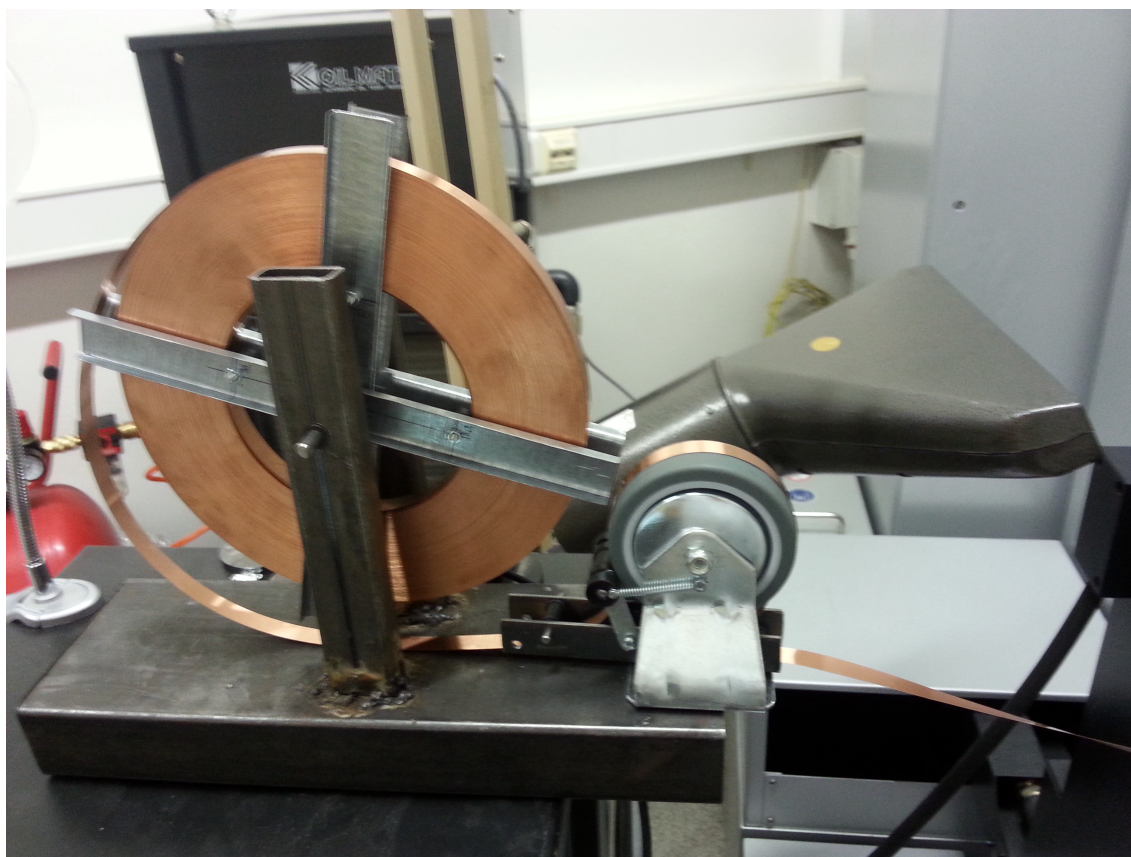
Navíjecí zařízení je zobrazeno na obr. 5.4. Zařízení je tvořeno stěračovým motorkem z vozu Škoda Octavia s šnekovou převodovkou. Převodový poměr šnekové převodovky je 1/48. Tento stěračový motorek je připevněn k sestavě navzájem kolmého plechu a jeklu. A je připevněn k židli vedle stroje.

Spojení motorku a navíjecí části je realizováno pomocí drážkování hřídele motorku. Na toto drážkování je šroubem přitažena polyamidová spojka. Po stranách spojky jsou přišroubovány dva plechy, které ohraničují navinutý pásek, aby nepadl ze spojky dolů. Motorek je napájen laboratorním spínaným zdrojem v



Obrázek 5.4: Naviják pásku

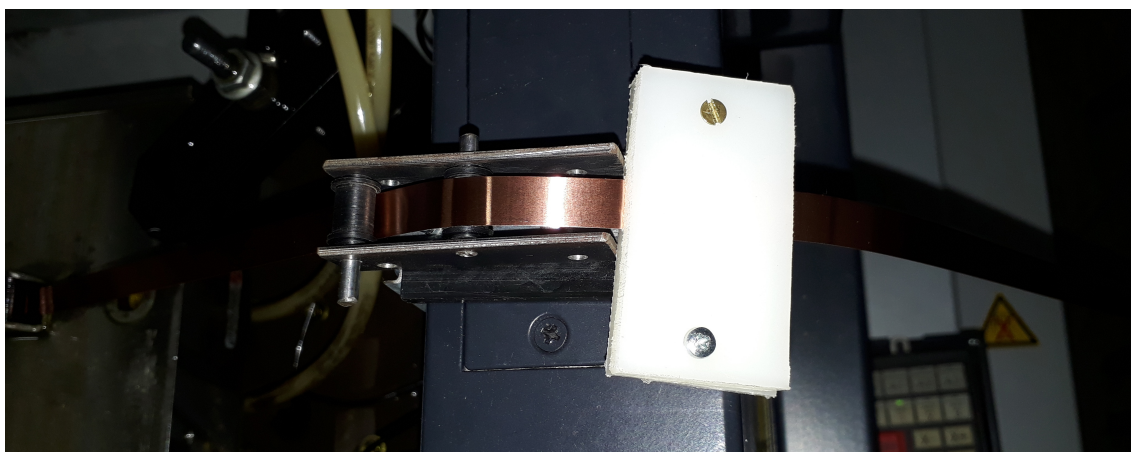
napěťovém rozmezí 0-12V. Jmenovité napětí motorku je 12 V. Proud odebíraný motorkem je dosti velký a pohybuje se okolo 3 A.



Obrázek 5.5: Zásobník pásku s brzdou

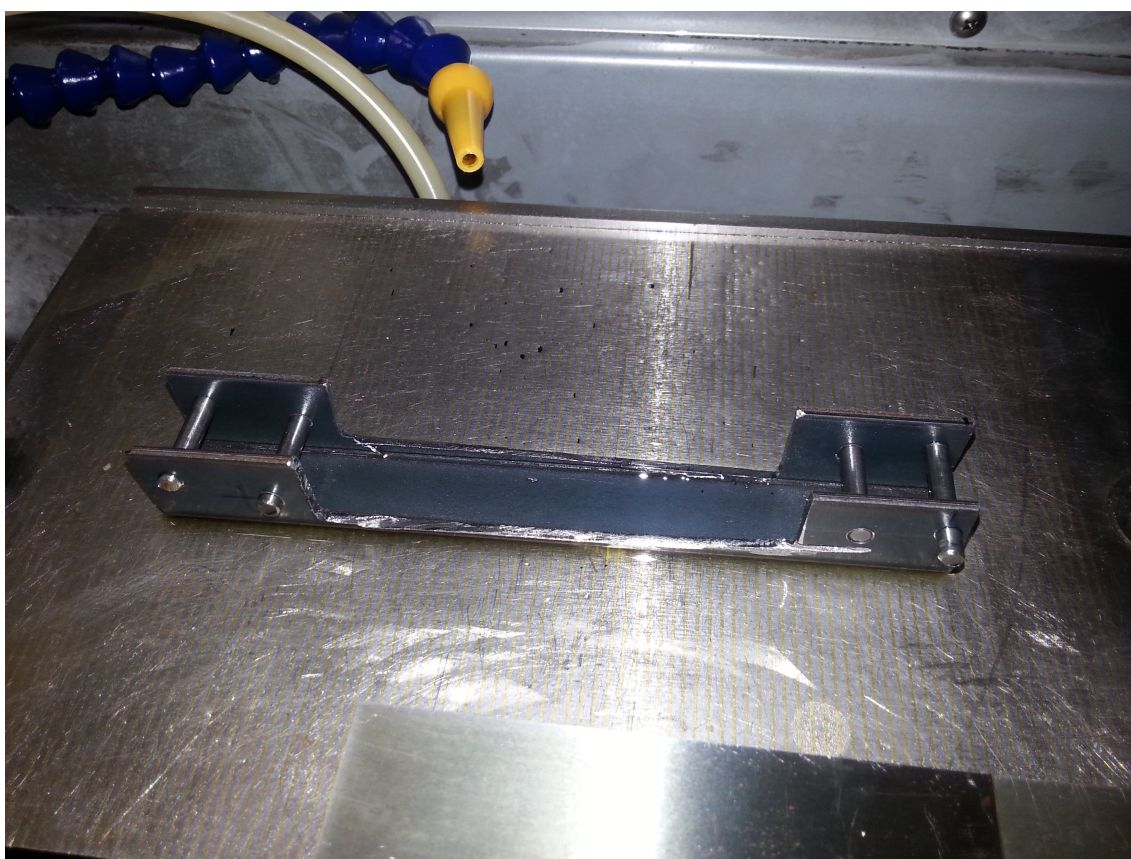
Na obr. 5.5 vidíme zásobník pásku. Průřez měděného pásku je 0,1 x 10 mm. Průměr stočeného kola pásku je 280 mm. Držák je tvořen dvěma na sebe kolmými dvojcicemi plechů. Vnitřní průměr stočeného pásku je podpořen polyamidovými hřídelkami, které jsou zároveň sešroubovány a spojují plechy k sobě. Stabilní poloha pásku je tedy vymezena jeho vnitřním průměrem a ze stran je podporován plechy. Pásek je pak uvolněn, tak aby se mohl otáčet, pomocí ložiska tvořeného polyamidovým dutým válcem a ocelovou strunou. Samomazné spojení plast-kov je pro taková nenáročná ložiska vhodné svým nízkým součinitelem tření. Součinitel tření za sucha PA6 - kov je 0,15 - 0,3. Ložisko a celé kolo s páskem je pak uloženo do svařeného ocelového stojanu.

Pásek dále pokračuje na třecí brzdou, která je tvořena pogumovaným kolem a přítlačnou kladkou, která je napínána dvěma postraními pružinami, aby pásek lépe přiléhal ke kolu. Tato původní brzda nebyla příliš vhodná, protože zanášela do pásku deformace. Proto jsem se rozhodl pro změnu a nahradil jsem ji novou třecí brzdou dle obrázku 5.6.



Obrázek 5.6: Druhý typ brzdy

Tato brzda je tvořena dvěma sešroubovanými plastovými deskami. Po průchodu touto brzdou není pásek zdeformován a obrábění s touto brzdou je daleko stabilnější.

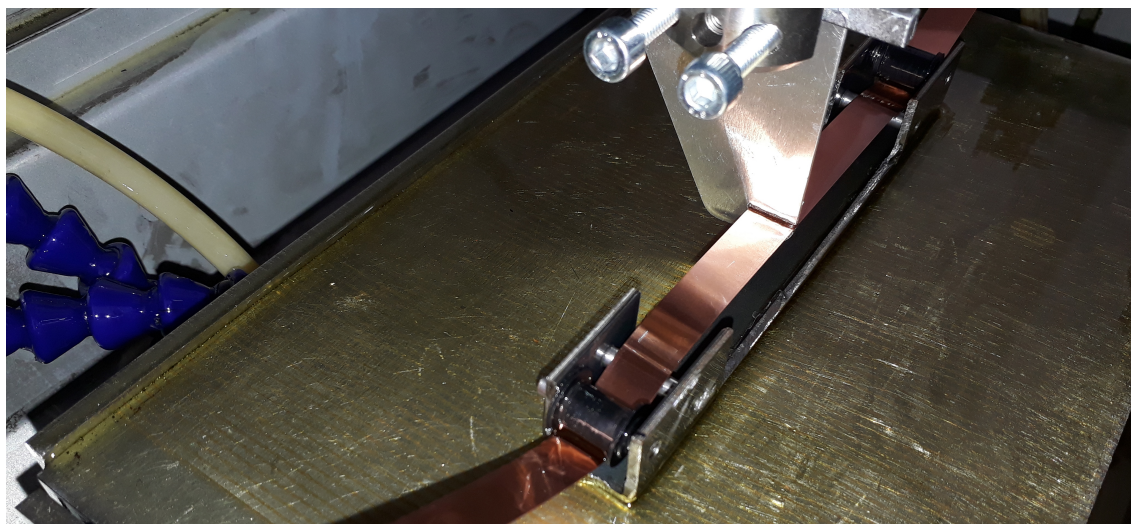


Obrázek 5.7: Vodítko pásku

V místě řezu je pásek veden vodítkem (obr. 5.7). Vodítko je zhotoveno z U profilu velikosti 20 x 20 x 2. Z tohoto dílu je ubrána prostřední část bočnic, aby byl umožněn přístup obrobku k pásku. Po obou stranách takto vzniklého otvoru jsou nalisovány dvě ocelové struny, které pak vedou drát ve směru osy Z. Ve směru osy

Y je drát veden kladkami, které se nasunou na další dvě ocelové struny umístěné blíže k okrajům vodítka.

5.4 Experimenty pro ověření funkčnosti řezání páskem



Obrázek 5.8: Experiment při řezání s průběžným páskem

Na obrázku 5.8 je zobrazen experiment pro ověření funkčnosti řezání s měděným páskem. Řezání bylo prováděno v obou konfiguracích, plochou i příčnou stranou pásku.

5.4.1 Řezání s páskem orientovaným napříč, tenkou stranou k obrobku

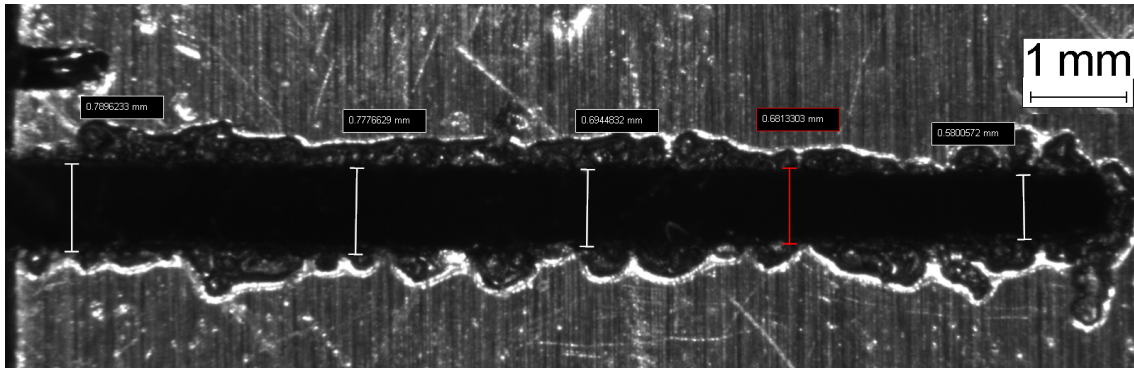
U této konfigurace bylo smyslem experimentu prozkoumat úběr materiálu a také rychlost, s jakou zařízení vyřízne drážku délky 10mm. Nejprve jsem stanovil maximální použitelné podmínky při použití drátu 0,1mm. Poté jsem nastavil výrazně vyšší obráběcí podmínky a použil průběžný pásek. Následně jsem porovnal úběr materiálu a rychlost, s jakou se drát či pásek dostaly do 10 mm vzdálenosti.

Experiment probíhal s následujícími parametry. Do hliníkového plechu tloušťky 1mm byla vyerodována drážka tenkou stranou pásku o rozměru 0,1mm. Podmínky řezání byly

PL+ ON 0195 OFF 0042 IP 7,500 SV 150 S 99 V 11 HP 101 C 4 LF 0005

Experiment trval 5 minut a 33 sekund. Tyto podmínky nejsou ještě blízko podmínkám pro trhání pásku. Na druhou stranu při obrábění s těmito podmínkami byl již pásek odebrán v některých místech i do hloubky 1 mm. Jednalo se tedy o dosti silné podmínky.

Na obrázku vidíme drážku vyerodovanou při tomto experimentu. Drážka se zužuje s přibývajícím hloubkou drážky. Drážka je dlouhá 10 mm. Na ústí drážky je tloušťka drážky 0,7896 mm, uprostřed je tloušťka drážky 0,6945 mm a u konce drážky je tloušťka 0,5801 mm.



Obrázek 5.9: Drážka vyerodovaná páskem napříč

Celkový úběr materiálu jsem spočítal jako násobek průměrné tloušťky, šířky plechu a délky drážky. Objem odebraného materiálu je cca $7,05 \text{ mm}^3$. Úběr materiálu je pak objem dělený časem a je to $1,27 \text{ mm}^3/\text{min}$.

Pro porovnání účinnosti této nové metody jsem vyerodoval několik drážek drátem 0,1mm. Snažil jsem se dostat až na hranici použitelnosti tohoto drátu. Nejtěžší podmínky, které bylo možné nastavit pro řezání s drátem 0,1 mm byly : PL + ON 0080 OFF 0020 IP 0,000 SV 150 S 99 V 11 HP 101 PP 10 C 4 LF 0005. Při těchto podmínkách trvalo vyerodování drážky dlouhé 10 mm 16 minut a 50 vteřin. Při zvětšování parametru ON už se čas obrábění zvyšoval a při zvětšování parametru IP se trhal drát. Tloušťka této drážky byla velice stálá a měla šířku 0,1339 mm. Objem odebraného materiálu tedy byl $1,339 \text{ mm}^3$. Úběr materiálu pak byl $0,08 \text{ mm}^3/\text{min}$.

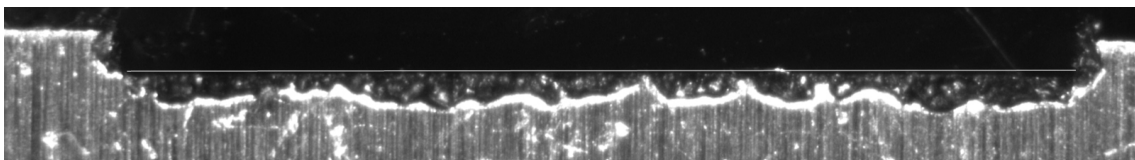
5.4.2 Řezání s páskem orientovaným podélně, širokou stranou k obrobku

U této konfigurace bylo smyslem experimentu prozkoumat výslednou konturu povrchové vrstvy. Tato metoda by totiž nahrazovala EDM hloubení. Zlepšení spočívá v tom, že tvar spodní kontury vyerodovaného povrchu není ovlivněn opotřebením elektrody, protože pásek se neustále obnovuje.

Do hliníkového plechu tloušťky 1mm byla vyerodována drážka plochou stranou pásku. Podmínky obrábění byly

PL+ ON 0195 OFF 0042 IP 7,500 SV 150 S 99 V 11 HP 101 C 4 LF 0005

Experiment trval 12 minut a 0 sekund. Hloubka obrábění byla 1 mm, šířka pásku byla 10 mm.



Obrázek 5.10: Drážka vyerodovaná páskem na plocho

Na obrázku je vyobrazena pokusná drážka vyerodovaná při tomto experimentu. Nad drážku jsem umístil tenkou bílou referenční čáru, podél vyerodovaného

povrchu. Při pohledu na prostor pod linkou vidíme, že drážka vykazuje velice přijatelnou rovinnost. Pouze na stranách drážky je vyerodováno více materiálu než uprostřed. Tento fakt je způsoben nejspíše deformacemi vzniklými při skladování drátu. Drát byl skladován v kole a byl tedy často na své strany pokládán.

Objem odebraného materiálu při tomto experimentu byl 10 mm^3 . Úběr materiálu při této konfiguraci postavení pásku a daných obráběcích pomínek byl pak $0,83 \text{ mm}^3/\text{min}$.

5.4.3 Zhodnocení výsledků

Vyvinul jsem originální zařízení pro EDM řezání pomocí průběžného pásku. Toto zařízení lze osadit na stroj Sodick AP1L tak, že navíjecí a zásobníková část je vně a řezná část je uvnitř stroje. Zařízení jsem postupně optimalizoval, například zařazením nové brzdy.

Následně jsem provedl experimenty, které zkoumaly, zda je možné pomocí tohoto zařízení řezat tenkou i tlustou stranou pásku. Experimenty prokázaly, že obě konfigurace jsou použitelné pro EDM obrábění.

Konfigurace při řezání páskem napříč (tenkou stranou) byla použita s výrazně silnějšími podmínkami, než jaké byly možné při použití drátu $0,1 \text{ mm}$. Tím pádem se výrazně zvýšil úběr materiálu a to $15,88$ krát. Toto zlepšení je ještě možné dále navyšovat další optimalizací řezných podmínek.

Čas potřebný pro vyerodování drážky dlouhé 10 mm se snížil $3,03$ krát.

Co se týče kvality povrchu a geometrické přesnosti vyerodované drážky, došlo při řezání páskem k zhoršení těchto parametrů. Toto zhoršení má několik důvodů. Při silnějších podmínkách se tvoří větší krátery, které mají negativní vliv na drsnost povrchu. Tento fenomén by mohl být dále optimalizován pomocí dokončovacích obráběcích cyklů.

Použitý pásek není v takové kvalitě jako komerčně používaný drát. Drát je kalibrován a odchylka jeho průměru činí ± 5 procent, zatímco použitý pásek není běžně určen pro EDM a není nijak kalibrován. Pásek je nepatrně zdeformován a to se projevuje jako nepřesnosti při obrábění. Pokud by se pásek vyráběl v sériové výrobě určené pro EDM, jistě by došlo k zlepšení těchto parametrů.

V konfiguraci při obrábění plochou stranou pásku jsem došel k závěru, že pásek je jen velmi málo opotřebován. Je to dáno nedostatečným řízením rychlosti, kde není možné nastavit rychlost velmi blízkou nule. Pro tuto konfiguraci by bylo vhodné páskořezné zařízení dovybavit zpětnovazebním řízením rychlosti, aby byl lépe využit materiál pásku.

I přes deformace v pásku vykazuje vyerodovaná drážka přijatelnou rovinnost. Jen na obou okrajích se kontura drážky odchyluje od požadovaného profilu. Tato odchylka je dána tím, že pásek není primárně určen pro EDM a při skladování se nepatrně zdeformoval.

Při obou konfiguracích dochází k nepřesnostem způsobeným mírným prohnutím pásku. Tyto nepřesnosti by bylo možné odstranit další modifikací zařízení. Vhodnou modifikací by bylo zařazení rovníkové trati. Rovnicí trať by vnesla do pásku směrově nedefinované pnutí, které by zajišťovalo jeho vyrovnání.

Úběr materiálu byl vyšší při řezání tenkou stranou pásku. Je to způsobeno tím, že byly nastavené stejné podmínky obrábění, ale styková plocha byla při řezání plochou stranou větší.

6. Závěr a celkové zhodnocení

V rámci této disertační práce jsem řešil problém realizace mikroelektrod pro následné EDM obrábění, na základě prostudované literatury i vlastních experimentálních zkušeností jsem našel několik oblastí, které jsou stále problematické a vyžadují řešení.

Prvním problémem, na který jsem se zaměřil, je zlepšení produktivity obrábění pomocí použití průběžného pásu namísto drátu. Vycházel jsem z předpokladu, že při zvětšení průřezu drátu bude možné použít silnějších podmínek obrábění.

Pro obrábění pomocí průběžného pásu jsem zkonstruoval a vyrobil originální zařízení, které jsem následně otestoval[67]. Průběžný pásek jsem pro obrábění testoval ve dvou konfiguracích. Za prvé v řezné konfiguraci tenkou stranou pásu s rozměrem 0,1 mm a za druhé širokou stranou pásu s rozměrem 10 mm.

Následně jsem provedl experimenty, které zkoumaly, zda je možné pomocí tohoto zařízení obrábět tenkou i širokou stranou pásu. Experimenty prokázaly, že obě konfigurace jsou použitelné pro EDM obrábění[67].

Konfigurace při řezání páskem napříč (tenkou stranou) byla použita s výrazně silnějšími podmínkami, než jaké byly možné při použití drátu 0,1 mm. Tím pádem se výrazně zvýšil úběr materiálu a to 15,88 krát. Toto zlepšení je ještě možné dále navyšovat další optimalizací řezných podmínek.

Čas potřebný pro vyerodování drážky dlouhé 10 mm se snížil 3,03 krát.

Kvalita povrchu se při řezání páskem zhoršila. Je to dáno tím, že při silnějších obráběcích podmínkách se tvoří větší krátery na povrchu obrobku. Pro zlepšení jakosti povrchu tedy navrhuji zařazení dokončovacích obráběcích cyklů.

Druhým hlavním problémem, na který jsem se v této práci zaměřil, bylo otestování nově navržených druhů vodiček pro přesné vedení drátu při drátovém řezání. Pro tento záměr jsem se rozhodl z důvodu finální náročnosti standartních rubínových nebo diamantových vodiček[65][66].

Pro účely této práce jsem postupně navrhl tři typy přesných vodiček a ověřil jejich funkčnost. První typ vodiček byl navržen jako V-drážka v ocelové struně. Druhý typ vznikl složením dvou na sebe kolmých ocelových strun. Třetí typ vznikl vysoustružením osazení do ocelové trubky.

Sérií pokusů jsem poté ukázal, že odchylka šířky drážek při použití těchto vodiček je +/- 3 mikrometry.

Dále jsem zkoumal životnost vodiček složených ze dvou na sebe kolmých strun a zjistil, že po odvinutí 6000 m wolframového drátu o průřezu 0,050 mm se vodička vlivem abraze opotřebovala maximálně o 134 mikrometrů. Po přepočtení na čas se jedná o míru abraze 4 mikrometry za hodinu. Jedná se již o znatelnou odchylku, ale pro výrobu elektrod, jejichž velikost se pohybuje v řádu stovek mikrometrů je tato odchylka přijatelná. Při znalosti míry abraze je tuto odchylku možné lineárně kompenzovat.

Pro své experimenty jsem postupně zkonstruoval a vyrobil dvě zařízení pro navíjení drátu.

Nejdříve jsem vyrobil fixní miniaturní zařízení[65], kterým je možno osadit stroj Sodick AP1L. Miniaturní drátořez je vhodný pro přípravu elektrod pro mikroobrábění. Drátořez odvíjí drát, který je pomocí pevných vodiček přesně naveden k obráběné elektrodě. Celé zařízení se vejde do obráběcího prostoru stroje

a je připevněno k polohovatelnému stolu stroje. Po úspěšné realizaci a otestování fixního zařízení jsem se rozhodl realizovat modifikovanou verzi, která již není fixní, ale zcela pohyblivá se 4 pracovními osami ve vřetenu stroje s pracovními rozsahy. Zásadní problém spočíval ve vyřešení přívodu a odvodu drátu při jakémkoliv rotačním natočení vřetene. Tento problém se podařilo vyřešit pomocí důmyslného systému kladek. Při natočení vřetena se drát přesunuje mezi jednotlivými kladkami a je tak vždy veden od navíjecí části zařízení k pevným vodičkám.

Jelikož u prvního drátořezu nebylo možné jednoduše měnit dráty a bylo nutné vždy převíjet drát na speciální špulku, rozhodl jsem se k výrobě robustnějšího zařízení. Toto zařízení je osazeno z části vně a z části uvnitř obráběcího prostoru hloubičky. Navíjecí část s motorem a odvíjecí část s brzdou je umístěna na společné platformě mimo stroj. Drát je přes kladky na dveřích hloubičky veden k vodičkám, která mohou být upevněna na stole i ve vřetenu hloubičky. Ve vřetenu je možné použít i speciální pohyblivý otočný nástavec, umožňující otáčení o $\pm 180^\circ$.

Pomocí drátořezného zařízení jsem vyrobil několik nově realizovatelných typů elektrod pro další vědecké aplikace realizované naším ústavem[65][66][68].

Seznam použité literatury

- [1] SODICK *Sodick AP1L* <https://www.sodick.org/products/die-sinking-edm/ap1l.html>, 22.9.2018
- [2] B.M. SCHUMACHER, R. KRAMPITZ, J.P. KRUTH *Historical phases of EDM development driven by the dual influence of "Market Pull" and "Science Push"*. Procedia CIRP 6 (2013) 5 – 12
- [3] K.H. HO, S.T. NEWMAN *State of the art electrical discharge machining (EDM)*
International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43 #13, 1287-1300, 2003
- [4] M. KUNIEDA, B. LAUWERS, K.P. RAJURKAR, B.M. SCHUMACHER *Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process* CIRP Annals - Manufacturing Technology vol. 47 #2, 64-87, 2005
- [5] K.P. RAJURKAR, M.M. SUNDARAM, A.P. MALSHE *Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining* Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM) Procedia CIRP 6-0, 2013, 13-26,
- [6] POCO GRAPHITE INC. *EDM Technical Manual*
<http://www.edmtechman.com/about.cfm?pg=2&chap=2>, 22.9.2018
- [7] N. M. ABBAS, D. G. SOLOMON, MD. F. BAHARI *A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)* International Journal of Machine Tools and Manufacture 47 #7–8, 1214 - 1228, 2007
- [8] RELIABLE EDM *Complete EDM Handbook*
<http://www.reliableedm.com/Complete-EDM-Handbook.php>, Reliable EDM , 30.1.2015
- [9] POCO GRAPHITE INC. *EDM Technical Manual*
<http://edmtechman.com>, Poco Graphite Inc., 30.1.2015
- [10] T. ISHIDA, S. KOGURE, Y. MIYAKE, YOSHIMI TAKEUCHI *Creation of long curved hole by means of electrical discharge machining using an in-pipe movable mechanism* Journal of Materials Processing Technology, vol.149, #1-3, 157 - 164, 2004
- [11] M. UCHIYAMA, T. SHIBAZAKI *Development of an electromachining method for machining curved holes* Journal of Materials Processing Technology, vol.149, #1-3, 453 - 459, 2004
- [12] Y.F. LUO *Rupture failure and mechanical strength of the electrode wire used in wire EDM* Journal of Materials Processing Technology, vol.94, #2-3, 208 - 2155, 1999

- [13] F. KLOCKE, D. WELLING, A. KLINK, D. VESELOVAC, T. NÖTHE, R. PEREZ *Evaluation of Advanced Wire-EDM Capabilities for the Manufacture of Fir Tree Slots in Inconel 718* Procedia CIRP, vol.14, #0, 430 - 435, 2014
- [14] F. KLOCKE, D. WELLING, A. KLINK, R. PEREZ *Quality Assessment through In-process Monitoring of Wire-EDM for Fir Tree Slot Production* Procedia CIRP, vol.24, #0, 97 - 102, 2014
- [15] I. MENZIES, P. KOSHY *Assessment of abrasion-assisted material removal in wire EDM* CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol.57, #1, 195 - 198, 2008
- [16] T. MASUZAWA, M. YAMAGUCHI, M. FUJINO *Surface Finishing of Micropins Produced by WEDG* CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol.54, #1, 171 - 174, 2005
- [17] J. FLEISCHER, T. MASUZAWA, J. SCHMIDT, M. KNOLL *New applications for micro-EDM* Journal of Materials Processing Technology, vol.149, #1-3, 246 - 249, 2004
- [18] T. MASUZAWA, K. OKAJIMA, M. YAMAGUCHI, M. FUJINO *EDM-Lathe for Micromachining* CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol.51, #1, 355 - 358, 2002
- [19] K. EGASHIRA, Y. MORITA, Y. HATTORI *Electrical discharge machining of submicron holes using ultrasmall-diameter electrodes* Precision Engineering vol.34, #1, 139 - 144, 2010
- [20] X. CHENG, K. NAKAMOTO, M. SUGAI, S. MATSUMOTO, Z.G. WANG, K. YAMAZAKI *Development of ultra-precision machining system with unique wire EDM tool fabrication system for micro/nano-machining* CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol.57, #1, 415 - 420, 2008
- [21] C.S. LEE, E.Y. HEO, J.M. KIM, I.H. CHOI, D.W. KIM *Electrode wear estimation model for EDM drilling* ROBOTICS AND COMPUTER-INTEGRATED MANUFACTURING, VOL. 36, 70-75, 2015
- [22] E. FERRARIS, V. CASTIGLIONI, F. CEYSSENS, M. ANNONI, B. LAUWERS, D. REYNAERTS *EDM drilling of ultra-high aspect ratio micro holes with insulated tools* CIRP ANNALS - MANUFACTURING TECHNOLOGY, VOL.62, #1, 191 - 194, 2013
- [23] K.Y. SONG, D.K. CHUNG, M.S. PARK, C.N. CHU
K.Y. SONG, D.K. CHUNG, M.S. PARK, C.N. CHU, DEVELOPMENT OF STRIP EDM, PROCEDIA CIRP, VOLUME 6, 2013, PAGES 53-57,
Development of strip EDM PROCEDIA CIRP, VOL.6, 53 - 57, 2013
- [24] K.Y. SONG, C.N. CHU *V-grooving using a strip EDM* JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 2013-12-01, 2061-2066

- [25] K.Y. SONG, C.N. CHU, M.S. PARK, D.K. CHUNG *EDM turning using a strip electrode* JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 2013 VOL. 213, #9, 1495-1500
- [26] A. GHOSH, M.K. MUJU, S. PARIJA, A. KANJRATHINKAL *Microwelding using electrochemical discharge* INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS AND MANUFACTURE, VOL.37, #9, 1303 - 1312, 1997
- [27] Z. PENG, Z. WANG, Y. DONG, H. CHEN *Development of a reversible machining method for fabrication of microstructures by using micro-EDM* JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 2010 VOL. 210, #1, 129-136
- [28] Y. WANG, B. XIE, Z. WANG, Z. PENG *Micro {EDM} deposition in air by single discharge thermo simulation* TRANSACTIONS OF NONFERROUS METALS SOCIETY OF CHINA, 2011 VOL. 210, #0, 450-455
- [29] M. KUNIEDA, M. YOSHIDA, N. TANIGUCHI *Electrical Discharge Machining in Gas* CIRP ANNALS - MANUFACTURING TECHNOLOGY, 1997 VOL. 46, #1, 143-146
- [30] M. KUNIEDA, Y. MIYOSHI, T. TAKAYA, N. NAKAJIMA, Y. ZHANBO, M. YOSHIDA *High Speed 3D Milling by Dry EDM* CIRP ANNALS - MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2003 VOL. 52, #1, 147-150
- [31] G. SKRABALAK, J. KOZAK, M. ZYBURA *Optimization of Dry EDM Milling Process* PROCEEDIA CIRP , 2013 VOL. 6, #0, 332-337
- [32] L. LIQINGA, S. YINGJIEB *Study of Dry EDM with Oxygen-Mixed and Cryogenic Cooling Approaches* PROCEEDIA CIRP , 2013 VOL. 6, #0, 344-350
- [33] S. CHAKRABORTY, V. DEY, S.K. GHOSH *A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics* PRECISION ENGINEERING, 2015 VOL. 40, 1-6
- [34] YANZHEN ZHANG, YONGHONG LIU, YANG SHEN, RENJIE JI, ZHEN LI, CHAO ZHENG *Investigation on the influence of the dielectrics on the material removal characteristics of EDM* JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 2014 VOL. 214, 1052-1061
- [35] E. UHLMANN, M. ROEHNER *Investigations on reduction of tool electrode wear in micro-EDM using novel electrode materials* CIRP JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND TECHNOLOGY , 2008 VOL. 1, #2, 92 - 96
- [36] M.P. JAHAN, Y.S. WONG, M. RAHMAN *A study on the fine-finish die-sinking micro-EDM of tungsten carbide using different electrode materials* JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY , 2009 VOL. 209, #8, 3956 - 3967

- [37] W. YUANGANG, Z. FULING, W. JIN *Wear-resist Electrodes for Micro-EDM* CHINESE JOURNAL OF AERONAUTICS , 2009 VOL. 22, #3, 339 - 342
- [38] E.C. JAMESON *Electrical Discharge Machining* LIBRARY OF CONGRESS, 2001-131032, 103-121
- [39] LIN GU, LEI LI, WANSHENG ZHAO, K.P. RAJURKAR *Electrical discharge machining of Ti6Al4V with a bundled electrode* INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS AND MANUFACTURE,2012 VOL. 53, 100-106
- [40] LEI LI, LIN GU, WANSHENG ZHAO, XUECHENG XI *Influence of flushing on performance of EDM with bunched electrode* INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS AND MANUFACTURE,2012 VOL. 58, 187-194
- [41] JIANG YI, LI QI, KONG LINGLEI, PING XUELIANG, ZHAO WANSHENG *Electrical Discharge Machining for Complex Cavity with a Porous Electrode* PROCEA CIRP,2016 VOL. 42, 618-622
- [42] CHUVAREE S. , KANLAYASIRI K. *Improving the performance of EDM deep hole using multi-hole interior flushing electrode* IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING,2018 VOL. 361, #1, 012013
- [43] ANAND PRAKASH DWIVEDI, SOUNAK KUMAR CHOUDHURY *Increasing the Performance of EDM Process Using Tool Rotation Methodology for Machining AISI D3 Steel* PROCEA CIRP,2016 VOL. 46, 131-134
- [44] MISBAH NIAMAT, SHOAIB SARFRAZ, HARIS AZIZ, MIRZA JAHANZABIB, ESSAM SHEHAB, WASIM AHMAD, SALMAN HUSSAIN *Effect of Different Dielectrics on Material Removal Rate, Electrode Wear Rate and Microstructures in EDM* PROCEA CIRP,2017 VOL. 60, 2-7
- [45] H.K. KANSAL, SEHIJPAL SINGH, PRADEEP KUMAR *Technology and research developments in powder mixed electric discharge machining (PMEDM)* JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY , 2007 VOL. 184, #1-3, 32 - 41
- [46] HOURIYEH MARASHI, DAVOUD M. JAFARLOU, AHMED A.D. SARHAN, MOHD HAMDI *State of the art in powder mixed dielectric for EDM applications* PRECISION ENGINEERING, 2016 VOL. 46, 11 - 33
- [47] F. MODICA, V. MARROCCO, M. VALORI, F. VIGAN?, M. ANNONI, I. FASSI *Study about the Influence of Powder Mixed Water Based Fluid on Micro-EDM Process* PROCEA CIRP, 2018 VOL. 68, 789 - 795
- [48] J.W. MURRAY, A.T. CLARE *Repair of EDM induced surface cracks by pulsed electron beam irradiation* JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 2012 VOL. 212, 2642 - 2651
- [49] SUDHANSHU KUMAR, HARSHIT K. DAVE, KEYUR P. DESAI *Experimental investigation on performance of different tool movement strategies in EDM process for boring operation* THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2016 VOL. 87, 1609 - 1620

- [50] HAO NI, HU GONG, Y. H. DONG, F. Z. FANG, YI WANG *A comparative investigation on hybrid EDM for drilling small deep holes* THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2018 VOL. 95, 1456 - 1472
- [51] M. MUNZ, M. RISTO, R. HAAS *Specifics of Flushing in Electrical Discharge Drilling* PROCEEDIA CIRP, 2013 VOL. 6, 83 - 88
- [52] M. KLIUEV, U. MARADIA, K. WEGENER *EDM Drilling of Non-Conducting Materials in Deionised Water* PROCEEDIA CIRP, 2018 VOL. 68, 11 - 16
- [53] A. SCHUBERT, H. ZEIDLER, M. HAHN, M. HACKERT-OSCHÄTZCHEN, J. SCHNEIDER *Micro-EDM Milling of Electrically Nonconducting Zirconia Ceramics* PROCEEDIA CIRP, 2013 VOL. 6, 297 - 302
- [54] MOHAMMED NASER FAROOQUI, NILESH G. PATIL *A perspective on shaping of advanced ceramics by electro discharge machining* PROCEEDIA MANUFACTURING, 2018 VOL. 20, 65 - 72
- [55] Y. OKAMOTO, Y. UNO, A. OKADA, S. OHSHITA, T. HIRANO, S. TAKATA *Development of multi-wire EDM slicing method for silicon ingot* PROCEEDINGS OF THE 23RD ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING, ASPE 2008 AND THE 12TH ICPE, 2008
- [56] YASUHIRO OKAMOTO, TAKAYUKI IKEDA, HARUYA KURIHARA, AKIRA OKADA, MASATAKA KIDO *Control of Kerf Width in Multi-wire EDM Slicing of Semiconductors with Circular Section* PROCEEDIA CIRP, 2018 VOL. 68, 100 - 103
- [57] Y. OKAMOTO, A. OKADA, Y. UNO, Y. OHYA, T. YAMAUCHI *Challenge to Development of Functional Multi-wire EDM Slicing Method using Wire Electrode with Track-shaped Section* KEY ENGINEERING MATERIALS, 2012 VOL. 523 - 524, 287 - 292
- [58] PARAM SINGH, VINOD YADAVA, AUDHESH NARAYAN *Parametric study of ultrasonic-assisted hole sinking micro-EDM of titanium alloy* THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2018 VOL. 94, 2551–2562
- [59] QING GAO *Impact of electrode length on EDM inclined hole drilling process* THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, 2018 VOL. 94, 1171–1175
- [60] SMALTEC INTERNATIONAL COMPANY WEBSITE *The SmalTec EM203 Micro-EDM Micro Grinding – WEDG WIREs* [HTTP://SMALTEC.COM/EM203.CFM](http://smaltec.com/em203.cfm), 2.9.2018
- [61] ORINO CHRISTOPHER, RAKWAL DINESH, DEAN JORGENSEN J, BAMBERG EBERHARD *Development of a precision, low-cost, small footprint wire electron discharge machine (WEDM)* PROCEEDINGS OF THE 2006 ASPE CONFERENCE, VOL. 26.

- [62] VISHAY COMPANY WEBSITE *TCST2103, TCST2202, TCST2300 Technical manual* [HTTPS://WWW.VISHAY.COM/DOCS/81147/TCST2103.PDF](https://www.vishay.com/docs/81147/TCST2103.pdf), 22.9.2018
- [63] FANUC COMPANY WEBSITE *Wire EDM with ROBOCUT* [HTTPS://WWW.FANUC.EU/UK/EN/ROBOCUT](https://www.fanuc.eu/uk/en/robo-cut), 22.9.2018
- [64] SODICK COMPANY WEBSITE *Consumables* [HTTPS://WWW.SODICK.CO.JP/EN/PRODUCT/CONSUMABLES/PARTS](https://www.sodick.co.jp/en/product/consumables/parts), 22.9.2018
- [65] P. ŠINDELÁŘ *Design Of A Small Lowcost Tool For Making microEDM Electrodes* THE ROMANIAN REVIEW PRECISION MECHANICS, OPTICS & MECHATRONICS, 2012 No. 41, 87-89
- [66] P. ŠINDELÁŘ *Manufacturing electrodes for micro EDM* THE ROMANIAN REVIEW PRECISION MECHANICS, OPTICS & MECHATRONICS, 2013 No. 42, 88-90
- [67] P. ŠINDELÁŘ *CONSTRUCTION AND USE OF A STRIPE EDM TOOL* THE ROMANIAN REVIEW PRECISION MECHANICS, OPTICS & MECHATRONICS, 2014 No. 45, 78-80
- [68] HOŠEK J., KOMM M. *Fine strut grid for plasma sensors* THE ROMANIAN REVIEW PRECISION MECHANICS, OPTICS & MECHATRONICS, 2013 , No. 44, 51-55.

Výsledky a konference autora

Články a funkční vzorek

P. ŠINDELÁŘ *Robots for optical media replication and EDM wirecutter* The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, 2012 No. 41, 87-89 Studentská tvůrčí činnost 2015. Praha, 16.04.2015. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. 2015, ISBN 978-80-01-05727-8. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf15/5554.pdf>

P. ŠINDELÁŘ *CONSTRUCTION AND USE OF A STRIPE EDM TOOL* The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, 2014 No. 45, 78-80

HOŠEK J., ŠINDELÁŘ P. *Feature limits of electro-discharge machining* Nové metody a postupy v oblasti přístrojové techniky, automatického řízení a informatiky, Herbertov, 19.-21. května, 2014.

P. ŠINDELÁŘ *Manufacturing electrodes for micro EDM* The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, 2013 No. 42, 88-90

P. ŠINDELÁŘ *Preparing electrodes for micro EDM milling* Proceedings of the annual meeting New Methods and Procedures in Automatic Control, Instrumentation and Informatics. New Methods and Procedures in Automatic Control, Instrumentation and Informatics. Turnov, 20.05.2013 - 22.05.2013. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. 2013, ISBN 978-80-01-05257-0.

P. ŠINDELÁŘ *Design of a small lowcost tool for making μ EDM electrodes* Proceedings of the annular meeting New Methods and Procedures in Automatic Control, Instrumentation and Informatics. Nové metody a postupy v oblasti přístrojové techniky, automatického řízení a informatiky. Roztoky u Křivoklátu, 28.05.2012 - 30.05.2012. Praha: Ústav přístrojové a řídicí techniky FS ČVUT. 2012, s. 5-8. ISBN 978-80-01-05061-3.

P. ŠINDELÁŘ *Design Of A Small Lowcost Tool For Making microEDM Electrodes* The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, 2012 No. 41, 87-89

P. ŠINDELÁŘ, J. HOŠEK *Drátořežný nástroj pro přípravu erozivních elektrod* Funkční vzorek - 2012

Vědecké konference

- MECAHITECH 2012 - Presentace článku na konferenci
- MECAHITECH 2014 - Presentace článku na konferenci
- Konference studentské tvůrčí činnosti STČ 2015 - prezentace příspěvku na konferenci - druhé místo v doktorandské sekci

Seznam obrázků

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Hloubička Sodick AP1L | 9 |
| 2.2 | Přiblížení elektrody k obrobku | 10 |
| 2.3 | Vytvoření jiskrového kanálu | 10 |
| 2.4 | Mohutnění jiskry | 11 |
| 2.5 | Ukončení výboje | 11 |
| 2.6 | Povrch obrobku po EDM obrábění | 12 |
| 2.7 | První EDM zařízení | 13 |
| 2.8 | Forma pro výlisek mobilu a nákres EDM hloubičky | 15 |
| 2.9 | Mechanismus pro hloubení zahnutých děr | 17 |
| 2.10 | On-time a off-time obráběcího procesu | 17 |
| 2.11 | Elektroda seskládaná z trubiček | 18 |
| 2.12 | Forma pro výrobu a vlastní sesintrovaná elektroda | 18 |
| 2.13 | Sesintrované elektrody zleva při 1050°C, 1070°C, 1078°C | 19 |
| 2.14 | Výsledky hrubování porézní a plnou elektrodou a fotografie průběhu obrábění | 19 |
| 2.15 | Porovnání použití rotační a stacionární EDM elektrody | 20 |
| 2.16 | Drátové řezání a příprava elektrod pro mikroEDM | 21 |
| 2.17 | Drát pokrytý abrazivní vrstvou | 22 |
| 2.18 | Mnohonásobný drát | 22 |
| 2.19 | Zařízení pro řezání mnohonásobným drátem | 23 |
| 2.20 | Zařízení pro měření vibrací v drátu | 24 |
| 2.21 | Rychlé EDM vrtání | 25 |
| 2.22 | Rychlé EDM vrtání | 25 |
| 2.23 | Mikrodíry vyvrtané pomocí povlakovaných elektrod | 26 |
| 2.24 | Vrtací elektroda s mnoha dírami | 27 |
| 2.25 | Submikronové díry, miniaturní žebra | 28 |
| 2.26 | Použití pásku, vodítka pro drát a disku pro EDM | 28 |
| 2.27 | Objekty získané EDM depozicí | 29 |
| 2.28 | Schéma obrábění nevodivých materiálů | 30 |
| 2.29 | Povrch po ostřelování elektronovým paprskem | 31 |
| 2.30 | Znovuodlitá vrstva po ostřelování | 32 |
| 2.31 | Zrnistosti grafitu a body tání jednotlivých materiálů | 33 |
| 2.32 | Topografie povrchů po obrábění různými materiály | 34 |
| 2.33 | Sací a tlakové vyplachování | 35 |
| 2.34 | Tři metody vyplachování při hloubení | 36 |
| 2.35 | Výsledné radiusy při různých metodách hloubení | 37 |
| 2.36 | Speciální ultrazvuková hlava pro kombinované vyplachování | 37 |
| 2.37 | Vliv průtoku na povrch děr | 38 |
| 2.38 | Snímky vlevo - kerosen (6 a 12 A), vpravo voda (6 a 12 A) | 39 |
| 2.39 | V levé části PMEDM, v pravé běžné EDM | 40 |
| 2.40 | Přidané prášky používané v kombinaci s dielektriky | 41 |
| 2.41 | Zdroj využívající RC obvod | 42 |
| 2.42 | Spínaný tranzistorový zdroj | 43 |
| 2.43 | Běžná vodítka používaná pro EDM drátové řezání | 43 |
| 2.44 | Běžná vodítka používaná pro EDM drátové řezání | 44 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.1 | Hloubička Sodick AP1L | 48 |
| 4.2 | Mikroskop Karl Zeiss | 50 |
| 4.3 | Konfokální mikroskop Olympus Lext 3000 | 51 |
| 4.4 | Principiální srovnání blokové a drátové elektrody | 51 |
| 4.5 | Válcová elektroda vyrobená pomocí pevného kamene | 52 |
| 4.6 | Drátřez pro přípravu elektrod pro mikroEDM | 52 |
| 4.7 | Robustnější drátořezné zařízení | 53 |
| 4.8 | Drátořez zepředu | 54 |
| 4.9 | Drátořez ze strany | 54 |
| 4.10 | Optozávora TCST 2103 pro odečítání rychlosti a schéma jejího zapojení | 55 |
| 4.11 | Otočný nástavec pro obrábění obrobků na stole hloubičky | 56 |
| 4.12 | Model složených vodiček | 57 |
| 4.13 | Model vodiček s V drážkou | 57 |
| 4.14 | První drážka vytvořená drátořezem | 58 |
| 4.15 | Elektrody | 58 |
| 4.16 | Čtvercová elektroda a výrobek | 59 |
| 4.17 | Navíjecí část vyrobeného zařízení | 60 |
| 4.18 | Obráběcí část vyrobeného zařízení ve vřetenu stroje | 61 |
| 4.19 | Obráběcí část vyrobeného zařízení na stole stroje | 62 |
| 4.20 | Experiment pro ověření přesnosti vodiček | 63 |
| 4.21 | Celkový pohled na vyerodované drážky | 63 |
| 4.22 | Detailní pohled : vlevo PL-, vpravo PL+ | 65 |
| 4.23 | Boxplot hodnot pro vodička s V drážkou | 66 |
| 4.24 | Experiment pro ověření přesnosti vodiček | 66 |
| 4.25 | Zářezy vyerodované do měděného pásku | 67 |
| 4.26 | Zářezy vyerodované do měděného pásku | 67 |
| 4.27 | Boxplot hodnot pro složená vodička | 69 |
| 4.28 | Experiment pro ověření přesnosti vodiček | 69 |
| 4.29 | Zářezy vyerodované do měděného pásku | 70 |
| 4.30 | Zářezy vyerodované do měděného pásku | 70 |
| 4.31 | Boxplot hodnot pro trubková vodička | 72 |
| 4.32 | Abráze první ocelové struny 4 mm | 73 |
| 4.33 | Abráze druhé ocelové struny 4 mm | 74 |
| 4.34 | Abráze první ocelové struny 2 mm | 74 |
| 4.35 | Abráze druhé ocelové struny 2 mm | 75 |
| 5.1 | Použití pásku opřené o jedno vodičko | 78 |
| 5.2 | Model zařízení pro řezání páskem | 78 |
| 5.3 | Celkový pohled na zařízení na stroji SODICK AP1L | 79 |
| 5.4 | Navíják pásku | 80 |
| 5.5 | Zásobník pásku s brzdou | 81 |
| 5.6 | Druhý typ brzdy | 82 |
| 5.7 | Vodítko pásku | 82 |
| 5.8 | Experiment při řezání s průběžným páskem | 83 |
| 5.9 | Drážka vyerodovaná páskem napříč | 84 |
| 5.10 | Drážka vyerodovaná páskem na plocho | 84 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | Parametry stroje Sodick AP1L | 47 |
| 4.2 | Hodnoty pro vodítka s V drážkou | 64 |
| 4.3 | Naměřené hodnoty pro složená vodítka | 68 |
| 4.4 | Naměřené hodnoty pro trubková vodítka | 71 |

Přílohy

Příloha 1

```
( PL ON OFF IP SV S UP DN JS LNS STEP V HP PP C ALV OC LF JM
LS LNM);
C000 = + 1001 0010 000.0 150 99 000 000 000 0000 0.0000 11 101 10 4 0010
0000 0005 00 00 000;
C953 = + 1002 0012 000.0 150 99 000 000 000 0000 0.0000 11 101 10 5 0010
0000 0005 00 00 000;
;
;
H000 = +000000.0000 H001 = +000000.0000 H002 = +000000.0000 ;
H003 = +000000.0000 H004 = +000000.0000 H005 = +000000.0000 ;
;
C000;
;
H010 = 3.500(DELKA ELEKTRODY);
H011 = 0.384(SIRKA PRVNI STRANY ELEKTRODY);
H012 = 0.384(SIRKA DRUHE STRANY ELEKTRODY);
;
H013 = 0.006 (PREDPOKLADANA SIRKA JISKROVE MEZERY);
H014 = 0.050 (PRUMER DRATU);
H015 = 1.000 (PRUMER POLOTOVARU - OBRABIM Z VALCE);
;
;
(PROGRAM VYRABI CTVERCOVOU ELEKTRODU, OPERATOR NA-
JEDE NA POCATECNI MISTO OBRABENI,);
(PROGRAM POTE OBROBI OBE STRANY, PAK SE VRETENO OTOCI
A PROGRAM OBROBI ZBYLE DVE STRANY);
(PRED OBRABENIM JE NUTNO NAJET ZPRAVA K DRATU A PRIBLI-
ZIT CELO -X A -Z A NASTAVIT V X A Z NULY);
G11;
;
H100=0(PROMENNA PRO JUMP);
N0001;
;
;
M06 G90 G01 X-[[H015-H011]/2] Z[H014+0.300](POCATECNI MISTO OB-
RABENI POD ELEKTRODOU);
;
;
G90 G01 Z-[H010+H014] (SVISLE NAHORU DO ELEKTRODY);
;
G90 G01 X [0.3+H014](DOPRAVA VEN Z ELEKTRODY);
;
M06 G90 G01 Z[0.3+H014] ;
M06 G90 G01 X-[[H015+H011]/2 + H014 + 2*H013] ;
```

```
;
G90 G01 Z-[H010+H014];
;
G90 G01 X-[H015+H014+0.300];
;
M06 G91 U90.000;
M06 G90 G01 Z0.300;
M06 G90 G01 X0.300;
;
M00 (POKUD DELAM JEN PLANZETU TAK V TUTO CHVILI UKON-
CIM PROGRAM);
;
IF H100=0 (,0002) ;
;
H100=1;
H011 = H012;
;
JUMP0001;
N0002;
M02;
```