



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VYUŽITÍ NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ PŘI  
VÝROBĚ VYBRANÉ SOUČÁSTI**

USE OF UNCONVENTIONAL TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION OF A SELECTED  
COMPONENT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Denisa Havlínová

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Jana Dvořáková, Ph.D.

BRNO 2022

## Zadání diplomové práce

|                   |  |
|-------------------|--|
| Ústav:            | Ústav strojírenské technologie                   |
| Studentka:        | <b>Bc. Denisa Havlínová</b>                      |
| Studijní program: | Strojírenská technologie                         |
| Studijní obor:    | Strojírenská technologie a průmyslový management |
| Vedoucí práce:    | <b>Ing. Jana Dvořáková, Ph.D.</b>                |
| Akademický rok:   | 2021/22  |

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Využití nekonvenčních technologií při výrobě vybrané součásti**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Nekonvenční technologie mají své specifické charakteristiky. V diplomové práci bude realizována výroba konkrétního výrobku s využitím nekonvenčních technologií obrábění pro možnost srovnání dosažených výsledků, posouzení vlivu jednotlivých procesních parametrů a v závěru bude provedeno zhodnocení spolu s výběrem vhodnější technologie.

#### **Cíle diplomové práce:**

Rešerše z oblasti nekonvenčních technologií.

Popis zvolené součásti a realizace její výroby.

Zhodnocení provedeného experimentu – posouzení dosažené kvality (textury povrchu, rozměrové a tvarové přesnosti).

Technicko–ekonomické zhodnocení.

**Seznam doporučené literatury:**

FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERN,s.r.o., 2001. ISBN 8021419962.

PÍŠKA, M. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.

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

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Během výroby měděné clony s mikroštěrbínou do optického spektrometru nekonvenčními metodami se ukázalo jako největší výzva splnit zadané úzké tolerance a dosažení pravých úhlů v rozích. Prakticky splnit tyto tolerance se povedlo pomocí metody elektroerozivního obrábění a obrábění laserovým paprskem. Obrábění fokusovaným iontovým paprskem se ukázalo být po konzultacích také vhodné, zatímco fotochemické obrábění tyto tolerance splnit nedokáže. Pravých úhlů v rozích se nepodařilo dosáhnout žádnou metodou. Při výrobě štěrbín pomocí laseru byly prokázány vady (otřepy, nataveniny) na řezné hraně, zatímco u elektroeroze nebyly žádné negativní vlivy na povrchu obrobků pozorovány. Ačkoli bylo i po optimalizaci EDM časově náročnější a vyžaduje vyšší náklady (výroba vlastního nástroje pro každou součást), přesto se elektroeroze jeví z finančního i kvalitativního hlediska jako výhodnější a tato metoda je po provedení průzkumu a praktické výroby doporučena k výrobě zadané součásti.

### Klíčová slova

Nekonvenční technologie, mikroobrábění, elektroerozivní obrábění, obrábění paprskem laseru, chemické obrábění, obrábění svazkem iontů

## ABSTRACT

The biggest challenge during manufacturing copper part with microslit for optical spectrometer by the means of unconventional technologies was to meet specified narrow range of tolerances and reach right angles at the microslit corners. Electrical discharge machining and laser beam machining were two practically performed methods and both successfully met these tolerances. After consultation is focused ion beam also considered as suitable method for this task, while for photochemical machining is impossible to meet those narrow tolerances. Right angles were not achieved by any of tested methods. At laser cutting edges were proven defects (burrs, molten material), while we saw no negative defects on electrical discharge workpiece surface. Even after optimization of EDM was machining time longer and there is assumed higher other production cost (tool manufacturing for every single workpiece), but still EDM seems to be more advantageous from financial and surface quality aspect. Based on theoretical research and practical manufacturing is recommended to manufacture specified component with microslit by EDM.

### Key words

Unconventional technologies, micromachining, electrical discharge machining, laser beam machining, chemical machining, ion beam machining

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HAVLÍNOVÁ, Denisa. *Využití nekonvenčních technologií při výrobě vybrané součásti* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140037>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jana Dvořáková.

---

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci na téma VYUŽITÍ NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ PŘI VÝROBĚ SOUČÁSTI vypracoval(a) samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

---

Olomouc, 5.3.2022

---

Denisa, Havlínová

---

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Janě Dvořákové, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytla při vypracování diplomové práce. Dále děkuji Ing. Kateřině Mouralové, Ph.D. za výrobu a pomoc při řešení EDM, také doc. RNDr. Liboru Mrňovi Ph.D. a Ing. Janu Novotnému z Ústavu přístrojové techniky za zhotovení součástí na mikroobráběcím centru, panu Peteru Darebníkovi z firmy Lascam za opravdu pohotové a rychlé zhotovení součástí i cenovou nabídku k LBM. Za četné konzultace a poskytnutí podkladů k chemickému obrábění děkuji panu Jiřímu Riedlovi z firmy Semach a za konzultace k metodě FIB panu RNDr. Jaromíru Kopečkovi, Ph.D z FZU. Část práce byla provedena za podpory výzkumné infrastruktury CzechNanoLab (ID LM2018110, MŠMT, 2020–2022), CEITEC Vysoké učení technické v Brně.

---

**OBSAH**

|   |    |
|---|----|
| ÚVOD .....  | 8  |
| 1 VÝROBA MIKROŠTĚRBINY V SOUČÁSTI DO OPTICKÉHO PŘÍSTROJE .....        | 9  |
| 1.1 Optické spektrální přístroje .....                                | 10 |
| 1.1.1 Difrakce světla .....   | 11 |
| 1.1.2 Fraunhoferova difrakce na štěrbině .....                        | 12 |
| 1.2 Součást se štěrbinou .....  | 13 |
| 2 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ .....                                   | 14 |
| 2.1 Elektroerozivní obrábění EDM .....                                | 15 |
| 2.1.1 Pracovní schéma SEDM .....                                      | 16 |
| 2.1.2 Princip elektroeroze a mechanismus vzniku výboje.....           | 16 |
| 2.1.3 Obráběné materiály a materiály nástroje .....                   | 18 |
| 2.1.4 Dielektrické médium .....                                       | 19 |
| 2.1.5 Zdroje napětí:.....   | 20 |
| 2.1.6 Rozdíly mezi EDM a MEDM.....                                    | 21 |
| 2.1.7 Charakteristiky povrchu po EDM.....                             | 21 |
| 2.2 Obrábění paprskem laseru .....                                    | 23 |
| 2.2.1 Základní princip.....   | 23 |
| 2.2.2 Laserové zařízení .....   | 25 |
| 2.2.3 Druhy laserů .....  | 27 |
| 2.2.4 Mikroobrábění pikosekundovým laserem .....                      | 28 |
| 2.2.5 Obrobitelnost materiálů .....                                   | 29 |
| 2.2.6 Modální struktura laserového paprsku .....                      | 30 |
| 2.2.7 Parametry řezné hrany .....                                     | 30 |
| 2.3 Fotochemické obrábění PCM, tzv. chemické prostřihování .....      | 32 |
| 2.3.1 Postup leptání .....  | 32 |
| 2.3.2 Leptání mědi .....  | 34 |
| 2.4 Obrábění elektronovým paprskem EBM (Electron Beam Machining)..... | 35 |
| 2.5 Obrábění iontovým paprskem IBM (Ion Beam Machining).....          | 36 |
| 2.5.1 Fokusaný iontový paprsek – FIB Focused Ion Beam.....            | 37 |
| 3 NADPIS TŘETÍ HLAVNÍ KAPITOLY (PRAKTICKÁ ČÁST) .....                 | 39 |
| 3.1 Výroba štěrbin pomocí EDM .....                                   | 39 |
| 3.2 Výroba štěrbin pomocí LBM .....                                   | 44 |
| 3.3 Konzultace výroby dalšími metodami.....                           | 49 |
| 3.3.1 Výroba pomocí FIB .....   | 49 |
| 3.3.2 Výroba pomocí PCM.....  | 50 |
| 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....                                | 52 |
| ZÁVĚR.....  | 54 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....   | 55 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....                               | 61 |
| SEZNAM PŘÍLOH.....  | 62 |



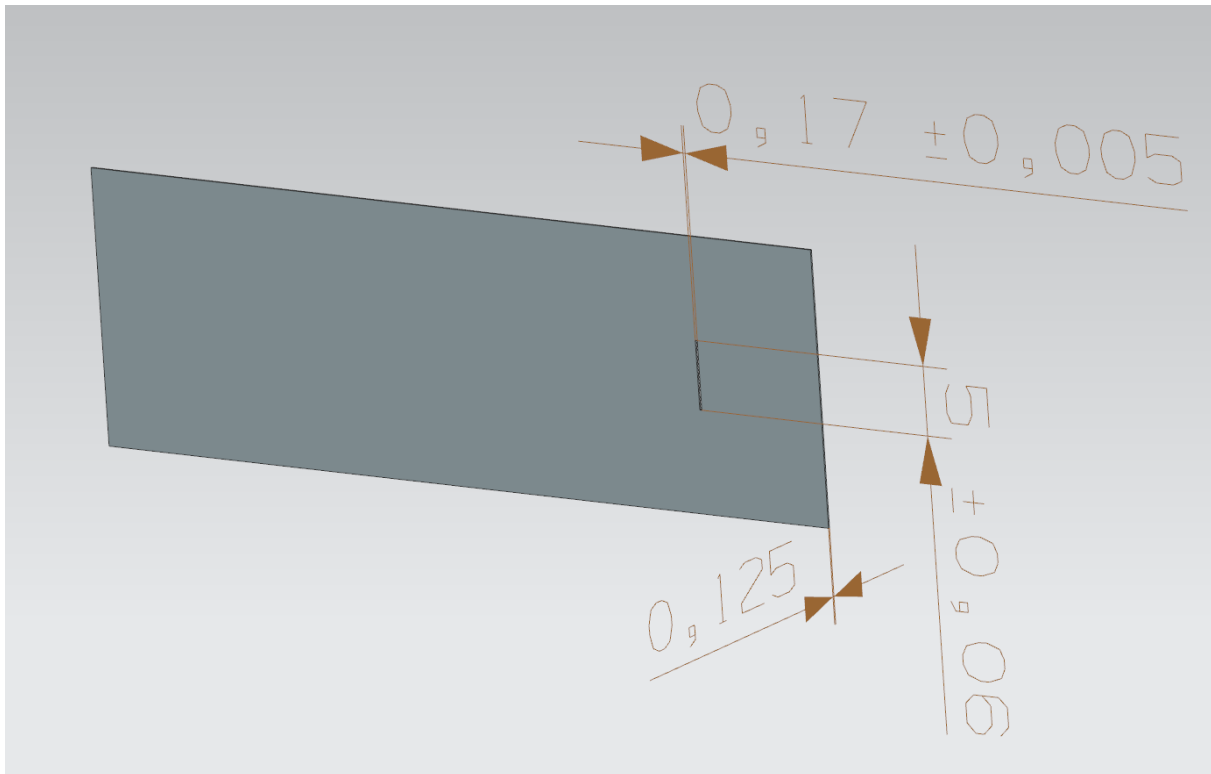
## ÚVOD

Jedním z trendů při vývoji a výrobě moderních spektrometrů je mimo jiné i jejich odlehčení (snižování váhy) a přizpůsobení rozměrů, s čímž souvisí také ztenčování a minimalizace jednotlivých dílů. To však sebou nese také rostoucí nároky na jednotlivé výrobní technologie, jelikož tyto díly je nutné vyrábět v požadované přesnosti a kvalitě. Zde se dostávají ke slovu nekonvenční technologie.

Jejich rozvoj v oblasti mikroobrábění v posledních letech souvisí s rychlým rozvojem nanotechnologií a potřebou obrábět součásti o rozměrech tisícín až miliontin milimetru. V současnosti se mikroobrábění nekonvenčními technologiemi využívá v mnoha oborech od elektrotechniky, přes polovodičový průmysl, oblast forenzních věd, či geologické, lékařské a biologické aplikace, letecký a kosmický průmysl, až po materiálové laboratoře v akademické i komerční sféře.

## 1 VÝROBA MIKROŠTĚRBINY V SOUČÁSTI DO OPTICKÉHO PŘÍSTROJE

Tato diplomová práce je zaměřena na výrobu clony s mikroštěrbinou do optického přístroje Optronic OL 750, který se využívá například v automobilovém průmyslu k testování svítivosti světlometů. Konkrétně se jedná o součást z měděné fólie o tloušťce  $125\ \mu\text{m}$  s přesně stanovenou štěrbinou o rozměru  $5000 \times 170\ \mu\text{m}$  a s tolerancí na délku štěrbiny  $\pm 60\ \mu\text{m}$  a na šířku  $\pm 5\ \mu\text{m}$  viz obr. 1. Vnější rozměry této clony nejsou pro výrobu důležité, hlavní je výroba mikroštěrbiny v požadované přesnosti.



Obrázek 1: Clona s rozměry vyráběné mikroštěrbiny.

Přístroj Optronic OL 750 an obr. 2 je radiospektrometr, což je přístroj sloužící k zaznamenání osvětlenosti a spektrálního složení světla dopadajícího do daného bodu. Je schopný extrémně citlivých spektrálních radiometrických a fotometrických měření v rozsahu  $200\ \text{nm}$  až  $300\ \mu\text{m}$ , což pokrývá celé ultrafialové, viditelné a infračervené spektrum. [1]



Obrázek 2: Radiospektrometr Optronic OL 750 s příslušenstvím [79].

## 1.1 Optické spektrální přístroje

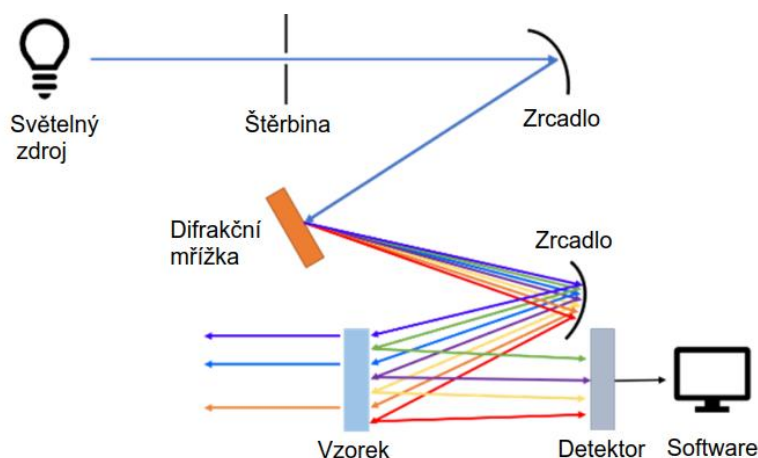
Mikroštěrbiny jsou důležitým prvkem různých optických spektrálních přístrojů. Jedná se především o optické spektrometry, přístroje určené k měření vlnové délky a spektrálního rozložení intenzity zkoumaného záření. Optický spektrometr měří vlastnosti světla, obvykle v blízkosti optické oblasti v elektromagnetickém spektru, tj. ultrafialové, viditelné a infračervené světlo. Používají se v mnoha odvětvích a aplikacích, vždy jako součást různých systémů a přístrojů (nejedná se o samostatné zařízení). Radiospektrometr je samostatný přístroj, který může pracovat připojený s počítačem nebo i samostatně. Jeho součástí je spektrometr s možností kalibrace intenzity světla i zabudovaná optika. Využívá se jak v laboratořích, tak i v externím prostředí tj. v „polních podmínkách“. Měřené světlo na každé vlnové délce bude mít přiřazenou jednotku. [2; 3; 4; 5]

Optické spektrometry (a radiospektrometry) dokáží měřit a určovat celou škálu vlastností světla, například [6]:

- měřit osvětlení,
- korelující teplotu barev, index barevného podání,
- barevné souřadnice v souladu s různými standardy,
- blikání (flickr),
- spektrální rozdělení výkonu,
- vlnovou délku,
- dominantní vlnovou délku.

Hlavní součástí spektrometrů (a současně radiospektrometrů) je monochromátor, který se skládá ze vstupní štěrbinu, kolimačního zrcadla, disperzní soustavy, dekolimačního zrcadla a výstupní štěrbinu. Paprsek ze zdroje světla se po průchodu vstupní štěrbinou stává divergentním (rozbíhavým) a odrazem divergentního paprsku na kolimačním zrcadle se paprsek kolimuje (různoběžné paprsky se transformují na rovnoběžné). Kolimovaný paprsek je pak nasměrován k disperzní soustavě, kterou představují optické hranoly nebo v současnosti více užívané optické ohybové (difrakční) mřížky (zobrazení na obr. 3). [2; 3]

Po dopadu světelného paprsku na ohybovou mřížku se od ní každá vlnová délka odrazí pod jiným úhlem. Kvůli tomu se paprsek po odrazu opět rozbíhá, takže dopadá na další zrcadlo, které ho zaostří a nasměruje k detektoru. Detektor pak zachycuje světelná spektra a měří intenzitu světla jako funkci vlnové délky. Tato data jsou poté digitalizována a vynesena do softwaru jako graf. [2; 3]



Obrázek 3: Průchod světla monochromátorem [3].

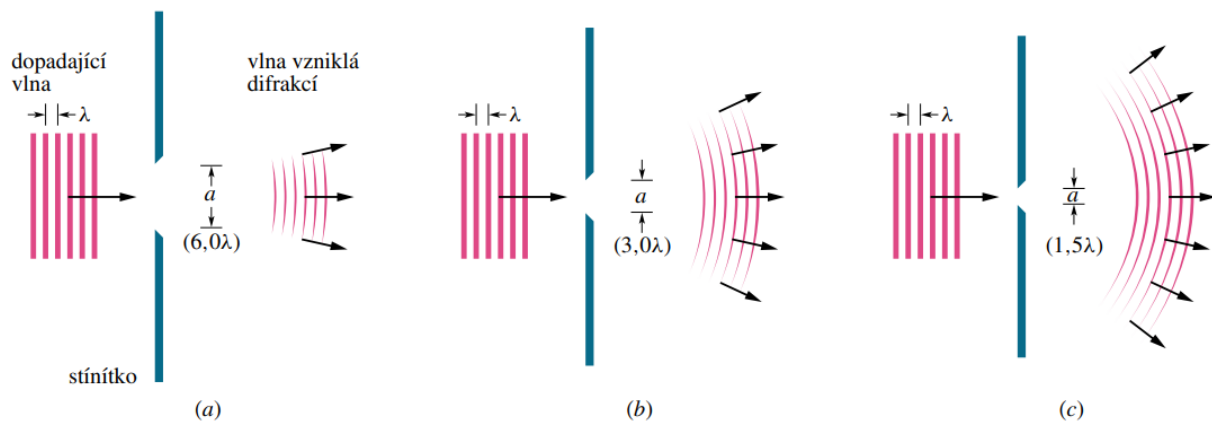
Mřížka tedy působí jako disperzní prvek a rozděluje světlo na jeho jednotlivé vlnové délky. Existují mřížky holografické a ryté, které jsou více používané díky jejich vyšší účinnosti. Rozsah a rozlišovací schopnosti spektrálního přístroje jsou dány právě geometrií a periodou ryté mřížky (čím menší mřížka, tím větší úhlová disperze) a šířkou vstupní štěrbinu. Čím užší je vstupní štěrbina, tím větší je rozlišení, ale tím nižší je signál. [3; 7]

Spektroradiometry mohou měřit optické záření z různých typů zdrojů; avšak špatné potlačení rozptýleného světla ovlivňuje jejich přesnost, proto jsou rozhodujícím faktorem kvality přístroje přesné rozměry vstupní štěrbinu. [8]

### 1.1.1 Difrakce světla

V důsledku difrakce neboli ohybu se světlo nešíří přímočaře, ale pohybuje se jako vlna, takže se šíří i do oblasti geometrického stínu, vzniklého za překážkami. Tato skutečnost se nazývá Huygensův princip, podle kterého se světelná vlna šíří podobně jako vodní vlna, kdy každý bod vlnoplochy je zdrojem sekundární kulové plochy. Později tento princip rozšířil Fresnel, podle kterého se při šíření sekundární vlny interferují (skládají) s příslušným fázovým rozdílem. Difrakci světla tedy popisuje Huygens-Fresnelův princip. [9; 10; 11]

Pokud tedy vlna dopadá na překážku s otvorem, jehož rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou světla, potom se část vlny, která štěrbinou projde, bude ohýbat (difraktovat) a rozšiřovat i do oblasti za otvorem. Závislost ohybu světla na šířce štěrbinu je ukázána na obr. 4, kde můžeme pozorovat nepatrný ohyb světla za štěrbinou, jejíž šířka je šestinásobek vlnové délky světla (případ a), výraznější difrakci na štěrbině trojnásobné šířky vlnové délky světla (případ b) a nejvýraznější ohyb na štěrbině, která má šířku 1,5x větší než vlnová délka světla (případ c). [11]

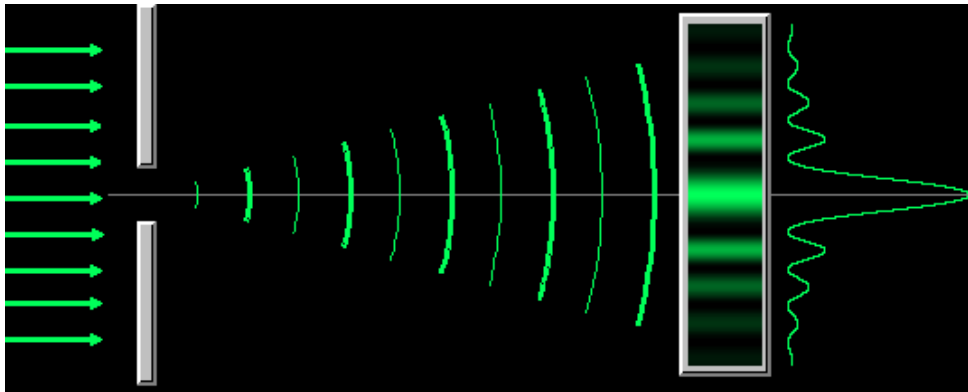


Obrázek 4: Difrakce světla za překážkou [11].

Optické difrakční jevy se rozdělují na Fresnelovu a Fraunhoferovu difrakci. Teorie Fresnelovy difrakce se zajímá o intenzitu (resp. amplitudu a fázi) jako funkci polohy v rovině pozorování umístěné v konečné vzdálenosti za difrakčním stínítkem. Na Fraunhoferovu difrakci lze pohlížet jako na speciální případ Fresnelovy difrakce, podle které se považuje rozložení intenzity jako funkce směru, tedy jako funkci polohy v rovině v nekonečnu. Tento speciální případ je však velmi důležitý při studiu zobrazení optickými soustavami, například i při pozorování difrakčních jevů při průchodu jednou štěrbinou. [10; 11]

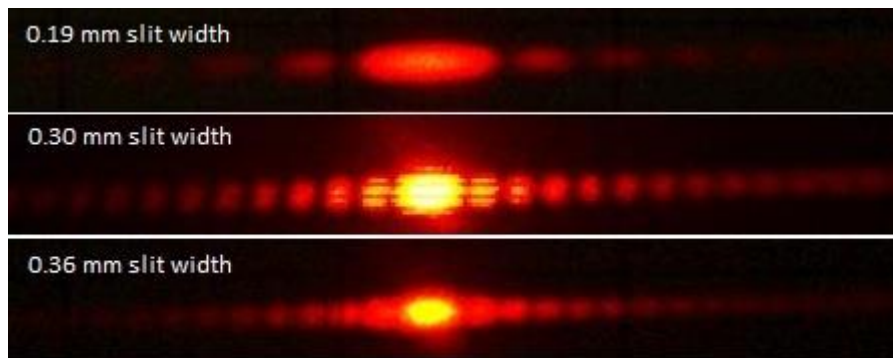
### 1.1.2 Fraunhoferova difrakce na štěrbině

Na štěrbinu dané šířky necháme dopadat kolmo rovnoběžný svazek monofrekvenčního světla o vlnové délce  $\lambda$  a difrakční obrazec sledujeme ve velké vzdálenosti (ideálně v nekonečnu) za štěrbinou. Požadavek na pozorování v nekonečnu lze nahradit spojnou čočkou a sledováním rozložení intenzity v její ohniskové rovině. Světlo se po průchodu štěrbinou chová jako vlna na základě Huygensova principu. Z každého bodu se bude světlo šířit v elementárních vlnoplochách - tj. bude se šířit všemi směry. Dvě vlny (paprsky), které vycházejí z krajních bodů štěrbinu a které dopadají do jednoho bodu na stínítku, kde vzniká ohybový obrazec, v jehož středu je nulté interferenční maximum a po obou stranách se střídají interferenční minima a interferenční maxima. Šíření vlny za štěrbinou, její ohybový obrazec a rozložení intenzity s interferenčním maximum ve středu obrazce lze pozorovat na obr. 5. [9; 12; 13]



Obrázek 5: Šíření vlny, ohybový obrazec a průběh intenzity. [13]

Rozložení interferenčních minim a maxim závisí na šířce štěrbinu a na vlnové délce světla. Bude-li při dané vlnové délce štěrbinu užší, bude větší vzdálenost mezi interferenčními minimy stejného řádu. Tedy užší štěrbinu způsobuje výraznější ohyb světla. Ukázky ohybového obrazce v závislosti na šířce štěrbinu lze pozorovat na obr. 6. [12; 13]



Obrázek 6: Závislost ohybového obrazce na šířce štěrbinu. [15]

Ohyb světla ovlivňuje i zobrazování velmi malých předmětů. Proto se velmi malý bodový objekt nezobrazí v mikroskopu jako bod, ale jako světlý kroužek obklopený soustřednými tmavými a světlými kroužky. Proto má zvětšování obrazu v mikroskopu svoji hranici, za níž není možné rozlišit detaily sledovaného objektu; jeho obraz se pak jeví rozmazaný a neostří. Vlnovými vlastnostmi je tedy omezena rozlišovací schopnost optických přístrojů. Obecně platí, že dva body rozlišíme při pozorování jako oddělené při takové nejmenší vzdálenosti, při níž nulté maximum jednoho bodu splyne s prvním minimum druhého bodu. Při menší vzdálenosti oba body splývají a vidíme je jako bod jediný. Rozlišovací schopnost přístroje je tím větší, čím kratší je vlnová délka použitého světla. [12]

---

## 1.2 Součást se štěrbínou

Součástí, v úvodu zmiňované modernizace a miniaturizace, je také vývoj nových typů clon s mikroštěrbínami, a také testování využití nových materiálů, ze kterých by mohly být vyrobeny. Jestliže má být vytvořena celá optická mřížka sestavená z mnoha clon, je vhodné, aby tyto clony byly co nejtenčí. Tento trend sebou logicky nese také hledání nových způsobů jejich výroby, jelikož nově použité polotovary jsou velmi tenké (jedná se o kovové fólie o tloušťce v řádech mikrometrů), tak stávající použité technologie již nepřinášejí požadovanou kvalitu a přesnost výroby. Zde se tedy nabízí využití nekonvenčních technologií, které se pro výrobu dílů v řádech mikrometrů již osvědčily.

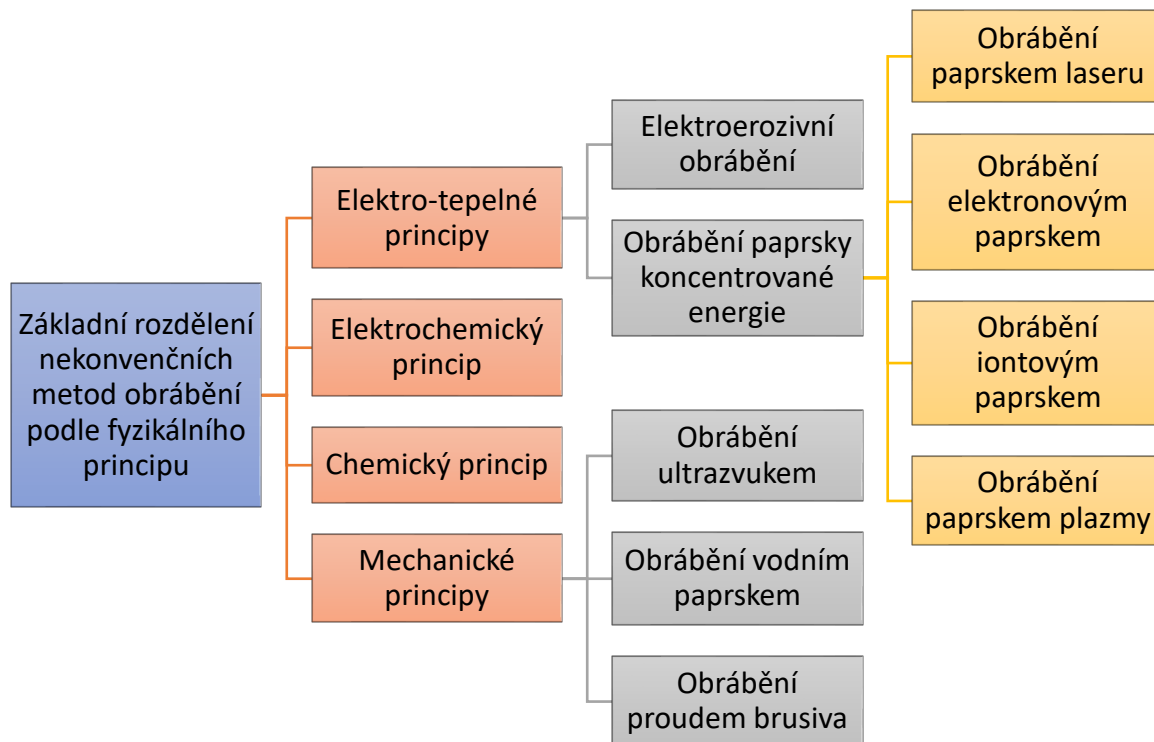
Vyráběná součást je clona s mikroštěrbínou, která slouží v přístrojích ke snížení průchodu celkového množství světla a usměrnění paprsků světla, výsledkem je úzký kolimovaný paprsek (paralelní světelné paprsky), který se používá při další analýze. Přesnost vyrobené mikroštěrbiny pak přímo ovlivňuje přesnost výsledného měření přístroje.

Aby byl ohyb světla na štěrbíně dobře pozorovatelný, musí mít štěrbina šířku srovnatelnou s vlnovou délkou světla. Takové štěrbiny se špatně realizují v praxi. Ale vytvořit v praxi optickou mřížku, která je tvořena sadou několika (resp. několika desítek nebo dokonce stovek) štěrbín, je už jednodušší. [12]

Tyto mřížky a clony s mikroštěrbínami se využívají v celé řadě přístrojů a zařízení, např. jako vstupní, vnitřní nebo výstupní štěrbiny pro spektrometry, fotometry, kolmátory a monochromátory. Nachází využití v i mikroskopii a dalších zobrazovacích přístrojích. [14]

## 2 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Pojem nekonvenční metody obrábění zahrnuje takové metody, které na rozdíl od klasického třískového obrábění využívají pro mechanismus úběru materiálu fyzikální principy a jevy (např. tepelné, chemické, elektro-chemické) zobrazeno na obr.7. [16]



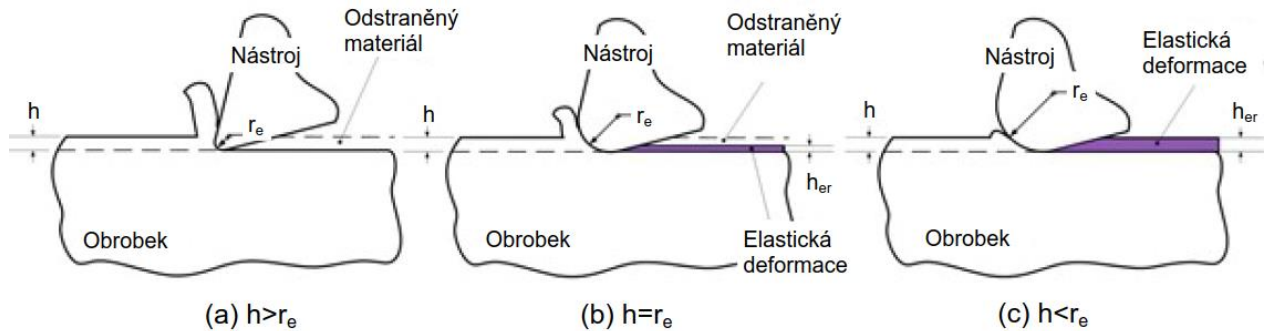
Obrázek 7: Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění podle fyzikálního principu. [16]

Pro třískové obrábění mohou být vlastnosti obráběných materiálů jako je vysoká tvrdost, pevnost, houževnatost či vysoká odolnost proti opotřebení překážkou. Materiály s těmito mechanickými vlastnostmi nelze hospodárně obrábět standardními metodami. Zde vzniká příležitost pro nekonvenční metody obrábění, které nezávisí na mechanických vlastnostech materiálů, ale na jejich fyzikálních vlastnostech (chemické složení, tepelná vodivost, elektrická vodivost, teplota tavení). Tyto metody jsou tedy schopné obrábět i materiály nazývané jako těžkoobrobitelné (superslitiny, kompozity), které se čím dál častěji využívají v leteckém, kosmickém nebo zbrojním průmyslu a lékařství. [16; 17]

Další přednosti nekonvenčních technologií se ukazují s čím dál většími požadavky na výrobu menších dílů - konkrétně při mikroobrábění (termín se podle College International pour la Recherche en Productique (CIRP) Scientific Technical Committee Paper používá při obrábění rozměrů v rozsahu 1  $\mu\text{m}$  až 999  $\mu\text{m}$ ). Konvenční metody při mikroobrábění naráží na množství nežádoucích efektů způsobených právě malými rozměry – nazývají se „size effects“ a patří sem především geometrie břitu řezného nástroje, velikost zrn obráběných materiálů a jejich mikrostruktura. Tyto faktory se při mikroobrábění stávají zásadními a ovlivňují řezný proces a v konečném důsledku i výslednou přesnost obrábění, celistvost struktury a kvalitu povrchu obrobku. [19, 20, 21; 22; 23]

- Geometrie břitu řezného nástroje: Při obrábění lze považovat špičku obráběcího nástroje za ostrý hrot, ačkoli dokonale ostrý není a poloměr zaoblení zanedbáváme (obr. 8a). Ale v momentě, kdy se jedná o mikroobrábění, už toto předpokládat nelze a musíme počítat s poloměrem zaoblení nástroje. Pokud je pak jmenovitá tloušťka třísky  $h$  srovnatelná s poloměrem zaoblení břitu  $r_e$ , dochází k řezání s negativním úhlem čela a materiál se

už neodděluje stříhem, ale převážně kompresí a vtlačováním pod nástroj, což se označuje jako tzv. ploughing effect - rytí neboli rycí efekt, který je zobrazen na obr. 8b. Při dosažení minimální tloušťky třísky se už materiál neodděluje vůbec a dochází pouze k elastické deformaci. Tím vznikají ořepky a snižuje se kvalita povrchu obrobku jako je zobrazeno na obr. 8c.



Obrázek 8: Závislost velikosti poloměru zaoblení na tloušťce třísky [23].

- Velikost zrn obráběného materiálu: při obrábění lze považovat většinu standardních materiálů za homogenní, ale při mikroobrábění je velikost odebírané vrstvy většinou srovnatelná s velikostí zrn materiálu nebo i menší, a obrábění probíhá i skrz zrna. Nástroj při mikroobrábění pak musí čelit proměnlivé řezné síle při procházení skrz jednotlivá zrna s různými orientacemi. Břit nástroje je pak náchylný k opotřebení a k únavovému lomu, a výsledný povrch obrobku má nízkou kvalitu a vysokou drsnost.

Pro výrobu zadaného dílu o tloušťce 125 mikrometrů, do kterého má být vytvořena štěrbiná o rozměrech 5000  $\mu\text{m}$  na 170 mikrometrů, připadají v úvahu nekonvenční metody elektroerozivní obrábění a obrábění paprskem laseru. Dále pak lze využít chemické obrábění (např. fotochemické obrábění, tzv. chemické prostřihování), nebo obrábění elektronovým paprskem nebo obrábění iontovým paprskem (fokusovaný iontový paprsek). Avšak poslední zmíněné metody jsou finančně nákladnější a obvykle i méně dostupné.

## 2.1 Elektroerozivní obrábění EDM

Elektroerozivní obrábění je bezkontaktní metoda vhodná pouze pro materiály, které jsou elektricky vodivé nebo polovodivé. Úběr materiálu funguje na principu opakujících se elektrických výbojů mezi nástrojem a obrobkem v dielektrickém prostředí. V místě výbojů vznikají lokální vysoké teploty a dochází k tavení a odpařování malého množství materiálů obou elektrod. [16; 17; 24]

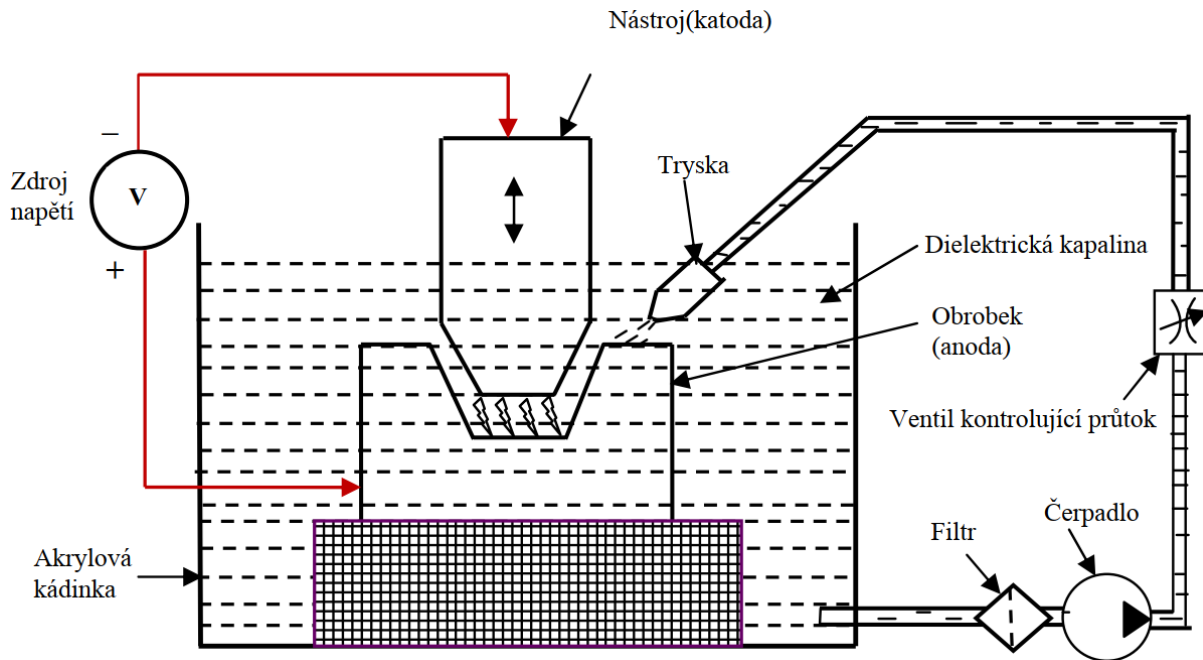
V závislosti na fyzikálních podmínkách úběru materiálu se elektroerozivní obrábění dělí na dvě nejvíce využívané metody: elektroerozivní hloubení SEMD (Sinking Electrical Discharge Machining), kde se používá jako nástroj elektroda v negativním tvaru požadovaného finálního tvaru obrobku. Druhá velmi používaná metoda je elektroerozivní drátové řezání WEDM (Wire Electrical Discharge Machining), kde se jako elektroda využívá elektricky vodivý drát. Pod elektroerozivní obrábění se řadí i další, méně využívané metody - elektroerozivní broušení EDG (Electrical Discharge Grinding), elektroerozivní vrtání (Electrical Discharge Drilling) nebo elektroerozivní frézování (Electrical Discharge Milling). [16; 23; 24; 25]



### 2.1.1 Pracovní schéma SEDM

Obrobek a pracovní nástroj tvoří pár elektrod, které jsou připojeny ke zdroji stejnosměrného napětí. Mezi elektrodami je pracovní mezera (jiskrová mezera) vyplněná dielektrickou kapalinou. Součástí pracovního schématu metody bývá i filtr kvůli znečištění dielektrické kapaliny, čerpadlo a ventil kontrolující průtok jak je zobrazeno na obrázku č. 9. [16; 24]

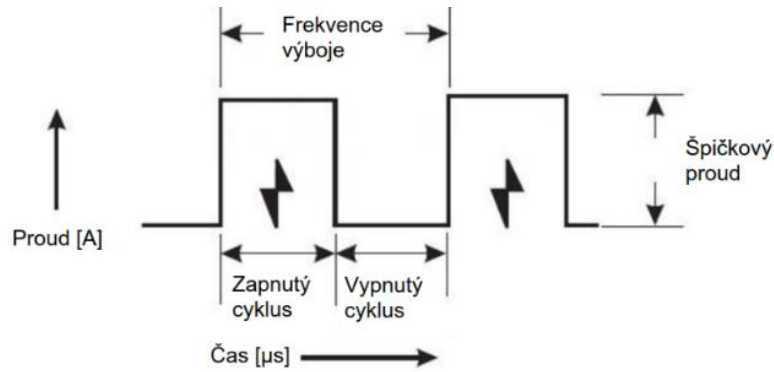
Nástroj se postupně posouvá směrem k obrobku, dokud se nepřiblíží do dostatečné vzdálenosti, aby nastal výboj. Vzdálenost pro jeho vznik je u mikroelektroerozivního hloubení menší než 10 mikrometrů. Nástroj současně vibruje, čímž pomáhá vytvářet vhodné podmínky pro výboj a současně podporuje odstraňování částic roztaveného materiálu pomocí výměny dielektrické kapaliny v mezeře mezi elektrodami. [16; 24; 25]



Obrázek 9: Schéma principu MEDM [24].

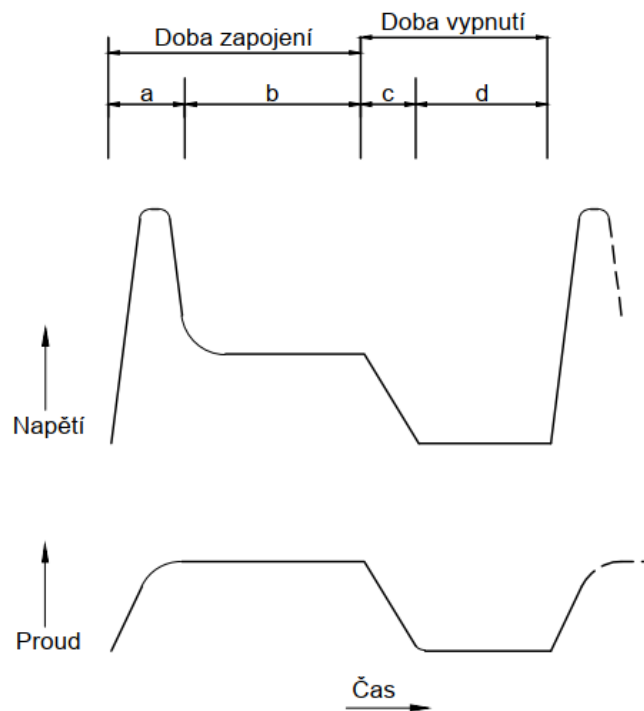
### 2.1.2 Princip elektroeroze a mechanismus vzniku výboje

Proces odebrání materiálu probíhá tak, že stejnosměrný proud je do pracovního obvodu dodáván v pulzech, které jsou statisticky rozloženy po celé ploše nástroje a které mají čtvercový průběh, jak je zobrazeno na obr. 10. V době zapnutí tak prochází obvodem špičkový (maximální) proud, v době vypnutí je proud nulový. V ideálním případě každý impulz vytvoří jeden výboj. Doba vypnutí (přerušení) umožní, aby narušené částice byly odplaveny z místa narušení proudící dielektrickou kapalinou. Čas přerušení musí být delší než čas deionizace kapaliny, aby bylo zabráněno vzniku trvalého výboje a úběru materiálu pouze v jednom bodě obrobku. Posouváním nástroje směrem k obrobku se pak realizuje samotný úběr materiálu do větších hloubek. [17; 24]



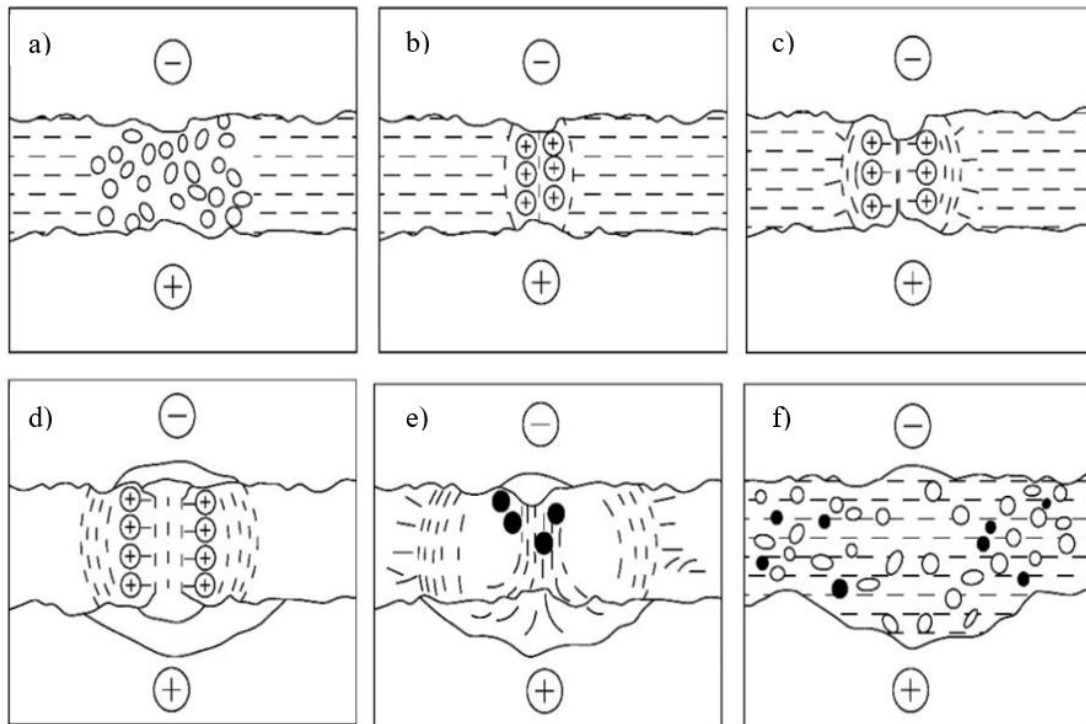
Obrázek 10: Průběh impulzů [17].

Průběhy napětí a proudu v závislosti na čase zapojení a vypnutí jsou znázorněny na obr. 11. Napětí narůstá na maximum po zapojení (část a - čas ionizace), poté klesá (část b - čas vybíjení a odběr materiálu elektroerozí). Vypnutí zdroje způsobí pokles napětí na nulu (část c - čas deionizace a část d - čas doběhu). [17]



Obrázek 11: Časový průběh impulzů při EDM [17].

V čase zapojení vzniká a probíhá výboj, který vede ke vzniku kráterů odtavením a odtržením částic materiálů jak na nástrojové elektrodě, tak na obrobku. Detailní průběh vzniku výboje až po vznik kráteru je znázorněn na následujícím obrázku č. 12.



Obrázek 12: Mechanismus vzniku výboje [26].

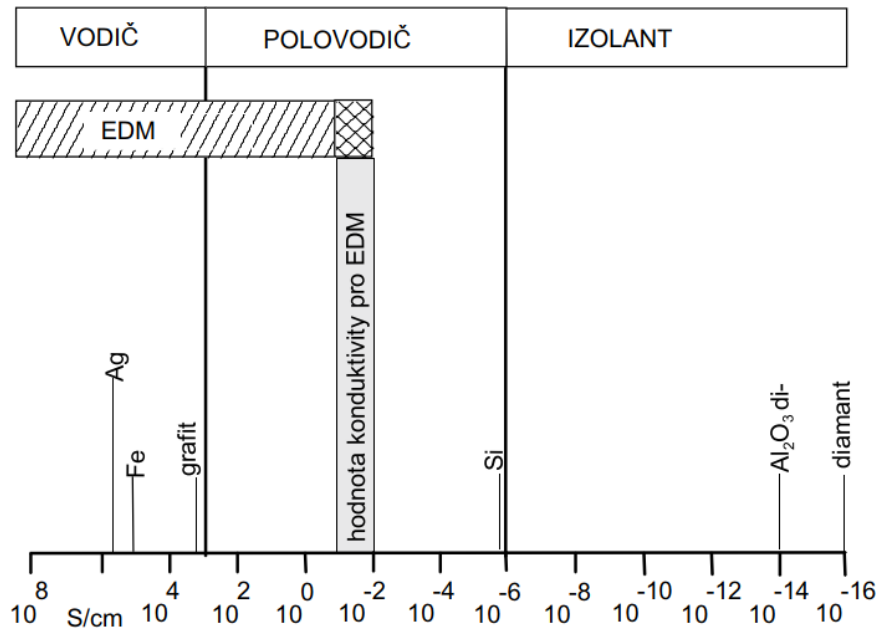
- Polarizace – mezi nejbližšími body elektrod vzniká při zvyšování napětí silné elektrické pole, jehož výsledkem je polarizace molekul a iontů dielektrika.
- Oddělování kladných a záporných částic, tok elektrického proudu přes dielektrikum se zvyšuje při současném poklesu napětí.
- Vznik plazmového kanálu způsobeného ustálením velikosti napětí a proudu. Plazmový kanál je tvořen z kladných iontů, volných elektronů a par kovů elektrod, také plynem z rozkládající se dielektrické kapaliny.
- Tavení materiálu – uspořádané ionty tvoří proudový oblouk/výboj, vznikají teploty 4 000 – 12 000 °C, tyto teploty jsou vyšší než teploty tavení materiálů elektrod. 10 – 40 % materiálu se tedy roztaví a částečně odpaří.
- Odtržení částic materiálu – tlak v plazmovém kanálu klesá a částice z obou elektrod se odtrhávají.
- Vznik mikroskopického kráteru na obou elektrodách. [25; 26]

Úběrem materiálu v místě výboje se vzdálenost mezi těmito dvěma body elektrod zvýší, a další výboj proto vznikne na novém místě, kde se momentálně nachází následující dva nejbližší body elektrod. Nastavením parametrů procesu (napětí, frekvence, proud) lze kontrolovat energii jiskry. Část energie výboje absorbuje dielektrická kapalina, další část je rozptýlena radiací a zbytek absorbován nástrojem a obrobkem pomocí kondukce. Toto dělení energie ovlivňuje mnoho faktorů, například parametry výboje, typ dielektrické kapaliny a materiál elektrody a obrobku. [24; 27]

### 2.1.3 Obráběné materiály a materiály nástroje

Metodou EDM lze obrábět jen materiály, které jsou elektricky vodivé nebo polovodivé. Tato vlastnost závisí na měrné elektrické vodivosti (konduktivitě) materiálu, která popisuje schopnost látky vést elektrický proud (čím vyšší hodnota konduktivity, tím lépe látka proud

vede). Na následujícím obr. 13 je zaznačeno, jakých hodnot konduktivity musí látky dosahovat, aby je bylo možno obrábět metodou EDM. Limitní hodnota je 0,01 S/cm. [28]



Obrázek 13: potřebná hodnota měrné elektrické vodivosti [28].

Pokud materiál splňuje podmínku elektrické vodivosti, pak ho lze obrábět metodou EDM bez ohledu na jeho mechanické vlastnosti. Je tak možné obrábět i velmi tvrdé materiály jako žíhaná nebo kalená ocel, titanové slitiny, karbidy wolframu, vodivá keramika nebo polykrystalické diamanty. [24; 28]

Výběr nástroje je jeden z hlavních parametrů pro dosažení požadované přesnosti a tvaru obrobku. Pro mikroobrábění se preferují elektrody z wolframu a karbidu wolframu, ale lze obrábět i pomocí nástroje z mědi, mosazi, hliníku, stříbra, grafitu, jejich slitin (wolfram-stříbro, wolfram-měď) nebo nerezové oceli. Jedním z důležitých parametrů při výběru materiálu nástrojové elektrody je i její tepelná vodivost, čím vyšší je její hodnota, tím méně se povrch elektrody zahřívá při obrábění a s tím souvisí i nižší opotřebení nástrojové elektrody. Také vyšší elektrická vodivost vede k nižšímu opotřebení nástroje. [24; 28]

Podle způsobu obrábění se volí polarita elektrod [32]:

- Při krátkých impulzech nastává v plazmovém kanále tzv. elektronová vodivost (více energie se uvolňuje v oblasti anody). Potom se obrobek zapojí jako kladný (anoda) a nástrojová elektroda jako záporná (katoda).
- Pokud ale naopak použijeme dlouhé impulzy k většímu odběru materiálu, potom převládá iontová vodivost (více energie se uvolňuje v oblasti katody) a potom použijeme opačné zapojení.

#### 2.1.4 Dielektrické médium

Velmi důležitá je v procesu elektroerozivního obrábění volba dielektrického média, které zde plní i funkci rezného média k vylepšení kvality povrchu, korozní odolnosti a odolnosti proti opotřebení. Většinou se využívají kapaliny, například cyklické uhlovodíky (petrolej, transformátorový olej, případně syntetické oleje) nebo destilovaná voda díky její vysoké teplotní vodivosti a nízkému koeficientu viskozity. Dlouhé pracovní časy teplotu vody neovlivňují a to zlepšuje MRR (material removal rate – poměr/množství odebraného materiálu).

Voda je navíc také nejvhodnější volbou z hlediska ekologie. Nadruhou stranu, některé výzkumy prokazují, že využití vody jako dielektrika se dosahuje horšího povrchu a přesnosti obrábění součástí. Proto se při mikroobrábění nejčastěji volí petrolej. [24; 27; 30]

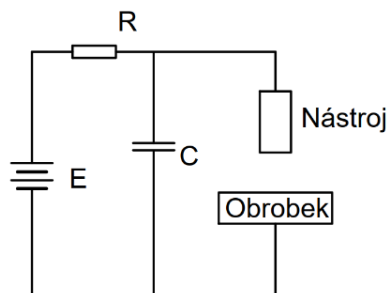
Poslední výzkumy naznačují, že přidávání prášků do dielektrika efektivně zlepšuje kvalitu výsledného obrobku tím, že se zvýší MRR a sníží opotřebení nástroje. Například přidáním mikro částic sulfidu molybdeničitého do dielektrické kapaliny a využití ultrazvukové vibrace nebo přidáním hliníkového prášku do kerosinu během MEDM zlepšuje výslednou kvalitu povrchu obrobku a MRR. [24; 30]

### 2.1.5 Zdroje napětí:

Kritickou komponentou pro dosažení požadovaných parametrů přesnosti je zdroj stejnosměrného pulzního napětí. Jeho účelem je měnit střídavý proud na pulzní stejnosměrný proud potřebný k tvoření jisker. Proto účinnost metody EDM určuje i typ použitého zdroje. [30; 32]

- Relaxační generátory RC a RLC

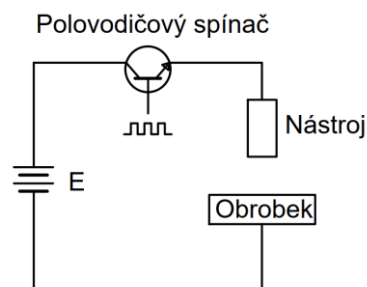
Princip těchto generátorů spočívá v periodickém nabíjení a vybíjení kondenzátoru, který je v elektrickém obvodu zapojený paralelně k elektrodám viz obr. 14. Kondenzátor je připojen ke stejnosměrnému zdroji napětí, a po nabití na hraniční hodnotu napětí, při kterém v kondenzátoru dojde k průrazu dielektrika, se uložený náboj velice rychle vybije pomocí jiskry (výboje). V tomto uspořádání se tvoří napěťová charakteristika ve tvaru pilové vlny. Tyto generátory jsou preferované v MEDM pro obrábění mikrostruktur karbidu wolframu, kde je preferovaná přesnost obrábění a výsledný povrch obrobku. [30; 32]



Obrázek 14: Elektrický obvod - relaxační generátor [30].

- Polovodičové / pulzní generátory

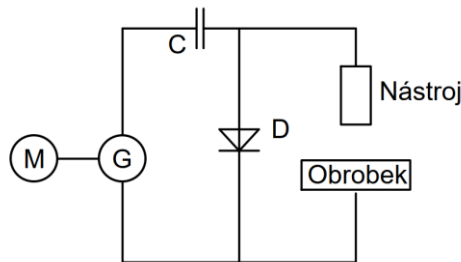
V pulzních generátorech se místo kondenzátoru a rezistoru používají polovodičová zařízení, například tranzistor. Ty se přepínají mezi vypnutým stavem a stavem nasycení a generují obdélníkové pulzy, kde se střídá nulové napětí a napětí zdroje. Pulzní generátory umožňují široké nastavení elektrických parametrů a vyznačují se vysokou spolehlivostí a vyšší účinností než RC generátory. Schéma na obrázku 15. [30; 32]



Obrázek 15: Elektrický obvod - pulzní generátor [30].

- Rotační generátory

Tvar napěťové charakteristiky závisí na konstrukci generátoru a na stejnosměrném motoru viz obr. 16. Rotační generátory umožňují velké výkony jednotlivých impulsů a jsou proto vhodné na hrubování. Na dokončování a mikroobrábění se nevyužívají. [30;32]



Obrázek 16: Elektrický obvod - rotační generátor [30].

### 2.1.6 Rozdíly mezi EDM a MEDM

Mikroelektroerozivní obrábění MEDM a elektroerozivní obrábění se ve své podstatě liší pouze v rozměrech (nástroje, obráběné plochy, mezery mezi elektrodami) a v nastavených hodnotách generátorů viz tabulka 1. U mikroobrábění se tedy volí menší jiskrová mezera, obrábění probíhá s nižším proudem a napětím a výboj trvá podstatně kratší dobu. Čím přesnější a menší rozměry je třeba obrábět, tím nižší se volí parametry (proud, napětí a především doba trvání výboje). [24; 32]

Tabulka 1: Rozdíly mezi EDM a MEDM [24].

| Parametry               | Konvenční EDM               | MEDM                        |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Rozměr nástroje         | Větší než 999 $\mu\text{m}$ | Menší než 999 $\mu\text{m}$ |
| Mezera mezi elektrodami | 10 – 500 $\mu\text{m}$      | Méně než 10 $\mu\text{m}$   |
| Otevřený okruh napětí   | 4 – 400 V                   | 10 – 120 V                  |
| Špičkový proud          | Větší než 3 A               | Menší než 3 A               |
| Trvání výboje           | 0.5 – 8 ms                  | 50 ns - 100 $\mu\text{s}$   |
| Energie výboje          | High                        | Low                         |

### 2.1.7 Charakteristiky povrchu po EDM

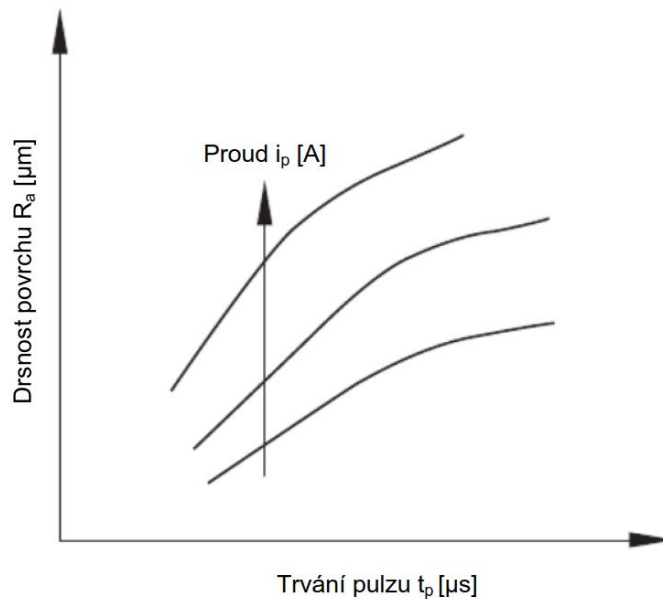
Struktura povrchu (geometrická odchylka povrchu od jeho ideálního tvaru) u metody EDM je dána právě velikostí a hloubkou kráterů, které vznikají po elektrickém výboji. Velikost kráterů ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti materiálů (obrobku, ale i elektrody) a volba dielektrického média, ale především parametry výboje – velikost proudu a trvání pulzu. Právě z těchto parametrů je možné spočítat hodnotu drsnosti povrchu  $R_a$  [45]:

$$R_a = 0,0225 \cdot i_p^{0,29} \cdot t_p^{0,38} \quad [\mu\text{m}] \quad (2.1)$$

kde:  $i_p$  – proud [A]

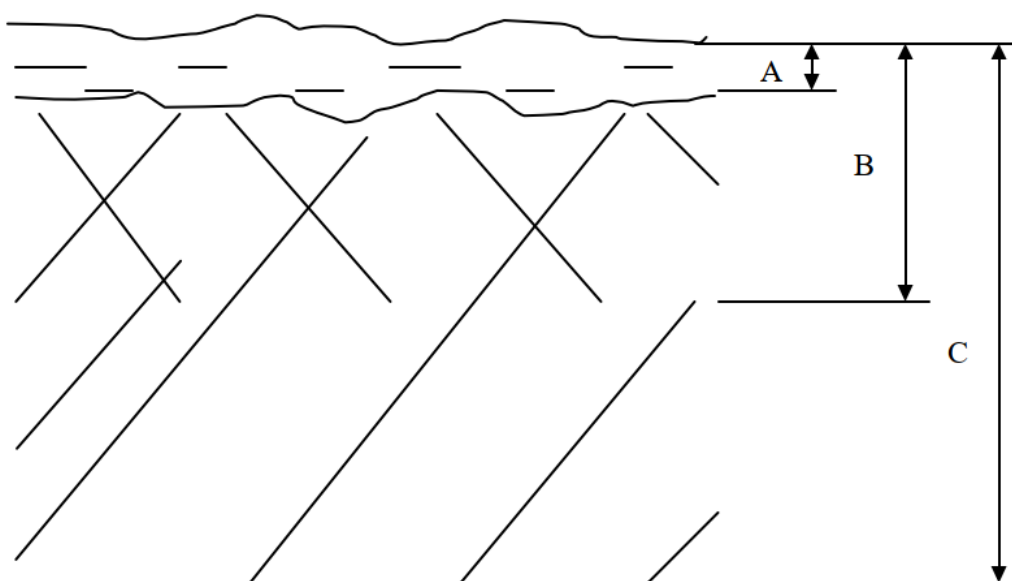
$t_p$  - trvání pulzu [ $\mu\text{s}$ ]

Z uvedeného vzorce vyplývá, že čím menší se volí proud a kratší trvání pulzu, tím lepší bude výsledná kvalita povrchu. To je zobrazeno i na obr. 17:



Obrázek 17: Závislost drsnosti povrchu na proudu a trvání pulzu [45].

Vzhledem k vysokým teplotám (okolo 10 000 °C), které vznikají při výboji, dochází i k teplotnímu ovlivnění povrchové vrstvy obrobku. Jedná se o zbytky materiálu, který se nataví, ale neodpaří a není odplaven dielektrickou kapalinou. Znovu se tak na povrchu obrobku ochladí. To vede ke vzniku teplotně ovlivněné oblasti se zvýšenou tvrdostí na povrchu obráběného materiálu - tzv. bílá vsrtva zorazena na obr. 18 A. Na obrázku je také znázorněna oblast B, která vykazuje znečištění materiálem nástrojové elektrody a dielektrickou kapalinou důsledkem difuze. Oblast C je celková teplotně ovlivněná oblast. [32; 45]



Obrázek 18: Ovlivněné oblasti povrchu po EDM [32].

---

### Výhody metody

- Možnost obrábění vodivých materiálů bez ohledu na mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, houževnatost, křehkost)
- Na obrobek nepůsobí žádné mechanické síly
- Přesnost a čistota povrchu - na hranách nezůstávají ořepy [16].

### Nevýhody

- Nelze obrábět svary
- Vysoká energetická náročnost
- Náklady na výrobu elektrody [16].

## 2.2 Obrábění paprskem laseru

Slovo laser je zkratka z anglického termínu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, přeloženo jako „zesilování světla stimulovanou emisí záření“, a označuje zařízení, které generuje elektromagnetické záření (světlo) pomocí stimulované emise fotonů a toto záření opticky zesiluje. [40]

Obrábění laserovým paprskem je jedna z nejrozšířenějších nekonvenčních metod obrábění vhodná pro téměř všechny materiály. Laserový paprsek je bezkontaktní nástroj, který lze použít u mnoha aplikací, nejen pro dělení, opracování a úpravu topografie povrchu materiálů (řezání, vrtání, gravírování), ale také jako technologie jejich spojování či tepelného zpracování (svařování, 3D tisk, kalení, nanášení povlaků). Laser se využívá v různých oblastech výroby, kde nestačí konvenční technologie nebo je není možné aplikovat. Klasické metody obrábění v poslední době nemusí splňovat stále přísnější požadavky na rychlost i kvalitu zpracování materiálu, a hlavně ekologickou náročnost procesu. Laserové obrábění se řadí mezi procesy, kde je úběr materiálu proveden tepelným účinkem. [34; 35; 36; 37]

Laserové svařování umožňuje svařování i konvenčně nesvařitelných materiálů (například plasty). Výsledné svary jsou navíc pravidelné a hladké, a většinou tedy není třeba jejich následné čištění a broušení. Svařování probíhá velice rychle a množství vneseného tepla je tak nižší než při konvenčním svařování, tím jsou zajištěny i nízké teplotní deformace svaru. Nevýhodou této technologie je potřeba zajištění ochranného zabezpečení před laserovým zářením. [37; 38]

Moderní metodou je i laserové kalení, které umožňuje zlepšování vlastností povrchu obrobků (zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy, zvýšení odolnosti proti opotřebení a další), během procesu dochází jen k malým deformacím a nevytvářejí se žádné praskliny a trhliny. Navíc je možné kalit lokálně jen požadované plochy různých geometrií. [37; 39]

Asi nejvyužívanější metodou je laserové řezání. Touto metodou lze obrábět všechny materiály obvyklé v průmyslovém zpracování – všechny kovy, oceli, plasty, sklo, dřevo i keramiku. Lze řezat polotovary různé tloušťky, od pár mikrometrů až po cca 30 mm. [37]

### 2.2.1 Základní princip

Světlo vzniká přechodem atomů z vyššího do nižšího energetického stavu. Laserové světlo vzniká stimulovanou emisí, která ke svému vzniku vyžaduje vnější podnět. Nejprve je nutné, aby se co nejvíc atomů dostalo do vybuzeného stavu a pak v něm setrvalo dostatečně dlouhou dobu. Látky, ve kterých k tomuto jevu může dojít, se nazývají aktivní prostředí. [65]

U prvního zkonstruovaného laseru byl aktivním prostředím krystal rubínu a buzení zajišťovala výbojka, podobná jako se používá u fotografických blesků. Světlo výbojky ozáří rubínovou tyčinku, atomy jsou vybuzeny na vyšší energetickou hladinu a zůstávají ve vybuzeném

---

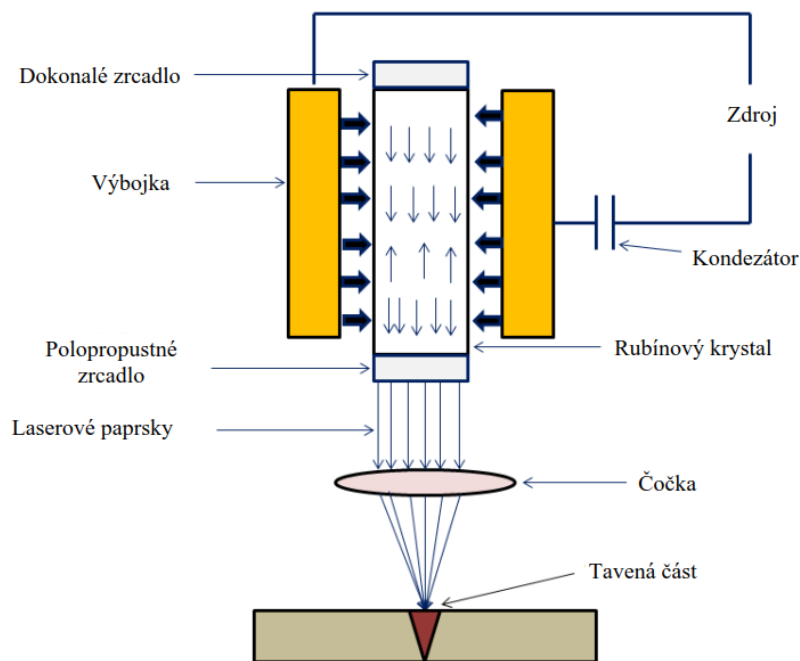


(excitovaném) stavu. Dále se některý z vybuzených atomů se náhodně vrátí do základního stavu a vyzáří foton. Tento foton vyvolá stimulovanou emisi u dalšího atomu, vzniklý foton stimuluje emisi u dalšího atomu atd. Fotonů začíná přibývat a v tyčince vzniká stále silnější paprsek koherentního laserového světla. [65]

Díky konstrukci optického rezonátoru se dvěma zrcadly se udrží fotony uvnitř aktivního prostředí dostatečně dlouhou dobu, aby se v něm nakumulovalo co nejvíc energie. Konce rubínové tyčinky představují zrcadla, které jsou zbrušena přesně rovnoběžně a kolmo na osu tyčinky. Jeden konec je postříbřen a tvoří dokonalé zrcadlo (odrazivost až 99,9 %), druhé zrcadlo je částečně propustné. [65]

Fotony se uvnitř rezonátoru se odrážejí od zrcadel sem a tam a stimuluji další vybuzené atomy. Současně fotony, které se nešíří ve směru osy tyčinky, se odráží od rovnoběžných zrcadel, dokud po několika odrazech neuniknou z tyčinky bez užitku ven. Po určité době zůstanou jen fotony, které se šíří ve směru osy a dopadají na plochy zrcadel kolmo, odrážejí se od nich přesně zpět a pohybují se v tyčince stále sem a tam. Intenzita světla uvnitř tyčinky postupně narůstá. Jakmile přesáhne určitou mez, silný světelný impulz vyrazí polopropustným zrcadlem ven jako laserový paprsek soustředěný do jednoho bodu. Po vyzáření fotonů se atomy vrátí do základního stavu a po záblesku výbojky (buzení) se děj opakuje. [65]

Součásti laseru s rubínovou tyčinkou jsou zobrazeny na obr. 19 včetně pohybu usměrněných fotonů.



Obrázek 19: Princip laseru s rubínovým krystalem [65].

V současné době se jako aktivní prostředí využívá nepřeberného množství látek všech skupenství, které se budí různými metodami [66]:

- Při optické excitaci se energie potřebná ke vzniku laserového záření dodává ve formě světelné záblesku, například pomocí diody nebo výbojky. Používá se u pevnolátkových, plynových a kapalinových laserů.

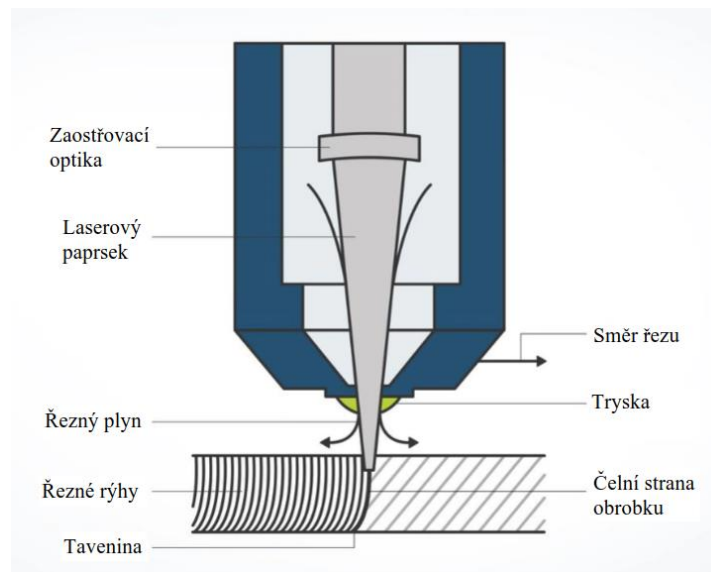
- U buzení elektrickým polem je základem elektrický výboj, ke kterému dochází v plynové náplni laseru. Lasery pracují v kontinuálním provozu a jejich výkon lze měnit změnou objemu plynu nebo jeho plynulou cirkulací.
- U chemické excitace se využívá k čerpání energie do aktivního prostředí exotermických chemických reakcí, např. reakce vodíku s fluorem nebo disociací molekul jódu ultrafialovým zářením. Využívají se i další metody buzení, například pomocí vysokoenergetického elektronového svazku, expanzí horkého plynu, radiofrekvenčních vln, atd.

### 2.2.2 Laserové zařízení

Laserové zařízení se skládá z několika základních komponent, které můžeme vidět na obr. 20.

Laserová hlavice obsahuje laserové médium a rezonátor (zaostřovací optiku), což je dutý prostor obsahující aktivní prostředí. Optický systém umožňuje zformovat a zesílit elektromagnetické záření, a určuje vlastnosti laserového paprsku (koherenci, intenzitu záření, spektrální a prostorové charakteristiky). Skládá se většinou ze soustavy odrazných zrcadel různých průměrů a zakřivení. Řeznou tryskou (jejímž středem prochází laserový svazek) je přiváděn asistenční plyn. [36; 40; 67]

Přístroj musí mít vhodný vnější zdroj energie, kterým lze vybudit (excitovat, čerpat) aktivní prostředí. Budicí zařízení závisí na typu média, plyné médium je buzeno nejčastěji elektrickým výbojem, pevné médium je buzeno téměř vždy opticky pomocí výbojek nebo záření jiného laseru. Buzením dodáváme do laseru energii, která je poté právě pomocí procesu stimulované emise vyzářena v podobě laserového paprsku. [36; 40]

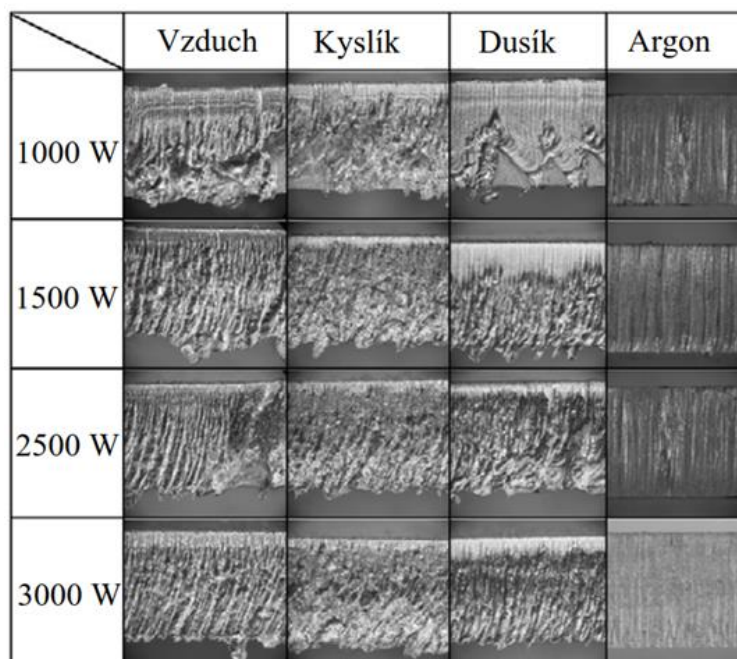


Obrázek 20: Obecné schéma laseru [67].

Asistenční nebo ochranné plyny jsou důležitou součástí laserové techniky, ochranné plyny slouží pro svařování a pájení k ochraně svařovaného materiálu před okolní atmosférou (před absorpcí kyslíku, dusíku a vlhkosti a následné oxidaci povrchu). Kromě toho ochranný plyn zajišťuje stálé odstraňování plazmy vystupující nad svařenec. Základem směsí ochranných plynů je hélium a argon. Přidáním  $\text{CO}_2$ , kyslíku nebo vodíku je možné ovlivnit svařovací proces rovněž termicky a metalurgicky. Typické směsi ochranných plynů jsou přitom argon helium, argon kyslík a argon vodík. [77]

Řeznou tryskou, jejímž středem prochází laserový svazek, je přiváděn asistenční plyn. Při vlastním procesu řezání laserem se uplatňují tři fyzikální jevy – spalování kyslíkem, tavení a sublimace (odpaření materiálu). V praxi se většinou tyto jevy při řezání kombinují. Pro dosažení optimálních řezných parametrů a kvality řezné plochy je důležité použití vhodných řezných (asistenčních) plynů, ale i dodržení jejich předepsané čistoty a nastavení správného pracovního tlaku a zajištění potřebného množství plynu. U laserů s vyšším výkonem se navíc setkáváme s plynem pro proplach optické cesty. Zpravidla se používá dusík a jeho úkolem je ochrana optické cesty před znečištěním prachem, vlhkostí a jinými nečistotami. [77; 78]

- Kyslík se používá pro řezání nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Materiál je laserovým svazkem ohříván a poté spalován v proudu čistého kyslíku. Produkty hoření (oxidy) a tavenina jsou následně dynamickým účinkem proudu kyslíku vyfukovány ve formě strusky a vzniká řezná spára. Řezná plocha je pochopitelně pokryta vrstvou oxidů. Kyslík se v některých případech používá i pro řezání hliníku a jeho slitin. Výhodou je zvýšení řezné rychlosti, což je však negativně kompenzováno snížením kvality řezu formou jeho oxidace a horší drsnosti povrchu.
- Dusík je vhodný pro řezání ocelí nezelezných kovů. Řezaný materiál je laserovým svazkem ohříván na teplotu tavení a vyfukován proudem řezného dusíku o tlaku až 32 bar. Tímto procesem vzniká řezná spára. Díky inertizačnímu účinku dusíku jsou řezné plochy kovově lesklé a bez oxidů.
- Materiály jako titan, tantal, zirkon nebo magnezium jsou náchylné k tvorbě oxidů a nitridů. Z tohoto důvodu je vhodné zvolit jako řezný plyn argon. Argon je inertní plyn a jeho aplikací vznikají kvalitní řezné plochy bez výskytu oxidů a nitridů.
- Pro laserové řezání lze použít i stlačený vzduch, tím ale odpadají hlavní výhody laserového řezání, tedy vysoká řezná rychlost a vynikající kvalita řezu zobrazeno na obr. 21. Použijeme-li stlačený vzduch pro řezání austenitických ocelí, dochází ke snížení řezné rychlosti a vzniku náběhových barev, stejná situace je u hliníku a jeho slitin, kde použitím vzduchu vzniká zoxidovaná řezná plocha, která vyžaduje další opracování. Ani při řezání nelegovaných a nízkolegovaných ocelí se nedosahuje srovnatelných výsledků jako při použití optimálního media.



Obrázek 21: Ukázka řezů při použití různých řezných plynů a výkonu laseru [78].

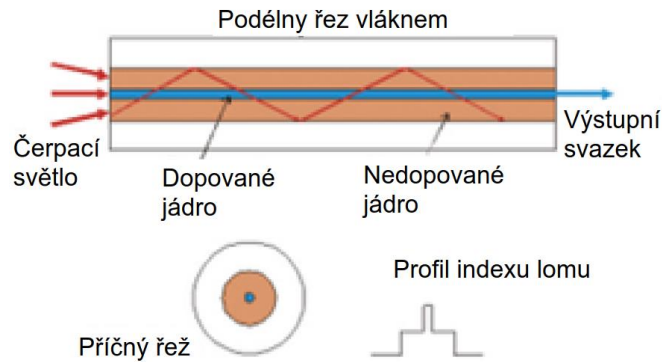
### 2.2.3 Druhy laserů

Podle aktivního prostředí můžeme lasery dělit na plynové, excimerové (či plazmové), polovodičové, kapalinové (kapalné), chemické a pevnolátkové. [36; 50; 66]

- Plynové – aktivní prostředí je tvořeno atomy, ionty nebo molekulami plynů. Tyto lasery pracují ve velmi širokém rozsahu vlnových délek v kontinuálním nebo pulzním režimu. Budí se nejčastěji pomocí elektrického výboje ve zředěném plynu, méně se využívá optická excitace. Plynové lasery mají homogenní aktivní prostředí, které zajišťuje výborné parametry pro široké využití v různých oborech. Nevýhodou je poměrně malý výkon. K nejvyužívanějším typům patří helium - neonový laser s čerbeným paprskem, v průmyslu a medicíně se nejvíce používá infračervený laser CO<sub>2</sub>. Světelné efekty poskytuje např. modře a zeleně zářící laser argonový.
- Excimerové – jsou zvláštním typem plynových laserů a jsou buzeny výkonným zdrojem ultrafialového záření. Aktivním prostředím jsou molekuly, vzniklé spojením dvou atomů různých vzácných plynů (argon - krypton, krypton - fluor apod.) působením svazku elektronů.
- Polovodičové – aktivním prostředím je polovodičová dioda, která má malé rozměry a díky tomu jsou lasery kompaktní. Jejich nevýhodou je ale rozbíhavější svazek než u jiných typů laserů. Účinnost diod je až 50 % a jejich výkon se dá snadno měnit pomocí regulace elektrickým proudem. Využívají se v telekomunikacích, ve výpočetní technice i spotřební elektronice.
- Kapalinové - aktivním prostředím těchto laserů jsou roztoky různých organických barviv. Pomocí několika druhů barviv a metod je možné dosáhnout všech vlnových délek od 300 nm do 1500 nm, díky tomu se tyto lasery využívají např. ve spektroskopii. Jejich nevýhodou je krátká životnost aktivního prostředí, které se teplem a světlem rozkládá.
- Chemické lasery – buzeny jsou chemickou reakcí a jsou schopné vydat obrovské množství energie ve velice krátkém čase. Využívají se pro vojenské účely.
- Pevnolátkové – obvykle jsou buzeny opticky, mohou pracovat v různých režimech a za různých provozních podmínek. Jejich záření má vlnové délky v infračerveném a viditelném spektru světla. Dále je můžeme dělit podle tvaru aktivního média, například na tyčové, vláknové a diskové:

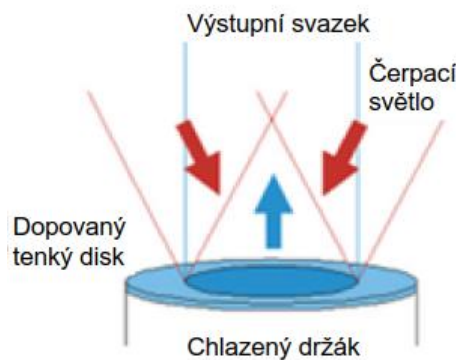
Nejčastěji používané jsou tyčové, z nich je neznámější průmyslově využívaný YAG (yttrium-aluminium-granát), kdy se velice často k jejich buzení využívají výbojky (lampy). Ty mají ale krátkou životnost, a tak se nahrazují diodami, které vykazují i vyšší kvalitu laserového svazku. Diodovou čerpané tyčky mají také vyšší účinnost (okolo 5-10 %) oproti laserům s výbojkami (2-5 %). [41]

V mikroobrábění mají ale budoucnost především vláknové a diskové lasery, které se v posledních letech i rychle rozvíjí. Jsou čerpány laserovými diodami. Oba typy mají velmi kvalitní svazek schopný zaostřit na velice malé plochy, navíc mají i vysokou účinnost (15 % disk, 30 % vlákno) a dlouhou životnost. Vláknový laser na obr. 22 má aktivní prostředí ve formě vlákna různého průřezu (geometrie průřezu určuje vlastnosti výsledného paprsku) a je umístěno v jádru optického vlákna, které záření zesiluje. Díky velké ploše vlákna není potřeba žádné aktivní chlazení.



Obrázek 22: Schéma vláknového laseru [41].

Diskový laser obsahuje tenký disk, který je čerpán na relativně velké ploše shora a chlazen zdola, výsledný svazek pak směřuje nahoru viz obr 23. [41; 42]



Obrázek 23: Schéma diskového laseru [41].

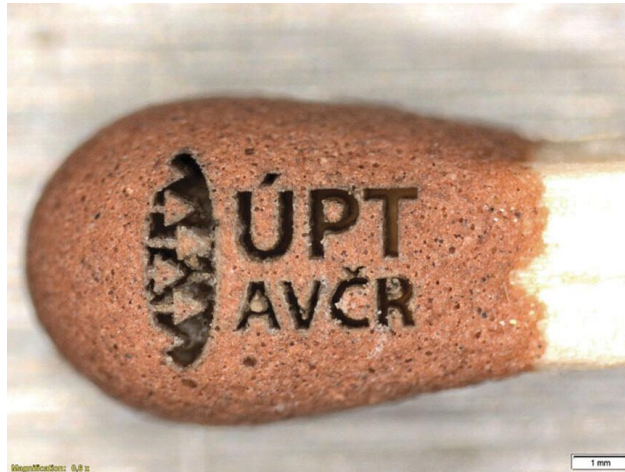
Lasery můžeme dělit i na základě režimu fungování na kontinuální (CW), kdy je laserový paprsek emitován kontinuálně, a pulzní, které umožňují krátké pulzy s vysokým pulzním výkonem. Většina laserů je schopna pracovat v obou režimech. Existují i lasery impulzní s Q-spínáním využívané především k vědeckým účelům, jejichž pulsy mají vysokou energii a nízkou opakovací frekvenci. Tento laser dokáže kontinuálně dodávat po omezenou dobu výkon jako při pulzním režimu. Během buzení při cw režimu je jedno zrcadlo vyřazeno Q-spínačem, buzení dále pokračuje a inverze roste. Při uvolnění závěrky všechny elektrony aktivního prostředí vyzáří nakumulovanou energii téměř najednou – laser vydává krátký impuls (10 – 50 ns) s velmi vysokým výkonem. (1 - 100MW). Vlastnosti impulsu souvisí s aktivním prostředím, rychlosti buzení a rychlosti závěrky. [50]

Pulzy mohou být různě dlouhé, od milisekund až po nejnovější piko a femtosekundové. Lasery s pulsy v řádech milisekund se používají ke svařování, zatímco lasery s ultrakrátkými pulsy v jednotkách piko a femtosekund mají obrovský potenciál do budoucna a to především v mikroobrábění, protože při tak krátkých pulsech nedochází k teplotním ovlivněním řezné oblasti. Zatím je jejich využití v průmyslu malé kvůli vysoké pořizovací ceně. [41]

#### 2.2.4 Mikroobrábění pikosekundovým laserem

V současné době se oblast laserového mikroobrábění rozvíjí díky využití laserů s pikosekundovými pulzy (trvají tisícinu miliardtiny vteřiny). Díky této velice krátké době pulzu se radikálně mění proces úběru materiálu (ablace), a proces už není termický (energie laserového pulzu se nestací přeměnit na teplo a jedná se tedy o obrábění za studena), a nastává tzv. fotoablace: Vysvětlení tohoto procesu není jednoduché – při zjednodušení se tenká vrstvička materiálu vlivem působícího intenzivního elektromagnetického pole laserového pulzu roztrhá na drobné částičky, které se rozptýlí do prostoru. Ukázka obrábění pikosekundovým

laserem a současně důkaz, že se skutečně jedná o obrábění za studena lze vidět na obr. 24. Na hlavičku sirky se podařilo vygravírovat logo Ústavu přístrojové techniky, aniž by vzplála. [43]



Obrázek 24: Ukázka obrábění pikosekundovým laserem a současně důkaz obrábění za studena [43].

Odpařená oblast má rozměry desítek mikrometrů. Takto lze obrábět prakticky všechny kovy a různé druhy keramik a skel (hliník, měď, mosaz, titan, křemík, sklo, keramika, polymery, karbon, kevlar, karbid wolframu i diamant). [44]

Technologii lze využívat k vytváření různých mikrostruktur, optických mřížek, komponent pro základní desky a procesory, pro řízené odstraňování povrchových vrstev, obrábění optických vláken, ale také ke studiu odolnosti optických vrstev a pro testování nových typů celých optických soustav. Využívá se také v lékařství k výrobě dentálních nástrojů nebo hodinářství a šperkařství. Nejde jen o vlastní technologii mikroobrábění, ale i vývoj mikroobráběcího systému jako takového: některé optické elementy – například speciální fokusační objektivy pro velmi krátké vlnové délky komerčně doposud neexistují z důvodů hraničních fyzikálních problémů i technologických výrobních možností. [44]

### 2.2.5 Obrobitelnost materiálů

Schopnost materiálu býti dobře nebo špatně obráběn laserem závisí především na absorpci, tepelné vodivosti a odrazivosti. Absorpce je schopnost materiálu pohlcovat světelnou energii a měnit ji na kinetickou energii neuspořádaného pohybu molekul nebo atomů absorbující látky (na tepelnou energii). Tepelná vodivost je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti a závisí na ní, jak rychle je teplo odvedeno z místa řezu. Odrazivost (reflexe) je dána poměrem množství odražené energie k dopadající energii. [36]

Kovy s vysokou hodnotou odrazivosti (především stříbro, hliník a měď), procentuální zobrazení v tabulce 2, fungují téměř jako zrcadlo a mohou odrážet vysokoenergetický laserový paprsek od svého povrchu ve všech směrech. To může (zejména u otevřených laserových strojů) představovat rizika a problémy pro okolní osoby a materiály. Laserové světlo může být také odraženo zpět do laserového zdroje, což může způsobit neopravitelné nebo nákladné poškození optiky nebo samotného laserového zdroje. [69]

Při obrábění mědi, kvůli její vysoké hodnotě odrazivosti, se při prvním kontaktu laserový paprsek od povrchu mědi odráží, a to snižuje jeho účinnost. Následně, díky vysoké teplotní vodivosti, materiál odvede teplo z místa řezu, a to také sníží účinnost laseru. Důsledkem toho je k obrábění mědi laserovým svazkem zapotřebí mnohem vyšší výkon zařízení než například k obrábění nerezové oceli. Výsledkem jsou horší parametry řezné hrany než u jiných materiálů. Odvedené teplo do materiálu navíc mění barvu materiálu v okolí řezu. [70]

Tabulka 2: Reflektivita kovů v % [72].

| Kov             | Vlnová délka [ $\mu\text{m}$ ] |       |
|-----------------|--------------------------------|-------|
|                 | 0,9-1,1                        | 9-11  |
| Zlato           | 94.7                           | 97.7  |
| Stříbro         | 96.4                           | 99    |
| Hliník          | 73.3                           | 96.9  |
| Měď             | 90.1                           | 98.9  |
| Železo          | 65                             | 93.8  |
| Nikl            | 72                             | 95.6  |
| Zinek           | 49                             | 98.1  |
| Chrom           | 57                             | 93    |
| Křemík          | 28                             | 28    |
| Ocel (1%uhlíku) | 63.1                           | 93-96 |
| Uhlík(grafit)   | 26.8                           | 59    |

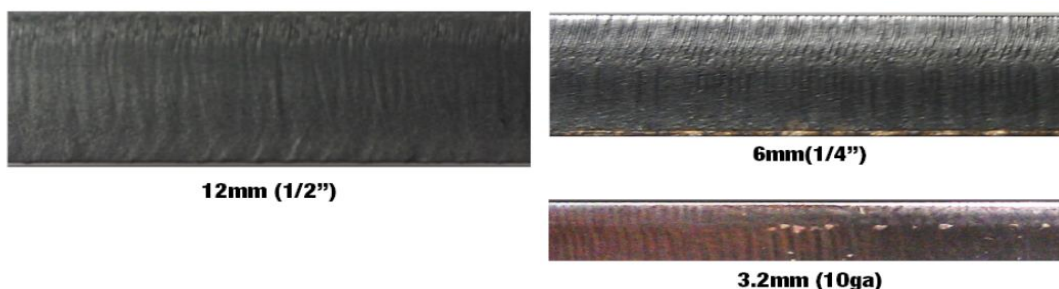
### 2.2.6 Modální struktura laserového paprsku

Vid (MOD) laserového paprsku vyjadřuje, jak je rozdělována energie v jeho průřezu. Nejlepším videm je Gausovo rozložení, při kterém má laserový paprsek optimální zaměřovací vlastnosti. Gausův režim bývá označován jako  $\text{TEM}_{00}$ , kdy módová struktura se ve strojírenství zapisuje jako  $\text{TEM}_{m,n}$ , kde indexy  $m$  a  $n$  určují počet dosažených minim v průřezu paprsku ve vertikálním a horizontálním směru. Příčný mód může být definovaný i ve válcových souřadnicích, kdy indexy označují počet minim v radiálním a úhlovém rozložení. Mód paprsku lze měnit v nastavení rezonátoru. [50]

Reálné paprsky laserů ale nespĺňují teoretické Gausovo rozložení, a právě odchylka od tohoto rozložení je popisována veličinou  $M^2$  (M-kvadrát). Teoretická Gaussova křivka má  $M^2 = 1$ , skutečné laserové paprsky mají  $M^2 > 1$ . Nejvíce k teoretické Gausově křivce se blíží heliové a neonové lasery, které mají  $M^2$  menší než 1,1. Polovodičové lasery mají většinou kvalitu svazku  $M^2$  od 1,1 do 1,7, a například vysokoenergetické lasery mohou mít  $M^2$  faktor 3 až 4. V každém případě  $M^2$  faktor je jedním ze základních parametrů laserové svazku a jeho kvality. V podstatě vyjadřuje, na jak malou plochu je možné příslušnou optikou fokusovat svazek. [50; 74]

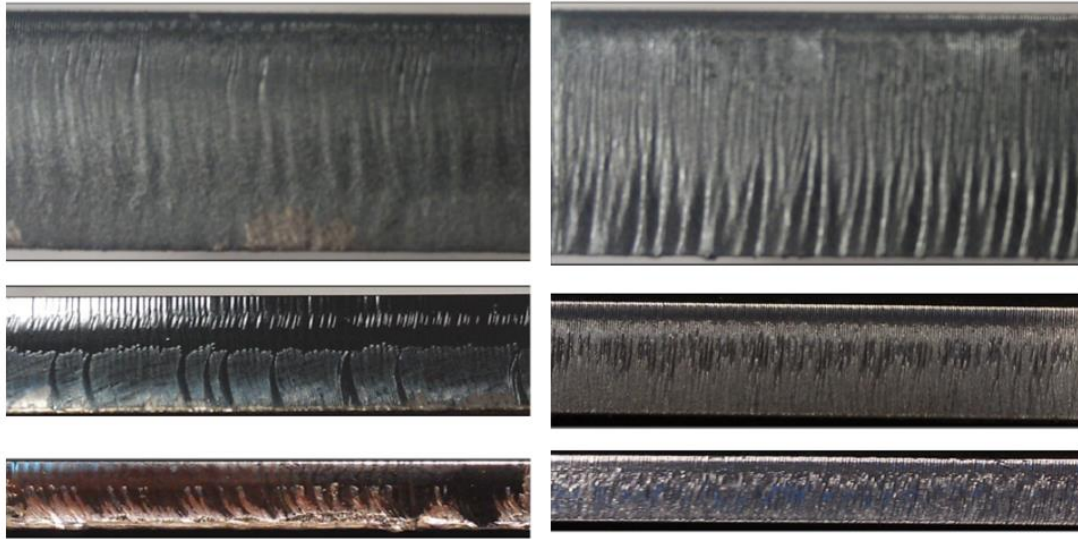
### 2.2.7 Parametry řezné hrany

Na řeznou hranu má vliv hned několik parametrů laseru. Na následujících obrázcích jsou znázorněny příklady z řezání oceli o tloušťce 12 mm, 6 mm a 3,2 mm. Řezání probíhalo za přítomnosti kyslíku na vláknovém laseru o výkonu 2 kW. Na obr. 25 je vidět ukázka čisté řezné hrany, pokud jsou všechny parametry optimálně nastaveny. [68]



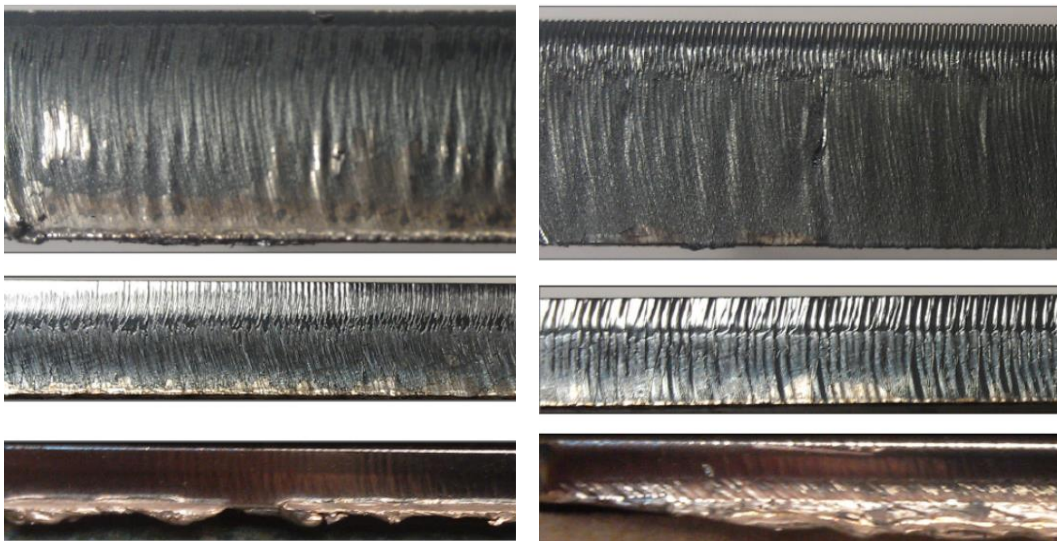
Obrázek 25: Čistá řezná hrana [68].

Na obr.26 je vidět vliv řezné rychlosti na hranu řezu. Vlevo byla rychlost příliš nízká (dochází k vytrhávání materiálu na spodní straně řezu a zhoršení drsnosti) a v pravo příliš vysoká (nedokonalý řez na spodní hraně). [68]



Obrázek 26: Vliv řezné rychlosti (vlevo nízká, vpravo vysoká) [68].

Vliv má také vzdálenost od ohniska znázorněná na obr. 27. Pokud je ohnisko posunuto příliš blízko k řezanému materiálu, vznikají výrazné otřepy na spodní hraně řezu. A pokud je ohnisko nad řezaným místem, vzniká hrubý řez s vysokou drsností povrchu v dolní části řezu. [68]



Obrázek 27 : Vliv vzdálenosti od ohniska (vlevo nízko, vpravo vysoko) [68].

Výhody LBM:

- Tenký řez
- Malá velikost tepelně ovlivněné oblasti
- Minimální opotřebení nástroje
- Čisté řezy
- Snadné řezání složitých tvarů
- Hospodárnost i při malých výrobních sériích [76].



Nevýhody:

- Při špatně zvolených parametrech vznikají otřepy, opaly
- Schopnost řezat materiály o malých tloušťkách
- Možnost vzniku mikrotrhlin
- Vzniká tepelně ovlivněná oblast – vznik zbytkových napětí
- Nutnost odsávání vznikajících karcinogenních plynů, zvláště při řezání Al-slitin a plastů
- Horší pro lesklé kovy s vysokou odrazivostí
- Deformace z upnutí [76].

## 2.3 Fotochemické obrábění PCM, tzv. chemické prostřihování

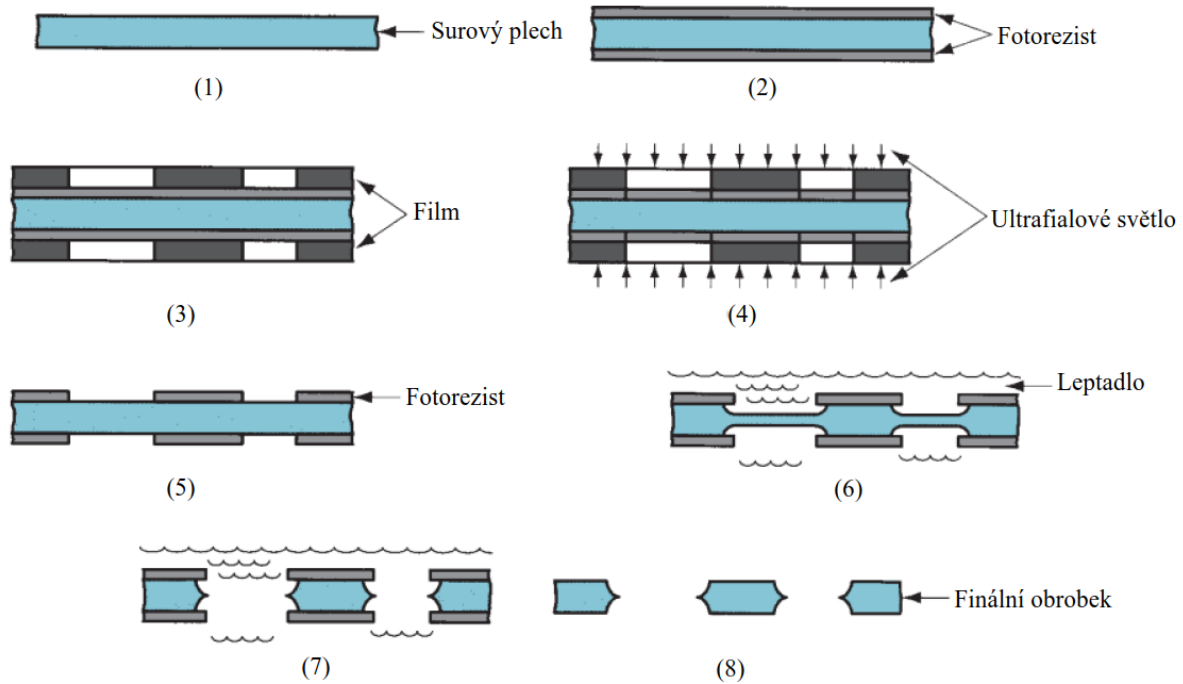
Fotochemické obrábění (také chemické frézování, chemické prostřihování, leptání) se řadí mezi metody chemického obrábění, což jsou metody řízeného odleptávání vrstev materiálu z povrchu obrobku. Odleptávání probíhá jako chemická reakce obráběného materiálu spolu s pracovním prostředím (kyselinou nebo hydroxidem). Místa, která nemají být leptána, jsou chráněna speciálním povlakem. [17]

Pomocí chemického prostřihování se nejčastěji vyrábí ploché a tvarově složité výlisky z tenkého plechu nebo fólie bez otřepů, v závislosti na obráběném materiálu lze většinou obrábět plechy a fólie o tloušťce 0.013 mm–2.032 mm. [46]

### 2.3.1 Postup leptání

Před samotným obráběním se musí polotovar zbavit nečistot. Dříve se k tomu používala různá chemická rozpouštědla, ale dnes už se většinou kvůli nárokům na ekologii plech několikrát omyje jemnými mýdly a opláchne destilovanou vodou. Následně se nanese chemicky odolná a fotosenzitivní vrsta (maska, fotorezist) – může to být tekutý nátěr nebo nalaminovaná / natavená fólie. [46; 47]

Dále lze postupovat dvě způsoby, starší a běžně využívaná je klasická konvenční fotolitografie, kdy obrábění probíhá pomocí pracovního nástroje, kterým jsou dva kusy polyesterové fólie (film), na které je pomocí laserového fotoplotru nanesen obrys finálního tvaru obrobku. Většinou jsou oba filmy identické, ale můžou se i lišit, pokud má být každá strana obrobku jiná. Tyto filmy jsou zarovnané na obrobek s fotosenzitivní vrstvou a pomocí UV světla natištěny na obrobek. Na místech, kde UV světlo prošlo skrz fotofilm, je fotosenzitivní vrstva vytvrzena. Na místech, kde fotofilm zabránil UV paprskům průchod, se fotosenzitivní vrstva nevytvrdila, a došlo tak k vytištění obrysu na polotovar. V následujícím kroku se obrobek za vysokého tlaku opláchne a nevytvrzená fotosenzitivní vrstva se smyje a je obnažen povrch polotovaru. Ten je následně vystaven leptadlu (nejčastěji se využívá chlorid železitý). Po vyleptání obrysu se obrobek opláchne a odstraní se vytvrzená fotosenzitivní vrstva. Celý proces je zobrazen na obr. 28. Vzhledem k tomu, že se vše dělá mechanicky, vznikají odchylky při výrobě filmu, jeho roztažností, sesazením, osvitěním i vyvoláním. Touto metodou pak lze vytvořit objekty s přesností cca  $\pm 25 \mu\text{m}$ . [46; 47; 61]



Obrázek 28: Průběh metody PCM [64].

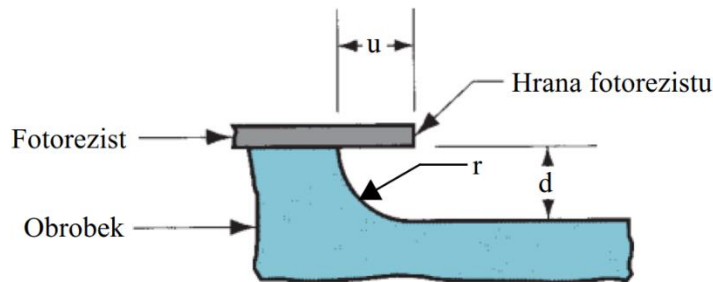
Další možností je metoda Laser Evolved Etching Process (LEEP), což je nový a moderní proces, určený pro výrobu vysoce přesných mikrokomponeutů a ve srovnání s konvenční metodou umožňuje vytvořit jemnější detaily s vysokou přesností a v mimořádně přesných tolerancích v řádu mikrometrů. Nasvícení fotorezistu probíhá, na rozdíl od konvenční metody, plně digitálním způsobem. Laserový paprsek stroje exponuje metodou Laser Direct Imaging (LDI) obrazec do světlocitlivého rezistu na povrchu materiálu. Další zpracování už probíhá opět klasickým způsobem, tedy vyvolání fotorezistu a leptání, vlivem naprosto přesného vytvoření motivu lze docílit v reálu až čtyřnásobného zlepšení v přesnosti na ploše až 800 mm x 600 mm. Hrany a otvory jsou ostřejší a čistší a jsou pozicovány naprosto přesně, jak proti sobě při oboustranném leptání, tak i v rámci celé plochy motivu. [61]

Na každý obráběný materiál je vhodný jiný druh leptací látky, vhodná leptadla k různým materiálům jsou vyznačena v tab. 3, kde je mimo jiné uvedena i rychlost leptání. V tabulce chybí například zlato, které se leptá v lučavce královské ( $3\text{HCl} : \text{H}_2\text{O}_2 : 2\text{H}_2\text{O}$  při  $30^\circ\text{C}$ ). [63; 64]

Tabulka 3: Materiály a jejich leptadla, rychlost obrábění a leptací faktor [64].

| Materiál                         | Leptadlo                                    | Rychlost obrábění<br>mm/min | Leptací<br>faktor |
|----------------------------------|---|-----------------------------|-------------------|
| <b>Hliník<br/>a jeho slitiny</b> | $\text{FeCl}_3$<br>$\text{NaOH}$            | 0.020<br>0.025              | 1.75              |
| <b>Měď a její slitiny</b>        | $\text{FeCl}_3$                             | 0.050                       | 2.75              |
| <b>Hořčík a jeho slitiny</b>     | $\text{H}_2\text{SO}_3$                     | 0.038                       | 1                 |
| <b>Křemík</b>                    | $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ | Velmi pomalé                | -                 |
| <b>Ocel</b>                      | $\text{HCl}:\text{HNO}_3$                   | 0.025                       | 2                 |
|                                  | $\text{FeCl}_3$                             | 0.025                       |                   |
| <b>Titan<br/>a jeho slitiny</b>  | $\text{HF}$                                 | 0.025                       | 1                 |
|                                  | $\text{HF}:\text{HNO}_3$                    | 0.025                       |                   |

V tab. 3 je pro vybrané materiály zaznačen i leptací faktor, pomocí kterého lze určit a vyjádřit nejčastější negativní jev doprovázející chemické obrábění. Jedná se o podřezávání (podleptání; undercut) a lze vysvětlit jednoduše tak, že leptadlo nepostupuje kolmo do obrobku, ale dochází i k naleptávání šikmo pod povrchem fotorezistu, jak je zobrazeno na ob. 29. Podleptání způsobuje nejen leptání i pod maskou, ale také tvorbu radiusu  $r$  a neschopnost dosáhnout touto metodou ostrých rohů. Tento nežádoucí jev může být způsoben dlouhým vystavením obrobku leptadlu, nebo příliš homogenní strukturou rozpouštědla. Regulovat podleptání je možné například použitím anizotropních rozpouštědel (tedy rozpouštědel s rozdílnou rychlostí rozpouštění v různých směrech). [16; 64]



Obrázek 29: Podleptávání [64].

S tímto efektem se musí počítat už při vytváření fotofilmu a vytvrzování fotorezistu. Hloubka podleptání se dá vypočítat právě z leptacího faktoru a dále z hloubky leptání podle vzorce [64]:

$$F_e = \frac{h}{u} \quad (2.2)$$

kde:  $F_e$  – leptací faktor [-]

$d$  – hloubka leptání [mm nebo  $\mu\text{m}$ ]

$u$  – podleptání [mm nebo  $\mu\text{m}$ ]

### 2.3.2 Leptání mědi

Měď se v současnosti leptá nejčastěji pomocí chloridu měďnatého ( $\text{CuCl}_2$ ) viz tabulka 4, dále se využívá chlorid železitý ( $\text{FeCl}_3$ ) nebo alkalická leptadla. Některé vlastnosti těchto leptadel jsou zaznačeny v tab.3 . Dříve se používaly i jiné sloučeniny, například peroxid vodíku s kyselinou sírovou ( $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$ ), peroxodisíran amonný [ $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ] nebo oxid chromový s kyselinou sírovou [ $\text{CrO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$ ], ale tyto poslední jmenované se na měď již nepoužívají protože jsou velmi žravé, způsobují znečištění životního prostředí a zdravotní problémy. [62]

Tabulka 4: Leptání mědi [62].

| Leptadlo                             | Leptací teplota [°C] | Leptací rychlost [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ] | Podřezávání | Neutralizace a problémy s likvidací | Toxicita | Provozní náklady |
|--------------------------------------|----------------------|---|-------------|-------------------------------------|----------|------------------|
| Chlorid měďnatý ( $\text{CuCl}_2$ )  | 50-54                | 25-50   | Nízké       | Nízké                               | Střední  | Nízké            |
| Chlorid železitý ( $\text{FeCl}_3$ ) | 43-49                | 25-50   | Nízké       | Střední                             | Nízká    | Střední          |
| Alkalická leptadla                   | 43-55                | 30-60   | Nižší       | Střední                             | Střední  | Vysoké           |

Rychlost úběru materiálu při fotochemickém obrábění závisí na teplotě leptadla, ale i jeho koncentrace nebo aditivních složkách přidaných do leptadla. Nejvhodnější molární koncentrace  $\text{CuCl}_2$  pro leptání mědi je 2,5 mol. Následující tabulka 5 ukazuje vliv přidání různého molárního množství kyseliny chlorovodíkové (HCl) do chloridu měďnatého na rychlost leptání mědi. [62]

Tabulka 5: Vliv aditiv v  $\text{CuCl}_2$  při leptání mědi [62].

| Koncentrace $\text{CuCl}_2$<br>[mol] | Leptací teplota<br>[°C] | Přidaná HCL<br>[mol] | Leptací rychlost<br>[μm/min] |
|--------------------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------------|
| 2.5                                  | 49                      | 1                    | 25                           |
| 2.5                                  | 49                      | 2                    | 31                           |
| 2.5                                  | 49                      | 3                    | 38                           |

Tato metoda je využívána především v elektrotechnice - k výrobě desek plošných spojů, elektrických kontaktů a svorek, integrovaných křemíkových obvodů, desky tištěných měděných obvodů. Velmi využívány jsou i v lékařství ale i v dalších odvětvích, kde je kladen důraz na přesnou výrobu dílů v mikro nebo nano rozměrech. [47; 48]

Metoda má celou řadu výhod:

- Flexibilita navrhovaných tvarů - využití CAD systémů
- Úběr materiálu nezpůsobuje vznik zbytkových napětí v obrobku
- Rovnoměrné obrábění složitých profilů
- Vysoká přesnost bez otřepů
- Tenké fólie nejsou deformované z upnutí
- Nemění se mechanické vlastnosti obrobku vlivem procesu [16].

Nevýhody:

- Vznik nekontrolovatelného podřezávání
- Požadavek na kvalifikovanou obsluhu
- Bezpečnostní požadavky na manipulaci s chemikáliemi
- Nelze tvořit ostré hrany
- Maximální tloušťka polotovaru cca 2 mm
- Nelze obrábět svary a nálitky [16].

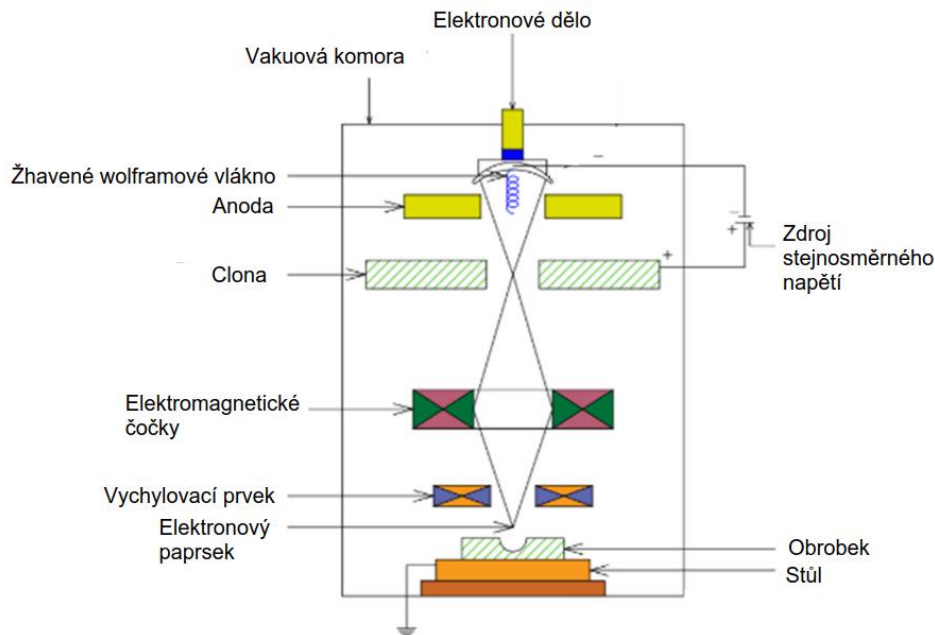
## 2.4 Obrábění elektronovým paprskem EBM (Electron Beam Machining)

Tato metoda využívá kinetickou energii proudu elektronů o vysoké rychlosti, který dopadá na malou plochu obráběného polotovaru. Kinetická energie se v místě dopadu mění na tepelnou a materiál obrobku se natavuje a odpařuje. Proces musí probíhat ve vakuu, jinak se urychlené elektrony srážejí s molekulami vzduchu a paprsek se rozptýlí.

Obrobitelnost materiálu touto metodou je dána jeho fyzickými vlastnostmi a nesouvisí s jeho mechanickými vlastnostmi, takže lze obrábět i těžkoobrobitelné materiály jako žárovečné oceli, austenitické oceli, slitiny zinku s niobem, hliníkové a titanové slitiny, křemík, drahokamy, tantal, wolfram a speciální slitiny používané v letectví a kosmonautice. Elektronový paprsek hůře obrábí mosaz, bronz, zinek, hořčík a slinované kovy. Metoda je vhodná jen pro tenké polotovary - plechy. [49; 50]

Důležitá součást zařízení k obrábění pomocí EDM je elektronové dělo zobrazené na obr. 30 zodpovědné za emisi elektronů, které je tvořeno žhavenou wolframovou katodou (až na 2500 °C) a anodou, které jsou připojeny na zdroj stejnosměrného napětí. Elektrony uvolněné z katody jsou pomocí anody urychleny na rychlost odpovídající asi dvěma třetinám rychlosti světla. Součástí zařízení jsou také elektromagnetické čočky, které zaostřují paprsek na malou plochu

polotovaru a tím snižují průměr paprsku dopadajícího na polotovar a zvyšují přesnost obrábění. Ke změně směru paprsku slouží systém pro vychylování paprsku pracující také na elektromagnetickém principu. Celý proces probíhá ve vakuové komoře. [49]



Obrázek 30: Schéma zařízení k EBM [73].

Výhody metody:

- Vhodná pro téměř všechny materiály včetně těžkoobrobitelných
- Vysoká přesnost i při mikroobrábění
- Vysoká kvalita povrchu
- Snadno automatizovaný proces
- Nevzniká mechanické namáhání na obrobek – bezkontaktní proces [45; 50].

Nevýhody:

- Drahá výroba (zařízení) kvůli požadavkům na obrábění ve vysokém vakuu
- Dlouhý strojní čas (čekání na vytvoření vakua)
- Vznik škodlivého RTG záření
- Nevhodné pro velké obrobky
- Požadavky na kvalifikovanou obsluhu
- Vhodné jen pro tenké materiály [45; 50].

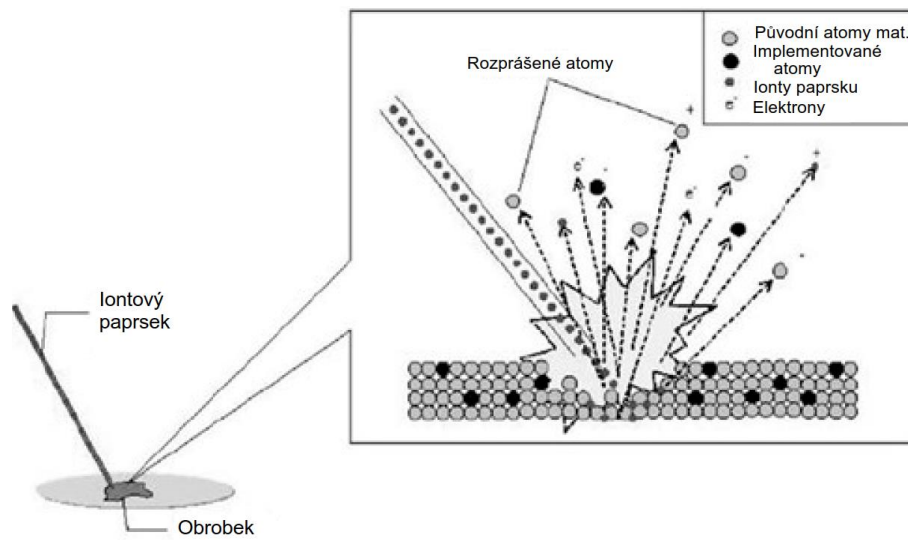
## 2.5 Obrábění iontovým paprskem IBM (Ion Beam Machining)

Obrábění probíhá pomocí svazku nabitých atomů (iontů), které mají vysokou energii a mohou být urychlovány a řízeny elektrickým polem. Nejčastěji se využívají ionty inertního plynu, jako je argon, krypton a xenon. K obrábění je využita kinetická energie paprsku, polotovar je bombardován ionty ve vakuu a na povrchu dochází k uvolňování atomů z materiálu obrobku přenosem energie z iontů na povrch obrobku. Když ionty zasáhnou povrch obráběného materiálu, vyrazí z povrchu polotovaru mezi 0,1 až 10 atomů obráběného materiálu. Úběr materiálu je tedy založen na odstraňování atomu atomem, výsledek takového obrábění tvoří velice jemné zpracování povrchu spojené s malým úběrem. [51; 52; 53]

Iontový svazek lze využít k úběru materiálu formou iontového frézování, leštění, leptání a rozprašování. Pomocí této technologie lze také nanášet tenké vrstvy, kdy jedním z faktorů je PVD (physical vapour deposition) a proces iontového plátování (IP – ion plating). Dále se iontový paprsek využívá při úpravách povrchu, kam patří například iontová implantace nebo procesy míšení (ion beam mixing nebo ion beam assisted deposition – IBAD). [53]

Opracování materiálů probíhá buď dynamicky nebo reaktivně. Reaktivní procesy využívají chemicky aktivní ionty, např.  $\text{CCl}_4$  pro hliník a jeho slitiny a  $\text{CF}_4$  pro čistý křemík užívaný v elektronice. Obrábění pomocí paprsku iontů těchto reaktivních látek probíhá rychleji než chemické formy obrábění, díky urychlování za pomoci aktivační energie dopadajících iontů. Proto tato metoda tak často konkuruje chemickému obrábění. [53]

V praxi ale se ale daleko častěji využívají dynamické procesy. Ty využívají vyrazení atomů z povrchu pevného materiálu (obrobku) díky elektroelastické kolizi (tj. srážkou a odrazem), ke které dojde při nárazu iontů na povrch obrobku viz obr. 31. V podstatě se jedná o přenos hybnosti z iontů plynu (nebo tekutého kovu) na částice obráběného materiálu. Tento jev se nazývá iontové rozprašování. Kinetická energie iontů při překračuje energii vazby atomů a molekul v materiálu, a po nárazu tím naruší jejich vazby. Atom v důsledku prudké srážky opustí své rovnovážné místo v mřížce a koliduje se sousedními atomy. Následkem kolize je buď posunutí sousedních atomů z jejich místa nebo jejich vypuzení (rozprašení) z povrchu. Urychlované ionty se po srážce většinou odrazí do okolí nebo zůstanou v mřížce materiálu jako implantované ionty. Atom materiálu ve větší hloubce už nemá tolik energie, aby byl vyražen z povrchu, a proto zůstává v mřížce jako intersticiální atom, anebo vytvoří prázdné místo (vakanci). Bombardování povrchu má za následek vznik mřížkových poruch v povrchových vrstvách kovu. [52; 53]



Obrázek 31: Schéma rozprašování [55].

Podle způsobu užití pro opracování materiálů se iontová zařízení člení do tří kategorií, a to na fokusovaný iontový paprsek, vysokofrekvenční plazmový zdroj iontů a tzv. sprchový, široký iontový paprsek (ion shower). Jak název napovídá, k mikroobrábění se nejlépe hodí fokusovaný iontový paprsek (FIB). [53]

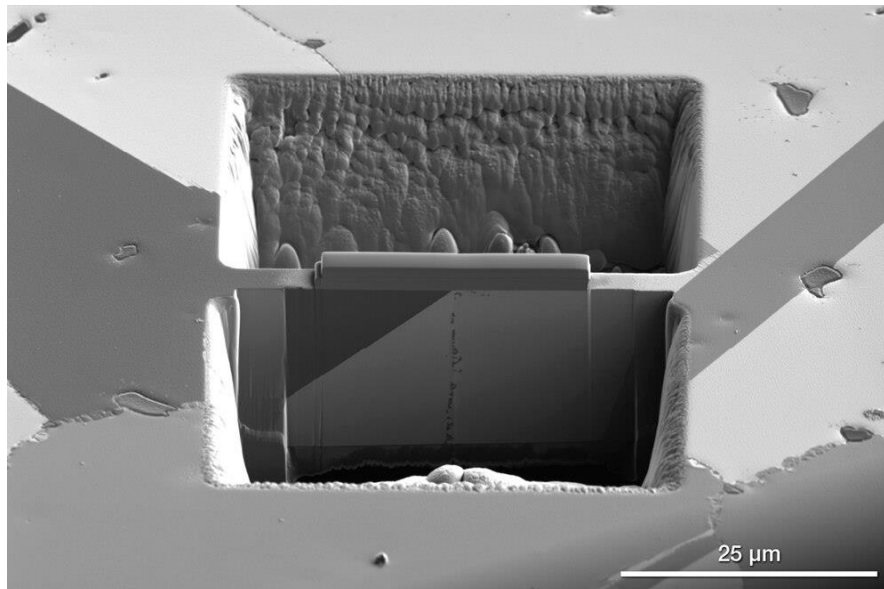
### 2.5.1 Fokusovaný iontový paprsek – FIB Focused Ion Beam

FIB je zařízení, které vytváří usměrněný tok ionizovaných atomů a fokusuje je na vzorek. Jako zdroj iontů lze teoreticky použít téměř jakýkoli prvek, ale většinou jsou preferovány tekuté kovy s nízkým bodem tání. Tyto zdroje se nazývají LMIS (Liquid Metal Ion Sources) a emitují

ionty těžších kovů, které se dají fokusovat do svazku o průměru menším než 10 nm při dostatečné proudové hustotě pro přímé mikroobrábění. Je možné využít téměř všechny kovy, které mají relativně nízký bod tání a nízkou reaktivitu, ale většinou se užívá gallium, které má řadu technických výhod, které mimo jiné usnadňují konstrukci LMIS. Mezi ně patří například nízká teplota tání (30 °C) a relativně vysoká hmotnost iontů gallia, což umožňuje vyražení i těžších prvků a přerušení silných vazeb jako má například diamant. [54]

Jako alternativu lze využít i plazmový FIB využívající ionty vzácného plynu xenonu. Výhodou plazmového FIB je dosažení vysokých proudů v paprsku, což spolu s vysokou hmotností Xe iontů vede k rychlejšímu odemílání materiálu. Další výhodou oproti Ga FIB je inertnost Xe iontů, které jsou chemicky nereaktivní s materiálem obrobku. Vyjmenované výhody Xe FIB jsou ale v porovnání s Ga FIB vyváženy výrazně horší možností fokusace svazku, což znemožňuje obrábění s takovou přesností jakou nabízí Ga LMIS. Pro úplnost je vhodné dodat, že rozlišení plazmového Xe FIB je při 30 kV a nejmenším proudu přibližně ~25 nm, zatímco Ga FIB dosahuje ~5 nm. [54]

Na následujícím obr. 32 je vidět ukázka z obrábění niklové slitiny pomocí FIB. Nahoře je vidět první hrubovací krok (vysoký proud), dole poté druhý, dokončovací krok.



Obrázek 32: Ukázka obrábění niklové slitiny pomocí FIB [75].

Výhody IBM:

- Obrobený povrch má vysokou kvalitu
- Lze obrábět téměř všechny materiály včetně optického skla
- Proces nezávisí na fyzikálních a mechanických vlastnostech materiálu
- Nevytváří se teplo a nevznikají mechanické deformace povrchové vrstvy
- Nezanechává zbytkové napětí
- Proces obrábění je plně kontrolovatelný a velice přesný [50].

Nevýhody:

- Nutnost obrábění ve vakuu
- Vysoká pořizovací cena zařízení [50].

### 3 NADPIS TŘETÍ HLAVNÍ KAPITOLY (PRAKTICKÁ ČÁST)

S ohledem na charakteristiku zadané součásti a požadavek možnosti snadné dostupnosti technologie byly, z výše jmenovaných nekonvenčních metod vhodných k mikroobrábění, experimentálně otestovány možnosti EDM a LBM, zatímco metody FIB a PCB byly konzultovány.

Polotovarem je měděná fólie s tloušťkou 125 mikrometrů zakoupená od výrobce K&S Precision Metals. Produktový list s chemickým složením a materiálovými charakteristikami je součástí přílohy č. 1.

#### 3.1 Výroba štěrby pomocí EDM

Výroba pomocí EDM je závislá na celé řadě provozních parametrů, které je nutné správně optimalizovat, pouze pak je možné docílit očekávaných výsledků (přesnosti a jakosti). Velká energetická náročnost celého výrobního procesu EDM je pak dalším důvodem k požadavku maximální možné úspory strojního času.

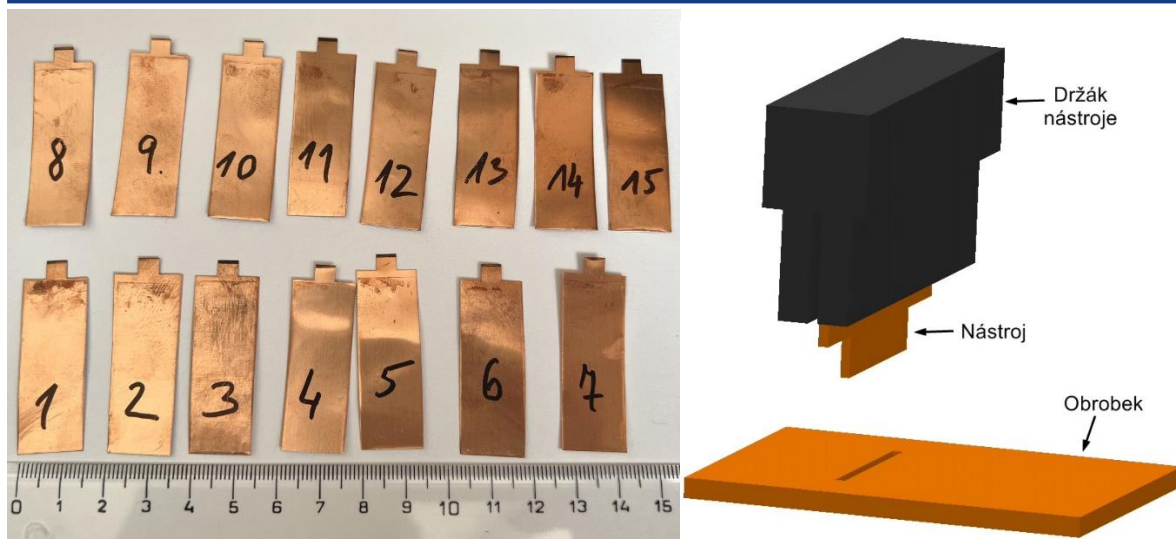
Při výrobě mikro-šterby do dílu z měděné fólie byla provedena série více experimentů, které navázaly doposud provedené experimenty z této oblasti mikroobrábění. [55] S ohledem na velmi vysoké požadavky na přesnost výroby je nutné vhodně eliminovat negativní jevy, které mohou obráběcí proces doprovázet. Patří mezi ně např. opotřebení elektrod v rozích [56], či výskyt vad a defektů při obrábění. Lze předpokládat obdobné průběhy těchto jevů, jako je publikováno ve studiích o elektroerozivním hloubení ocelí 1.2363 a 1.2343 ESR [57].

Již samotná výroba nástrojů v tolerancích, které umožní docílení rozměrů požadované mikrošterby s sebou nese další technologické aspekty:

- zvolit vhodný materiál pro výrobu nástroje (výběr materiálu má zásadní vliv na průběh procesu a tedy i na jeho výsledek.), ale také na finanční náklady zakázky (náklady na zhotovení elektrody mohou činit až 50% z celkových výrobních nákladů, přičemž lze říci, že s rostoucí velikostí nástrojové elektrody úměrně roste i cena výrobních nákladů a stejná úměra platí také pro zvyšující se nároky na rozměrovou přesnost).
- stanovit rozměry nástrojové elektrody (vypočíst opotřebování nástroje)
- zvolit vhodnou regulaci přísuvu (velikost jiskrové mezery)
- zvolit vhodné dielektrikum a jeho tlak, i způsob přivedení dielektrika do pracovní mezery, tedy stav pracovního prostředí.
- zvolit vhodné vstupní elektrické parametry jako je proud, napětí, doba impulzu, doba pauzy a polarita elektrod

Materiál Cu se obvykle obrábí pomocí nástrojové elektrody vyrobené z grafitu (vykazují menší opotřebení, ale současně i menší úběr materiálu) [59]. V tomto případě byl ale proveden ojedinělý experiment, kdy nástrojovou elektrodu tvořil stejný materiál, jako je vyráběná součást (stejná měděná fólie). Díky tomu bylo možno docílit několika výhod, mezi něž patří např. finanční úspory na nákup materiálu pro výrobu nástroje, eliminovalo se riziko zanesení nečistot a jiných materiálových struktur z materiálu nástroje do obráběného dílce apod. Nástrojové elektrody viz obr. 33 byly vyrobeny pomocí elektroerozivní drátové řezačky (WEDM) typu  $\alpha$ -C600iB od firmy FANUC (použití WEDM bylo nutné, aby se zabránilo deformaci rohů, které jinak vzniklo při běžném ostřížení nůžkami) a byla umístěna do speciálního držáku viz obr. 33.





Obrázek 33: Vyrobené nástroje (vlevo), navržený nástroj uchycený v držáku (vpravo) [58].

Kvalita povrchu po obrábění EDM úzce souvisí z energií jednotlivých výbojů, které přímo předurčují rozměry vznikajícího kráteru. Energie výbojů je závislá na jiskrové mezeře mezi elektrodou a obrobkem a je obvykle podmíněna nejen zvolenými technologickými podmínkami. Vstupní parametry obrábění, které jsou uvedeny v tab. 6, byly nastaveny na základě zkušeností společnosti PENTA TRADING, spol. s.r.o. z jiných dříve provedených experimentů.

Tabulka 6: Vstupní parametry elektroerozivního obrábění [58].

| Číslo vzorku | Proud (A) | Zapnutí pulzu ( $\mu\text{s}$ ) | Napětí (V) |
|--------------|-----------|---------------------------------|------------|
| 1            | 2.6       | 70                              | 280        |
| 2            | 1.9       | 70                              | 220        |
| 3            | 1.2       | 40                              | 220        |
| 4            | 1.9       | 70                              | 220        |
| 5            | 1.9       | 100                             | 160        |
| 6            | 2.6       | 70                              | 160        |
| 7            | 1.2       | 70                              | 160        |
| 8            | 2.6       | 100                             | 220        |
| 9            | 1.9       | 40                              | 280        |
| 10           | 1.2       | 70                              | 280        |
| 11           | 1.2       | 100                             | 220        |
| 12           | 1.9       | 100                             | 280        |
| 13           | 1.9       | 70                              | 220        |
| 14           | 2.6       | 40                              | 220        |
| 15           | 1.9       | 40                              | 160        |

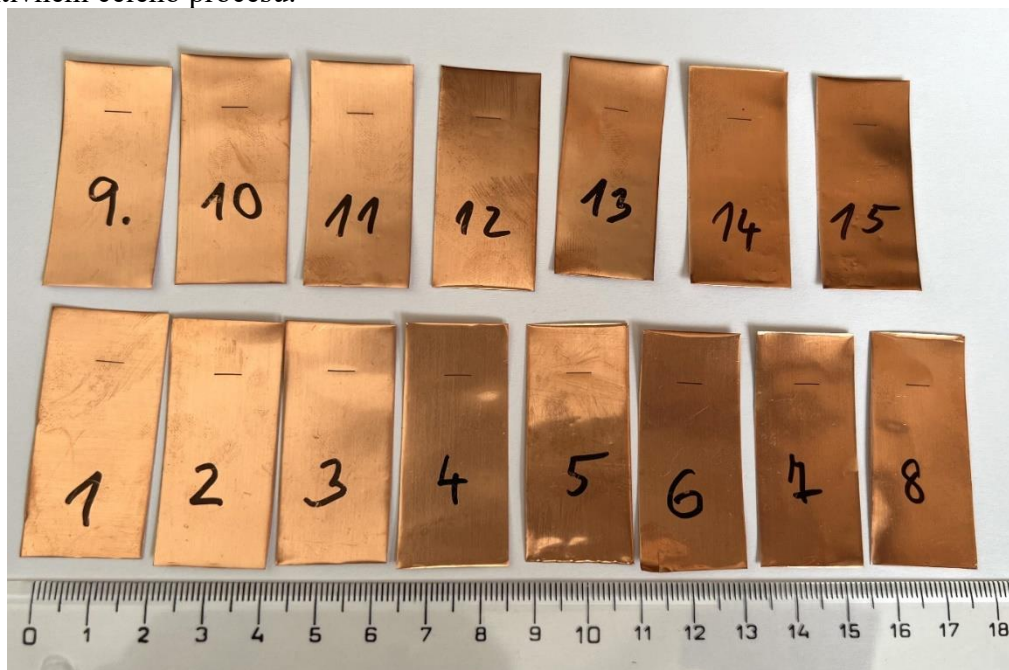
Kvalita povrchu souvisí také s výrobními možnostmi použitého zařízení, např. jeho vybavení velmi přesnými vychylovači elektrod ve čtyřech i více osách a umožnění dosažení orbitálního pohybu. Štěrbiny v tomto pokusu byly obráběny na elektroerozivní hloubičce PENTA 433GS s generátorem P-MG1 viz obr. 34.



Obrázek 34: PENTA 433GS s generátorem P-MG1.

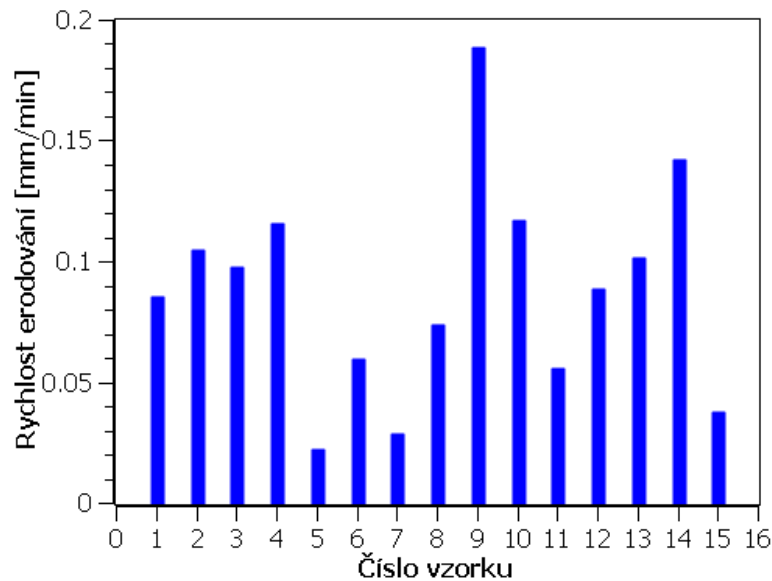
Na výrobní přesnost má samozřejmě vliv také druh a čistota použitého dielektrika a množství částic kovu v dielektrické mezeře. Jako dielektrické médium byl v tomto experimentu použit petrolej o teplotě 25 °C, především pro dobrou kontrolu výboje.

Následně bylo vyrobeno 15 zkušebních vzorků viz. obr. 35, při jejichž výrobě byly sledovány veškeré technologické parametry, aby mohla být provedena případná další optimalizace a zefektivnění celého procesu.



Obrázek 35: Vzorky s s obrobenými mikroštěrbínami pomocí EDM.

V průběhu výroby byla u všech vzorků sledována rychlost erodování v závislosti na vstupních hodnotách a získané hodnoty jsou uvedeny v grafu na obr. 36:



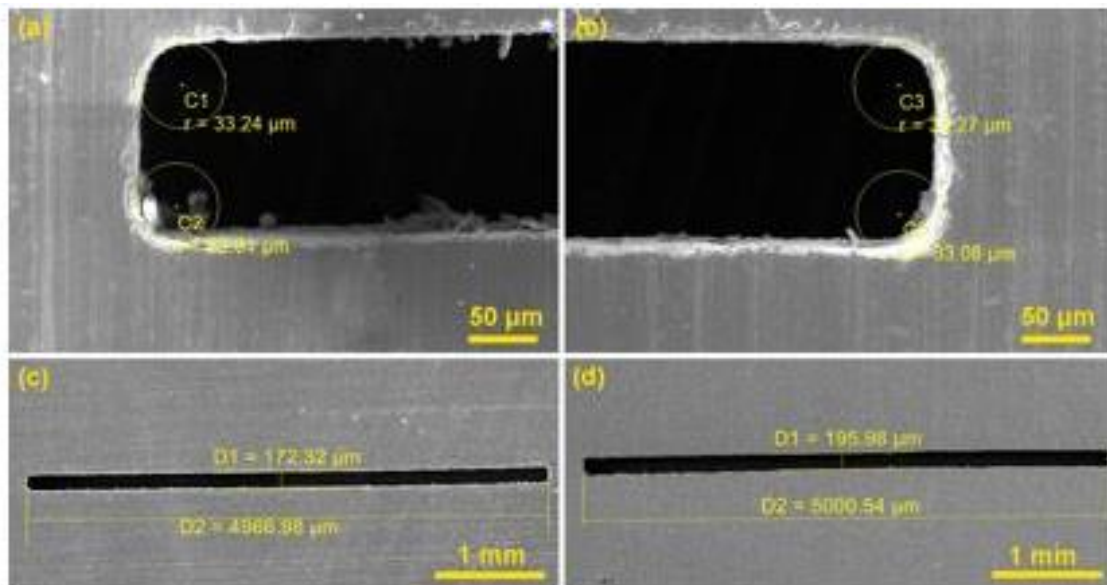
Obrázek 36: Rychlost erodování vzorků [58].

Výsledné součásti viz obr. 35 byly pozorovány pomocí elektronového mikroskopu (SEM – Scanning Electron Microscope) typu Lyra3 od firmy TESCAN. Užitím tohoto mikroskopu byly postupně změřeny všechny posuzované rozměry šterbiny, tedy její délka, šířka a také radiusy v rozích. Pro změření rádiusů byla použita aproximační kružnice. Tyto naměřené výsledky jsou uvedeny v tabulce č. 7:

Tabulka 7: Naměřené parametry šterbin z EDM.

| Číslo vzorku | Roh 1 ( $\mu\text{m}$ ) | Roh 2 ( $\mu\text{m}$ ) | Roh 3 ( $\mu\text{m}$ ) | Roh 4 ( $\mu\text{m}$ ) | Délka ( $\mu\text{m}$ ) | Šířka ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1            | 55.24                   | 54.95                   | 56.19                   | 56.56                   | 4927.97                 | 155.41                  |
| 2            | 42.57                   | 39.76                   | 39.6                    | 39.75                   | 4966.98                 | 172.32                  |
| 3            | 40.33                   | 40.56                   | 39.41                   | 40.4                    | 4973.74                 | 199.36                  |
| 4            | 33.24                   | 32.81                   | 34.27                   | 33.08                   | 4994.01                 | 159.03                  |
| 5            | 40.76                   | 40.12                   | 41.56                   | 38.92                   | 4977.63                 | 166.93                  |
| 6            | 40.63                   | 41.03                   | 45.05                   | 43.11                   | 5000.54                 | 195.98                  |
| 7            | 35.5                    | 36.28                   | 38.75                   | 38.92                   | 5006.05                 | 165.81                  |
| 8            | 51.07                   | 49.59                   | 55.35                   | 55.67                   | 5000.77                 | 203.64                  |
| 9            | 40.15                   | 42.44                   | 39.22                   | 43.52                   | 4784.52                 | 179.28                  |
| 10           | 43.69                   | 44.91                   | 44.43                   | 42.81                   | 4989.97                 | 189.22                  |
| 11           | 42.86                   | 41.06                   | 40.09                   | 42.63                   | 4953.05                 | 181.14                  |
| 12           | 42.07                   | 44.21                   | 43.52                   | 44.26                   | 4922.87                 | 178.96                  |
| 13           | 36.13                   | 34.94                   | 37.28                   | 36.13                   | 4948.75                 | 167.93                  |
| 14           | 44.82                   | 44.17                   | 48.44                   | 46.74                   | 4997.15                 | 158.72                  |
| 15           | 35.26                   | 35.76                   | 37.08                   | 34.22                   | 4990.92                 | 198.4                   |

Jak je vidět v tabulce č. 7, nejmenší dosažený radius byl  $32.81 \mu\text{m}$  a největší  $56.56 \mu\text{m}$ , průměrný radius je  $42,06 \mu\text{m}$ . Nejpřesnější šířka byla naměřena  $172.32 \mu\text{m}$  u vzorku 2 a nejpřesnější délka  $5000.54 \mu\text{m}$  u vzorku 6. Tyto nejlepší vzorky jsou znázorněny na obr. 37.

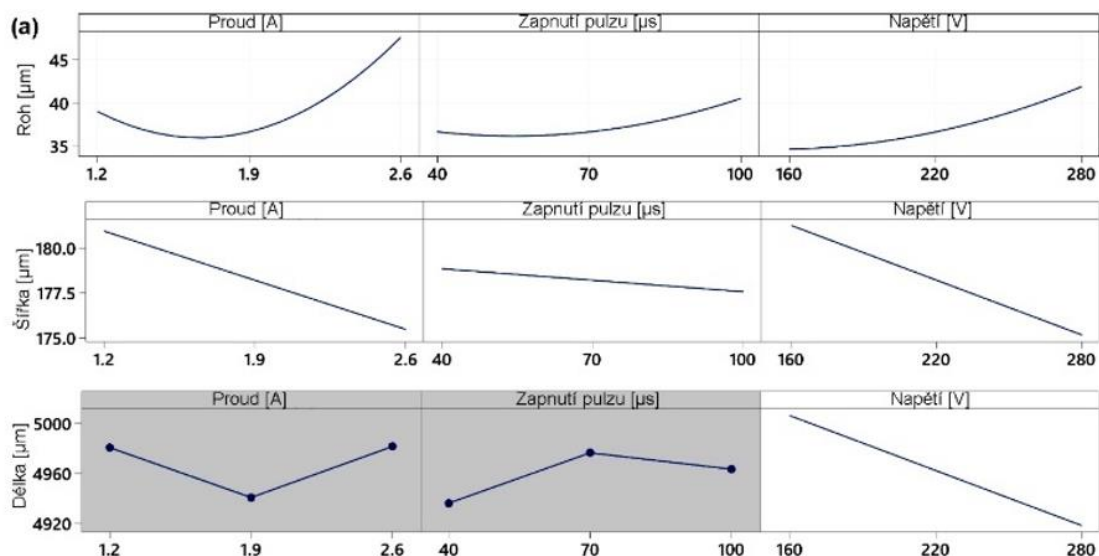


Obrázek 37: Detail štěrbin [58].

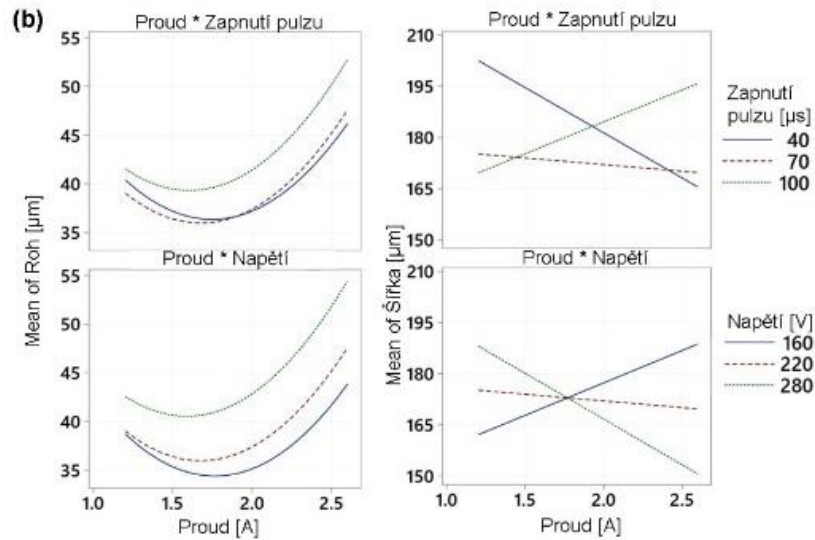
Je tedy zřejmé, že u žádného vzorku nebylo nejpřesnějších parametrů dosaženo současně, ačkoli několik vzorků splnilo požadavky na přesnost rozměrů – konkrétně vzorky 2, 5, 7 a 13.

Kvůli možnosti optimalizace celého obráběcího procesu byly také sledovány vlivy tří parametrů nastavení stroje, konkrétně: proud (pulse current  $I$ ), zapnutí pulzu (pulse on time  $T_{on}$ ) a napětí (voltage  $U$ ) a vyneseny závislosti dosažených hodnot na jejich velikosti. Parametr vypnutí pulzu (pulse off time  $T_{off}$ ) byl na základě předchozích zkušeností zaměstnanců společnosti nastaven na konstantní hodnotu  $20 \mu\text{s}$ .

Na následujících obr. 38 a 39 lze pozorovat závislost zaoblení rohů a rozměrů štěrbin na velikosti proudu, době zapnutí pulzu a na napětí. U každého z parametrů byly zvoleny tři hodnoty, které se měřili, a tyto tři hodnoty byly aproximovány křivkou.



Obrázek 38: Závislosti parametrů při EDM [58].



Obrázek 39: Závislosti parametrů při EDM [58].

Na základě zpracování dat byl nedávno publikován článek [58], kde jsou pomocí multikriteriální statistické metody vyhodnoceny sledované parametry a stanoveny optimální vstupní hodnoty pro výrobu dané mikrošterbiny:

Tabulka 8: Optimální parametry [58].

| Proměnná                               | Nastavená hodnota |          |
|--|-------------------|----------|
| Proud [A]                              | 2.1               |          |
| Doba zapnutí [μs]                      | 40                |          |
| Napětí [V]                             | 238.8             |          |
| Výsledky                               | Vypočtené         | Skutečné |
| Šířka [μm]                             | 170,6             | 168,9    |
| Délka [μm]                             | 4948.8            | 4950.59  |
| Radius [μm]                            | 40.01             | 36.15    |
| Rychlost eroze [mm.min <sup>-1</sup> ] | 0.128             | 0.113    |

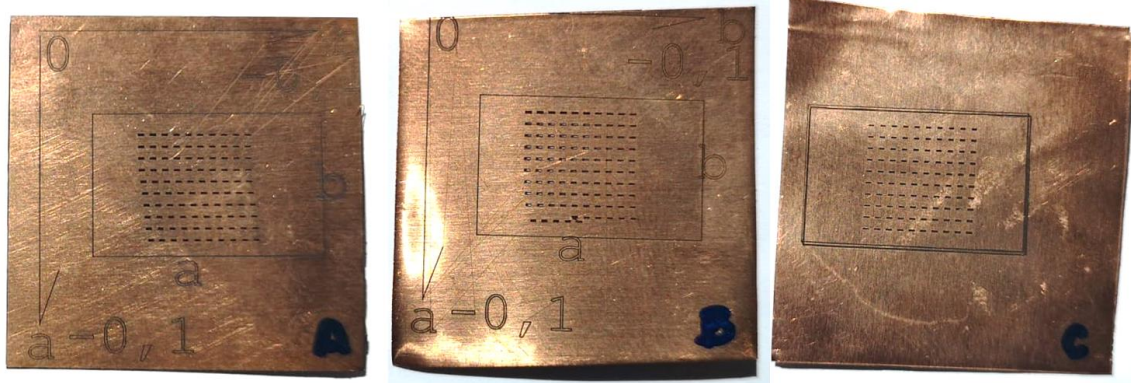
### 3.2 Výroba šterbiny pomocí LBM

Ve spolupráci s firmou LASCAM byla vytvořena sada vzorků na jejich pevnolátkovém vláknovém laseru s ultrakrátkými pulzy EW YLPP-25-1-50-R od firmy IPG (obr. 40). Jedná se o laser s energií v pulzu až 25 μJ, kvalitou svazku <math>1.4 M^2</math> a opakovací frekvencí 50 – 2000 kHz. Pulzy trvají pouze pár pikosekund (1–3 ps) a vytváří velmi vysoké energie, což má za následek precizní úběr materiálu téměř za studena s minimálním teplotním ovlivněním obráběného materiálu. Vlnová délka laseru je 1030 nm.



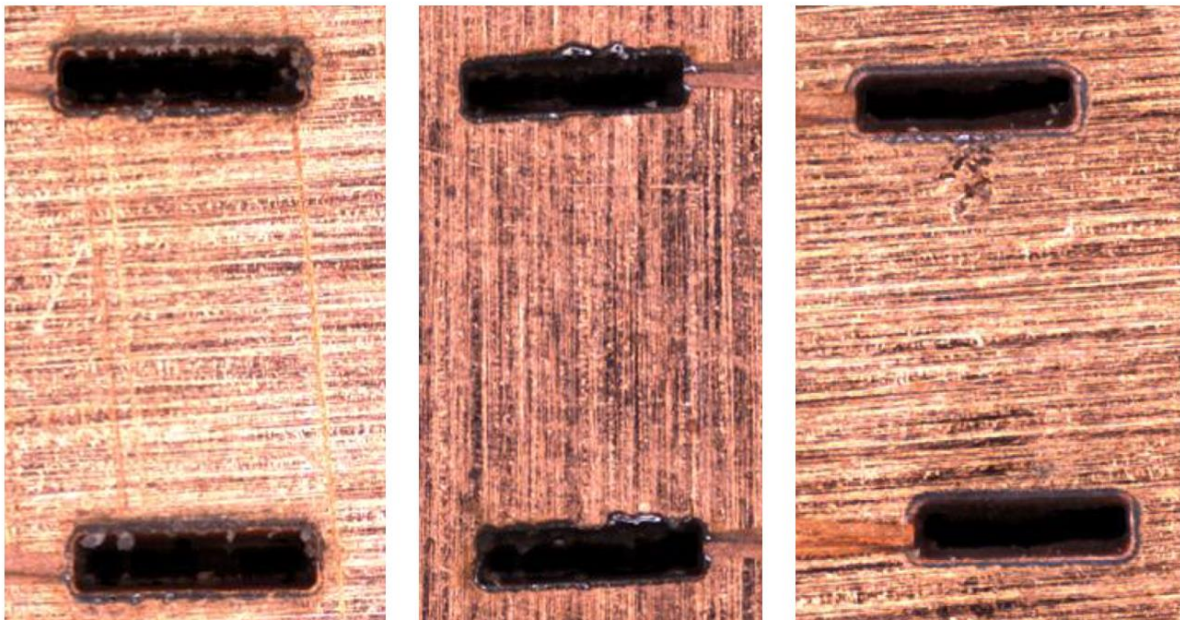
Obrázek 40: Vláknový laser EW YLPP-25-1-50-R od firmy IPG.

Měděný plech byl upnut mezi další dva plechy s dírou uprostřed a při procesu bylo použito odsávání s filtrací. Parametry nastavení laseru byly určeny experimentálně formou zkušebních řezů (vzorky B a C), kdy se postupně snižovala šířka štěrbin s krokem  $100\ \mu\text{m}$ . Na základě zjištěných parametrů byl pak proveden test formou matice (vzorek A) při nastavení maximálního výkonu zařízení  $50\ \text{W}$ , frekvenci  $2\ \text{MHz}$  a rychlosti pohybu svazku  $50\ \text{mm/s}$ . Obrábění probíhalo po řádcích s rozestupem  $10\ \mu\text{m}$  a obrábění jedné štěrbiny trvalo asi 5 sekund. Všechny vzorky jsou zobrazeny na následujícím obr. 41.



Obrázek 41: Vzorky A, B, C

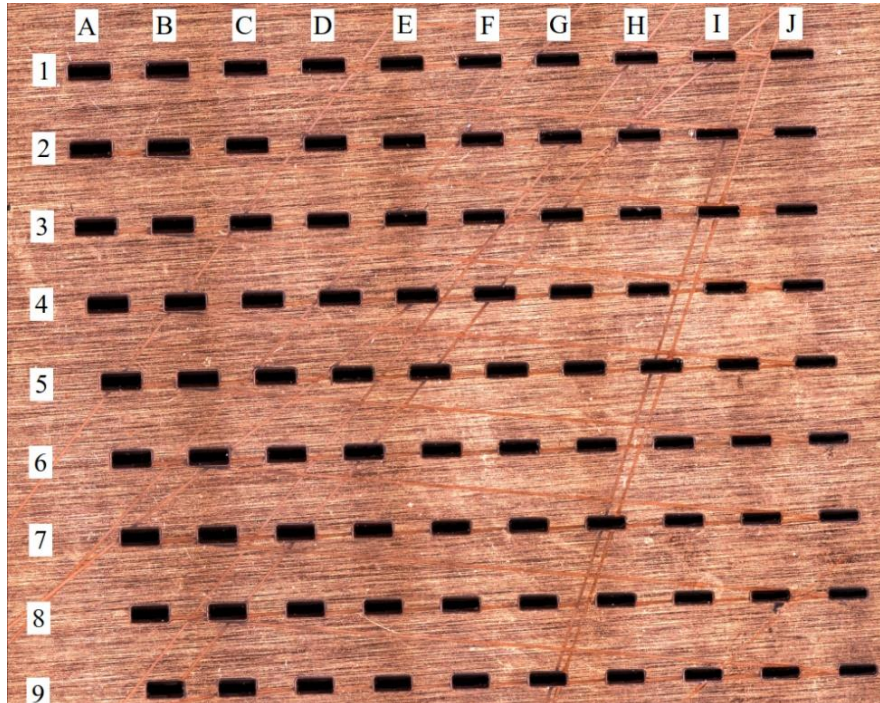
Vzorky byly pozorovány 5x zvětšené pomocí elektronového mikroskopu Alicona G5, a následně byly studovány (stejně jako u předchozí metody) rozměry štěrbin u vzorku A, v tomto případě jen jejich šířky, které mají užší a hůře dosažitelnou toleranci. Pozorovány byly i zkušební vzorky B a C. V případě vzorku B se obráběla štěrbina ve vodorovně se směrem vláken měděné fólie a v případě vzorku C horizontálně. Kvalita řezných hran štěrbin z jednotlivých vzorků je zobrazena na obr. 42.



Obrázek 42: Štěrbiny ze zkušebních vzorků B a C, vpravo štěrbinu ze vzorku A, které splnily tolerance (6J a 7J)

Na vzorku B jsou ihned patrné otřepy poblíž řezné spáry, zatímco na vzorku C spíše převažují opaly a nataveniny. Uvedené vady se vyskytují na všech štěrbinách na maticích. Na vzorcích

z matice A jsou tyto nežádoucí jevy taky pozorovatelné, ale v mnohem menší míře. V následující tabulce jsou zaznamenány všechny naměřené šířky štěrbin ze vzorku A (obr. 43). Z naměřených dat lze usoudit, že experimentální hledání vhodných parametrů bylo realizováno úspěšně, jelikož posledních 5 vzorků splňuje zadaný rozměr v rámci tolerance na šířku štěrbin  $170 \pm 5 \mu\text{m}$ .

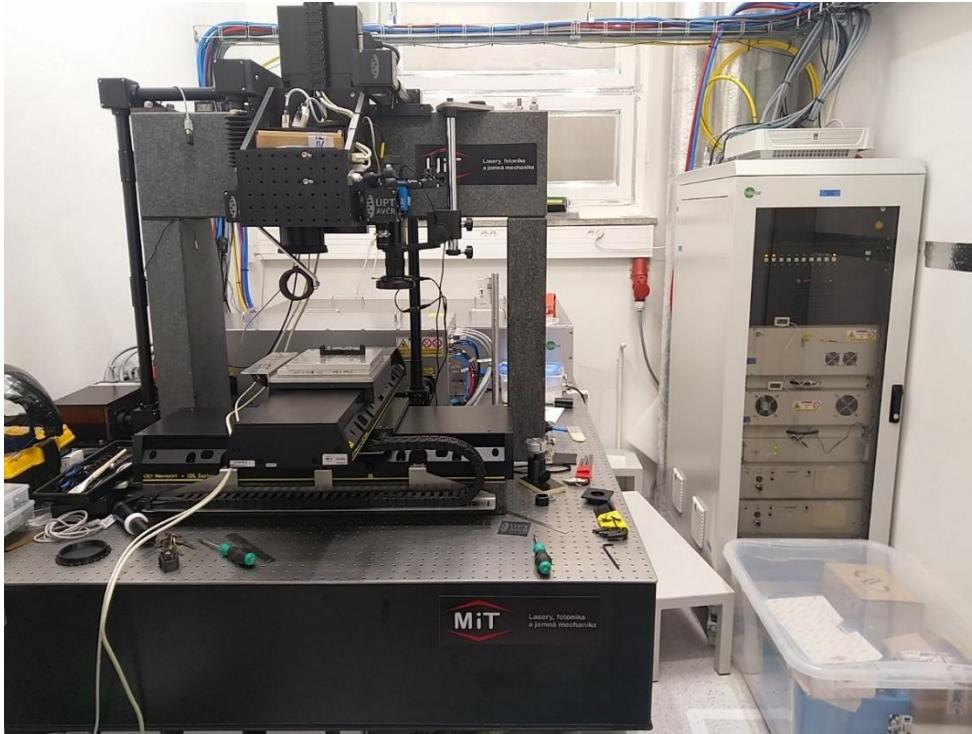


Obrázek 43: Matice A

Tabulka 9: Šířky štěrbin z matice A.

|   | A   | B   | C   | D   | E   | F   | G   | H   | I   | J   |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 256 | 242 | 226 | 223 | 221 | 208 | 192 | 192 | 164 | 157 |
| 2 | 263 | 245 | 239 | 226 | 210 | 208 | 195 | 183 | 178 | 161 |
| 3 | 250 | 245 | 233 | 216 | 221 | 208 | 198 | 183 | 176 | 159 |
| 4 | 265 | 249 | 240 | 230 | 216 | 211 | 193 | 190 | 172 | 161 |
| 5 | 250 | 242 | 240 | 222 | 221 | 205 | 200 | 197 | 180 | 172 |
| 6 | 265 | 252 | 236 | 233 | 215 | 213 | 204 | 190 | 180 | 168 |
| 7 | 267 | 245 | 241 | 235 | 214 | 217 | 205 | 199 | 181 | 167 |
| 8 | 256 | 249 | 247 | 222 | 216 | 208 | 203 | 198 | 168 | 166 |
| 9 | 253 | 252 | 241 | 230 | 218 | 215 | 206 | 192 | 162 | 171 |

Následně se zadaná součást s mikroštěrbínou vyráběla také na Ústavu přístrojové techniky Akademie Věd ČR (ÚPT) v Brně, kde mají k dispozici mikroobráběcí stanici s pikosekundovým laserem Perla 100 od výrobce Hilase viz obr. 44. Jedná se tenkodiskový pevnolátkový laser s energií v pulsu až 20 mJ a výjimečnou kvalitou svazku  $M^2 < 1,15$ , který je schopen produkovat více než 40 tisíc svazků pro vícesvazkové obrábění. Tato laserová produktová řada pokrývá opakovací frekvence od 1 do 200 kHz, a umožňuje tak použití standardního vybavení pro průmyslové obrábění a charakterizaci s uplatněním vícesvazkové technologie. Laser pracuje na vlnové délce 1030 nm s průměrným výkonem 100 W a délkou pulzu menší než 1 ps. Díky takto krátce trvajícím pulzům se obrábí za studena, výsledné vzorky tak nevykazují teplotní ovlivnění řezu. [71]

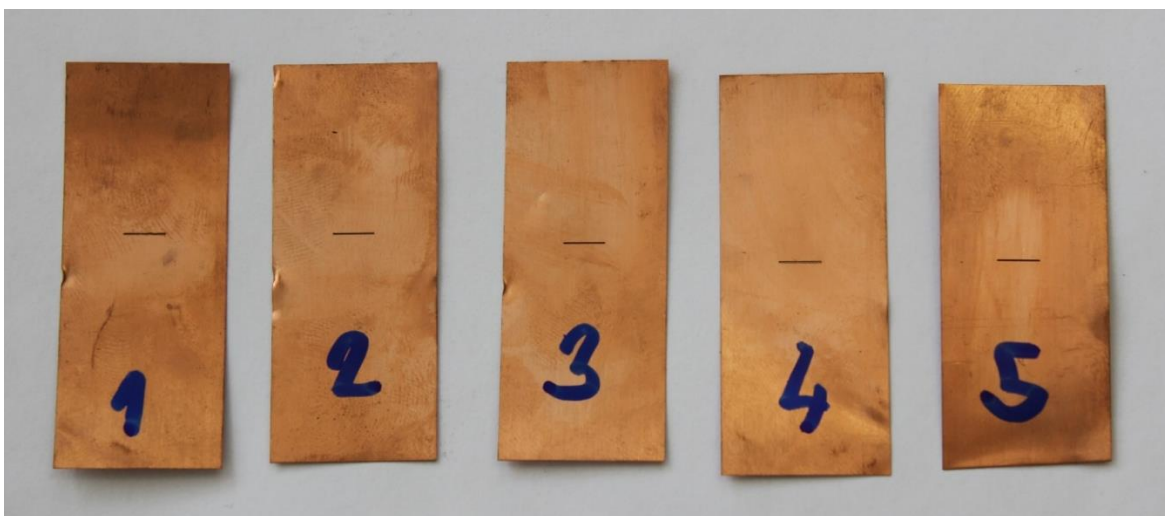


Obrázek 44: Obráběcí centrum s pikosekundovým laserem na ÚPT Brno.

Pro výrobu sady pěti vzorků byl nastaven průměrný výkon  $5,5 \text{ W}$  ( $29,5 \text{ J/cm}^2$ ).

Jednotlivé segmenty měděné fólie byly upnuty na stole mikrobráběcí stanice pomocí plastových upínek. Obrábění probíhalo ve dvou fázích. V první dochází ke zhotovení prvotního otvoru (rozmitání svazku na šířku cca  $150 \mu\text{m}$ , konce drážek nesplňují zadání ostrého rohu). Ve druhé fázi dochází k vytvoření ostrých rohů a zhotovení konečných rozměrů.

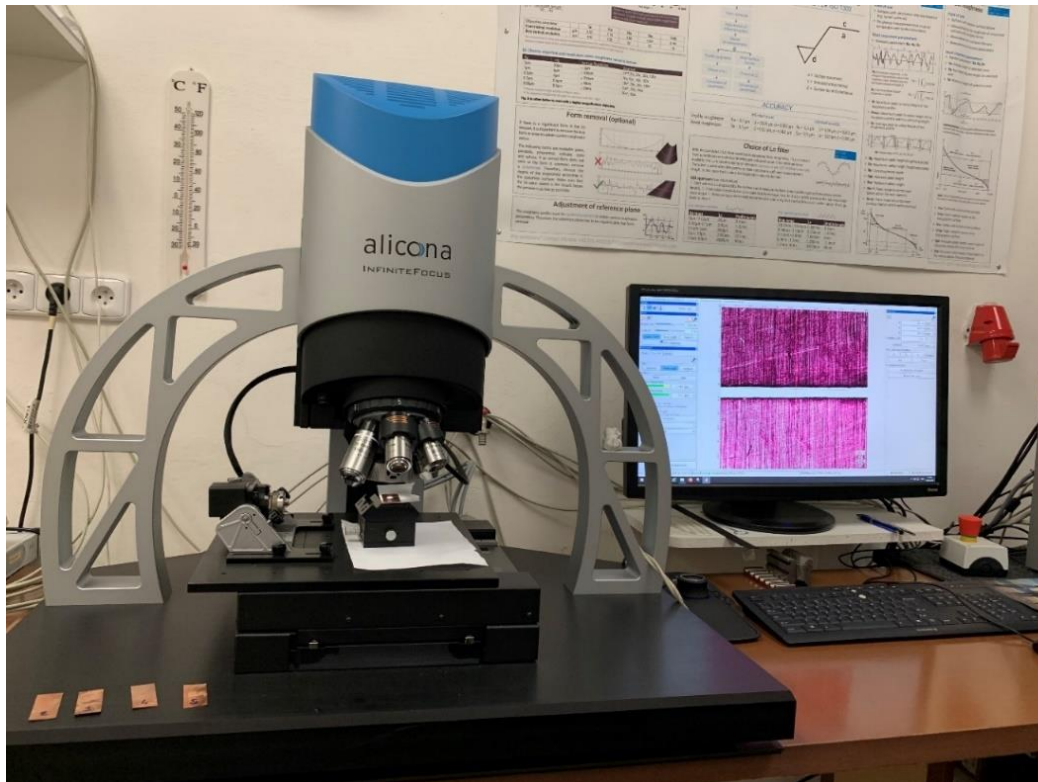
Celkový čas zhotovení jednoho vzorku včetně upnutí a odepnutí činil cca  $63 \text{ s}$ , samotné obrábění cca  $18 \text{ s}$ , zhotoveno byl 5 vzorků. Čas obrábění by bylo možné zredukovat jednak optimalizací samotného procesu (možná až cca  $\frac{1}{2}$  času obrábění). Hlavní případné úspory je možné nalézt v oblasti upínání, kde např. vhodný vakuový upínač by mohl přinést redukci na několik málo sekund.



Obrázek 45: Vzorky vyrobené pomocí LBM.



Výsledné součásti byly pozorovány 5x zvětšené pomocí elektronového mikroskopu Alicona G5, kde byly studovány (stejně jako u předchozí metody) rozměry šterbiny, tedy její délka, šířka a také radiusy v rozích.



Obrázek 46: Měření na elektronovém mikroskopu Alicona Infinite Focus G5.

Výsledky z měření jsou zaznamenány v tabulce č.10. Jak je vidět, při měření žádný ze vzorků nesplnil podmínky rozměrových tolerancí. Na druhou stranu lze pozorovat u všech vzorků stejný trend – všechny rozměry jsou větší a jejich hodnoty jsou si velice blízko. To předkládá otázku, nakolik by se dal proces optimalizovat, aby zadané tolerance splnil. Rádíe v rozích byly naměřeny od 15,659–51,451  $\mu\text{m}$ . Velký rozsah hodnot je způsoben otřepy v rozích, které zabránily přesnějšímu měření. Průměrně naměřený radius je 32,26  $\mu\text{m}$ .

Tabulka 10: Výsledky měření LBM.

| Číslo vzorku | Roh 1 ( $\mu\text{m}$ ) | Roh 2 ( $\mu\text{m}$ ) | Roh 3 ( $\mu\text{m}$ ) | Roh 4 ( $\mu\text{m}$ ) | Délka ( $\mu\text{m}$ ) | Šířka ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1            | 38.027                  | 36.542                  | 17.002                  | 27.092                  | 5071.3                  | 181.927                 |
| 2            | 39.004                  | 36.31                   | 51.451                  | 32.26                   | 5084.703                | 186.68                  |
| 3            | 34.217                  | 27.373                  | 18.847                  | 46.563                  | 5067.461                | 185.007                 |
| 4            | 28.513                  | 15.659                  | 27.768                  | 34.636                  | 5060.539                | 182.579                 |
| 5            | 25.405                  | 31.317                  | 47.32                   | 29.989                  | 5067.418                | 180.728                 |

Kvalitu mikrobráběného povrchu lze pozorovat na obr. 47, kde je vidět řezná spára pozorovaná na mikroskopu Alicona. Ve spodní části řezné spáry jsou patrné nataveniny a nerovnosti povrchu. V rozích jsou přítomny otřepy, které bohužel snižují kvalitu vyrobené šterbiny.



Obrázek 47: Štěrbina zvětšená 5x na elektronovém mikroskopu.

### 3.3 Konzultace výroby dalšími metodami

Výroba součásti je proveditelná i dalšími nekonvenčními metodami, které však z finančního i časového hlediska nebyly prakticky provedeny. K posouzení jejich vhodnosti a předběžnou predikci jejich limitů a rizik bylo využito možnosti konzultací s odborníky na dané metody přímo z oboru.

#### 3.3.1 Výroba pomocí FIB

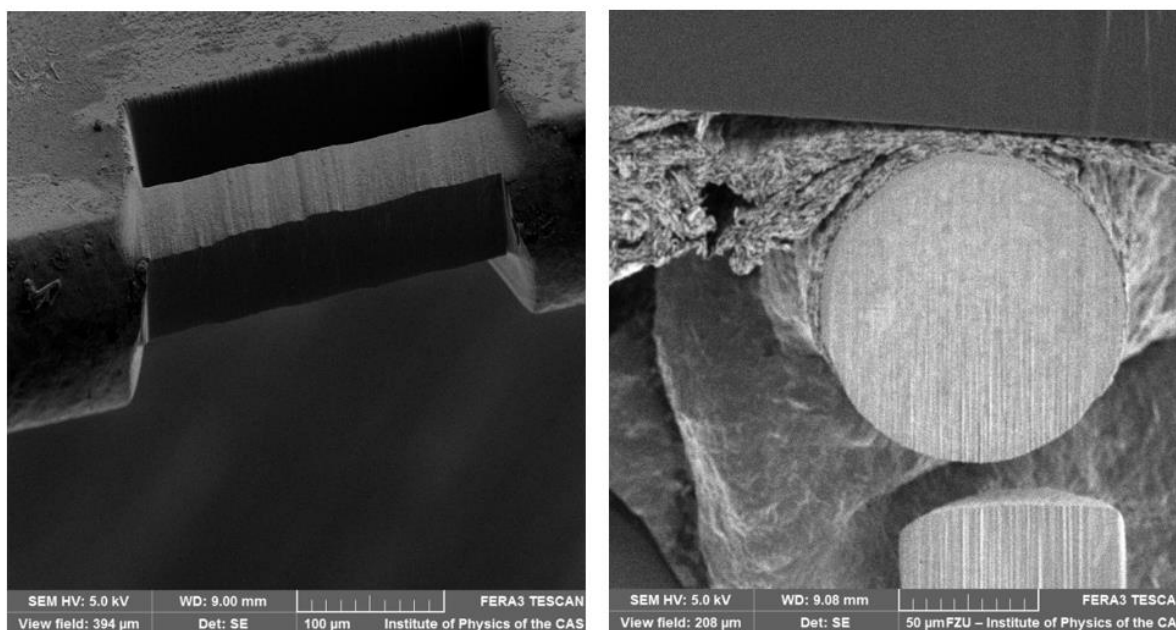
Zda by bylo opravdu možné mikroštěrbinu vyrobit obráběním iontovým svazkem, bylo konzultováno na Fyzikálním ústavu Akademie věd České republiky (FZU), kde disponují zařízením s FIB s galliovým zdrojem iontů i plazmovým zdrojem iontů (převážně xenon).

Jak bylo uvedeno v teoretické části, obrábění pomocí FIB s galliovým zdrojem je vhodnější pro obrábění v řádech nanometrů (průměr svazku menší než 10 nm). Obrábění štěrbin by tedy teoreticky bylo možné, ale kvůli dlouhému strojnímu času zcela nepraktické a provádělo by se v mnoha krocích (maximální plocha řezu je 100 mikrometrů šířky). Pro představu jen výroba otvoru o rozměru 170  $\mu\text{m}$  a tloušťce 125  $\mu\text{m}$  ve vzorku by trvala několik hodin. Galliový FIB

tedy pro tuto aplikaci není příliš vhodný. Dalším negativem je fakt, že galium kontaminuje materiál polotovarů a mění jeho mechanické vlastnosti – křehnutí po hranicích zrn. [59; 60]

Vhodnější je tedy využít zařízení FIB s plazmovým zdrojem. První prodáváný dual-beam SEM s plazmovým FIB byl Tescan FERA 3, který FZU pořídilo v dubnu 2014. Šířka zorného pole iontů je 400 mikrometrů, takže by dle předpokladu výroba zadané štěrbinu probíhala ve 13ti krocích. Průměr svazku iontů je od 100 nm do 30 mikrometrů, což by umožnilo dosažení požadované přesnosti. Výroba touto metodou by ale byla pracná a časově velmi náročná. Tento přístroj dokáže řezat jakékoli materiály do hloubky 1mm. Nyní jsou ale v prodeji i novější zařízení, například Tescan Amber X, který má šířku zorného pole 1 mm. S jeho využitím by se již štěrbinu dala vyrobit v 5 – 6 krocích. Společnost ThermoFisher dále nabízí také plazmový FIB - Helios 5, který automaticky přepíná 4 plyny Xe, Ar, N, O). [60]

Problémem při obrábění kovů pomocí metody FIB jsou takzvané artefakty – záclonky (curtains), které jsou zobrazeny na obr. 46 (čáry shora dolů). Ochranou proti vzniku tohoto nežádoucího jevu je GIS (depozice vrstvy platiny, wolframu, uhlíku případně kobaltu na povrch) a kinematický stolek (naklání plochy řezu, aby se pozitivní zpětná vazba nevytvářela). Dále společnost Tescan patentovala masky (tj. přiloží tenké desky z monokrystalu – tzv. wafer Si na povrch). Dalším problémem je, že svazek při obrábění postupně při průchodu materiálem ztrácí svou energii (jak tomu bývá u všech paprskových technologií) a obráběné díry se tedy postupně, se zvyšující se hloubkou, zužují. [60]



Obrázek 48: Záclonky vznikající při obrábění kovů pomocí FIB [60].

### 3.3.2 Výroba pomocí PCM

Výroba mikroštěrbinu pomocí chemického leptání byla konzultována s českou firmou Semach, která se komerčně touto metodou výroby zabývá pravděpodobně jako jedinná v České republice. Štěrbínu v měděné fólii jsou schopni vyrobit právě pomocí chemického leptání, ale i galvanickým nakovováním (electroforming). [61]

Pokud by se výroba mikroštěrbin realizovala, měděný plech by se nejdříve mechanicky očistil na dopravníkové mechanické katrtáčovače, kdy otáčející se kartáč čistí oxidy, mastnotu a další nečistoty z povrchu. Vyčištění povrchu je klíčové pro výslednou kvalitu povrchu a pro přilnavost fotorezistu. Dále se za tepla nanáší (nažehluje) fotorezist ve formě monomerové folie o tloušťce 50 mikrometrů navinuté na roli. [61]

---

Další krok je nalaminování filmu na fotorezist, který se vytváří na fotoplotru a při jeho výrobě se musí započít korekce pro eliminaci negativního jevu – podleptání. Následně se film prosvítí ultrafialovým světlem, díky kterému se fotocitlivý fotorezist na místech, kde byl vystaven UV světlu, vytvrdí. [61]

Jako leptadlo by bylo nejvhodnější použití chloridu železitého, který kromě mědi leptá i další barevné kovy a také vanad, chrom, nikl nebo železo. Leptání by probíhalo na kyselé leptačce od italské firmy Lumiplas při teplotě leptadla cca 55 °C. [61]

Bohužel, při využití mechanického nanášení filmu, se předpokládá nejlepší technologicky dosažitelná tolerance  $\pm 25 \mu\text{m}$ . Při využití metody LDI by bylo možné dosáhnout tolerancí kolem  $\pm 10 \mu\text{m}$ . Metoda proto pro výrobu zadané součásti není vhodná. [61]

## 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Pro ekonomické zhodnocení výroby součástí pomocí EDM je potřeba započítat i náklady na výrobu nástrojů, kdy je potřeba pro každou součást vyrobit vlastní nástroj tzn. náklady na řezání nástroje na WEDM a téměř dvojnásobnou spotřebu materiálu. Při kusové výrobě, což je náš případ, se projeví také náklady na vytvoření speciálního držáku na nástroj a upínacího přípravku na obráběnou součást. Jedná se o energeticky náročnou výrobu, takže náklady na energie budou také zahrnuty do ceny výroby, a také se promítne cena petroleje, ve kterém musí být součást ponořena při hloubení. Strojní čas obrábění jednotlivých součástí jsou zapsány v následující tabulce.

Tabulka 11: Strojní časy hloubení štěrbin pomocí EDM

| Vzorek | Čas [min] | Vzorek | Čas [min] | Vzorek | Čas [min] |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| 1      | 1.47      | 6      | 2.08      | 11     | 2.27      |
| 2      | 1.19      | 7      | 4.17      | 12     | 1.39      |
| 3      | 1.32      | 8      | 1.71      | 13     | 1.25      |
| 4      | 1.09      | 9      | 0.66      | 14     | 0.89      |
| 5      | 5.43      | 10     | 1.09      | 15     | 3.13      |

Celkový strojní čas k výrobě prvních 15 štěrbin je 29,14 minut a průměrný strojní čas je 1,94 minuty na jednu štěrbinu. Po optimalizaci byla rychlost obrobení jedné štěrbiny 1,11 minuty. Cena obrábění získaná od výrobce je 1000 Kč / hodinu hloubení.

$$N_s = t_{AS} \cdot N_{sm} \quad (4.1)$$

$$N_{sEDM} = 1,11 \cdot \frac{1000}{60} = 18,5 \text{ Kč}$$

kde:  $N_s$  – náklady na strojní práci [Kč]  
 $t_{AS}$  – jednotkový čas strojní [min]  
 $N_{sm}$  – náklady na minutu strojní práce [Kč]

Do nákladů na výrobu se kromě přímých nákladů (materiál, mzdy výrobních dělníků, energie přiřaditelné k dané výrobě) se započítávají i nepřímé výrobní náklady na výrobní režii (mzdy nevýrobních pracovníků, provoz, administrativa, logistika, energie,...) Toto platí i pro všechny dále zmíněné metody obrábění.

Výroba součástí metodou LBM na pikosekundovém laseru Hilase bude nákladná především kvůli vysoké pořizovací ceně laseru. Zato obráběcí časy jsou velice krátké a náklady na provoz jsou poměrně nízké. Strojní čas obrábění svazkem laseru byl průměrně 18 s (0,3 min) na vzorek. Do nákladů by se měly započítat i časy upínání, které byly změřeny na 45 sekund. Získaná doporučená cena je 4000 Kč za hodinu obrábění.

$$N_{sLBM} = 0,3 \cdot \frac{4000}{60} = 20 \text{ Kč}$$

Cenová nabídka na výrobu součástí byla poskytnuta i firmou Lascam. Výroba jim zabrala přibližně jeden pracovní den kvůli testování vhodných parametrů nastavení laserového zařízení a hledání vhodného způsobu upnutí. Dle jejich ceníku tedy 1120 eur / den. Vysoké výrobní náklady na jeden kus jsou způsobeny kusovou výrobou a vysokou pořizovací cenou laseru,

kteřá v závislosti na konfiguraci stojí okolo 150 000 eur. Upínání matice mezi dva plechy trvalo zhruba 5 minut a samotné obrábění laserovým paprskem poté 5 s na jednu šterbinu na matici.

Pro kompletnost je zahrnuta i cenová nabídka od firmy Semach na výrobu šterbin fotochemickým obráběním, ačkoli nejpřesnější nabídnutá tolerance je  $\pm 10 \mu\text{m}$ . Nabídka tedy z technologického hlediska nevyhovuje, protože nespĺňuje kritéria zadání.

V běžné toleranci firmy  $\pm 25 \mu\text{m}$  je cena za výrobu 3 ks 1975 Kč, v toleranci  $\pm 10 \mu\text{m}$  pak částka 3942 Kč (výroba více dílů a při kontrole a měření dat se pak vyberou ty, co tuto toleranci splní). Do nákladů na výrobu šterbin pomocí PCM se započítává také příprava dat, výroba filmů a korekce podleptání, což také zvedá cenu především na kusové výrobě.

Pro obrábění pomocí metody FIB bohužel nemáme k dispozici žádné finanční údaje, ale v nákladech FIB by figurovaly vyšší částky kvůli vysoké pořizovací ceně zařízení a dlouhým strojním časům obrábění. Požadavky na tvorbu vakua a na kvalifikovanou obsluhu by také hrály významnou položku v ekonomickém zhodnocení.

K technickému zhodnocení je třeba shrnout, že obě vyzkoušené metody (EDM i LBM) jsou schopny tolerance  $\pm 5 \mu\text{m}$ , metoda FIB by měla tuto toleranci také splnit (měla by být i přesnější vzhledem k průměru obráběcího svazku v řádech nanometrů) a metoda PCB tuto toleranci splnit nedokáže.

Více negativních jevů a vad při obrábění bylo pozorováno u metody LBM, kde byly na spodní hraně řezu viditelné nataveniny a nerovnosti způsobené paprskem a dále byly pozorovány otřepy v rozích. Metodou EDM bylo dozaženo povrchu bez vad. Metoda LBM ale doháhla lepších parametrů v rozích, kdy průměrný radius u metody LBM byl  $32,26 \mu\text{m}$  a u metody EDM  $42,06 \mu\text{m}$ .

K výrobě clony se šterbinou je doporučena metoda EDM. Technicko-ekonomické zhodnocení provedených pokusů je shrnuto do tab. 12:

Tabulka 12: Technicko-ekonomické zhodnocení.

|            | Ekonomické zhodnocení |                  |                 | Technické zhodnocení          |                                   |                    |
|------------|-----------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
|            | Strojní čas [min]     | Cena za kus [Kč] | Ostatní náklady | Tolerance $\pm 5 \mu\text{m}$ | Průměrný radius [ $\mu\text{m}$ ] | Vady povrchu       |
| <b>LBM</b> | 0,3                   | 20               | nízké           | dosáhne                       | 32,26                             | Otřepy, nataveniny |
| <b>EDM</b> | 1,11                  | 18,5             | vyšší           | dosáhne                       | 42,06                             | Bez vad            |

---

## ZÁVĚR

Největší výzvou během výroby součásti s mikroštěrbinou se ukázalo být dosažení požadované tolerance na šířku štěrbin  $170\pm 5$   $\mu\text{m}$ . Kritickým bodem byly nejen tolerance, ale také pravé úhly v rozích štěrbin (zamezení tvorby rádiů).

Jako naprosto nevhodné pro výrobu zadané součásti se ukázalo chemické obrábění, u kterého nelze dosáhnout ani zadané tolerance, ani pravých úhlů v rozích. Po konzultaci s firmou, která má s podobným zadáním již zkušenosti, jsme uznali, že leptání nelze v takto malých tolerancích řídit a nemá smysl výrobu pomocí PCM realizovat.

Také metoda FIB byla pouze konzultována, protože se zdála finančně nezajímavá. Galiový FIB by byl pravděpodobně schopný splnit všechny zadané parametry mikroštěrbiny díky průměru svazku v jednotkách nanometrů, ale vyrobit požadovaný otvor by trvalo několik hodin až dnů. Vysoká časová náročnost spolu s vysokou pořizovací cenou zařízení by znamenala velmi vysoké náklady na výrobu. Xenonový FIB by byl k výrobě vhodnější, ale kvůli jeho vysoké pořizovací ceně a nízké dostupnosti ve firmách předpokládáme, že by byl také ekonomicky nevýhodný.

Při výrobě pomocí LBM bylo na matici prokázáno, že splnit kritické tolerance na šířku štěrbin je možné. Dále ze sady součástí, vyráběných dle zadání na jiném pracovišti, nesplnila toleranci na šířku ani jedna z pěti štěrbin. Průměrný radius v rozích byl naměřen 32,26  $\mu\text{m}$ . Nebyla ale provedena další optimalizace, která by pravděpodobně ke splnění tolerancí vedla. Ideální ale nebyla ani kvalita řezné spáry, na které byly pozorovány nataveniny, nerovnosti a ořepky. Čas obrábění jednoho kusu laserovým svazkem byl průměrně 18 s. Náklady na tuto dobu obrábění jsou 20 Kč na kus.

Nejlepší hodnoty byly naměřeny u metody EDM, kdy před optimalizací splnily parametry zadání 4 vzorky z 15. Po optimalizaci byly vyrobeny další 3 vzorky a všechny dosáhly zadaných tolerancí. Horších výsledků bylo dosaženo v rozích s průměrným radiem 42,06  $\mu\text{m}$ . Pozorovaný povrch pod elektronovým mikroskopem byl kvalitní a bez vad. Metoda vyžaduje vyšší časovou náročnost na upnutí nového nástroje pro každou štěrbinu, kdy samotné hloubení po optimalizaci trvá 1,11 minuty. Náklady na tuto dobu hloubení jsou 18,5 Kč na kus.

Nejlepší výsledky povrchu tedy vykazuje metoda EDM, u které byly pozorovány hladké okraje bez ořepů a dalších vad. Hůře dopadla metoda LBM, kde byly na řezu patrné nataveniny, nerovnosti povrchu a ořepky.

Cenově nejvýhodnější metoda, která je schopná vyrobit štěrbinu v tolerancích, je tedy metoda EDM, a to i přesto, že pro každý obrobek je potřeba vyrobit vlastní nástroj. Cenově nejnákladnější by byla pravděpodobně metoda FIB, tu jsme ale nerealizovali.

Po posouzení dosažených tolerancí, kvality povrchu a finanční nákladnosti metod, je k výrobě po provedené optimalizaci zadané součásti doporučena metoda EDM.

---

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. OL 750 – UV-VIS-IR-FIR Automated Spectroradiometer System. In: *Opteema* [online]. Martinroda [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.opteema.com/en/products/spectroradiometer/ol-750-uv-fir/>
  2. PONEC, Jan. *Optické přístroje I* [online]. Olomouc, 2011, s. 33-34 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: [http://optics.upol.cz/userfiles/file/Opticke\\_pristroje\\_1.pdf](http://optics.upol.cz/userfiles/file/Opticke_pristroje_1.pdf)
  3. XUAN, Ng Ci. *Co je to spektrometr? Vysvětlení UV, VIS a IR spektrometru* [online]. 29. dubna 2020 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://cs.wavelength-oe.com/blog/what-is-a-spectrometer/>
  4. SPEKTROMETRY. *Optixs: Lasery a přístrojová technika* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/spektrometry-29k>
  5. Spectrometer vs. Radiometer vs. Spectroradiometer: Major Differences [online]. In: . *Lisun Instruments Limited*, 02 Sep, 2021 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.lisungroup.com/news/technology-news/spectrometer-vs-radiometer-vs-spectroradiometer-major-differences.html>
  6. Spektrometr, přístroj k měření barevného spektra osvětlení. In: *Měření světla České Budějovice* [online]. 31.08.2018 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://mereni-svetla-ceske-budejovice.cz/2018/08/31/mereni-barevneho-spektra-osvetleni/>
  7. ČERNOCH, Antonín, Radek MACHULKA a Jan SOUBUSTA. *Optická spektroskopie: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-244-3114-7.
  8. BARLIER-SALSI, Annick. Stray light correction on array spectroradiometers for optical radiation risk assessment in the workplace. *Journal of radiological protection: official journal of the Society for Radiological Protection*. 2014/11/07, 34, 915-930. Dostupné z: doi:10.1088/0952-4746/34/4/915
  9. MALÝ, Petr. *Optika*. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-802-4613-420 (strana 115-116)
  10. ŠIŇOR, Milan. *Difrakce světla* [online]. In: . Praha, 1998 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/optika/node8.html>
  11. HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0. (kapitola 36 a 37)
  12. Ohyb světla na šterbině. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. 2014-03-22 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/459-ohyb-svetla-na-sterbine>
  13. Single slit diffraction. In: *Introduction to Physics II: The University of Tennessee, Department of Physics and Astronomy* [online]. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <http://labman.phys.utk.edu/phys136core/modules/m9/diffraction.html>
  14. Custom Air Slits/High Precision Slits/Optical Slits. In: *Walthy Precision* [online]. Suzhou [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: [http://www.slcano.com/precision-slits-custom-air-slits-optical-slits/?gclid=EAIaIQobChMIoMbakN3S9gIVjNnVCh2HbgthEAMYASAAEgLMTvD\\_BwE](http://www.slcano.com/precision-slits-custom-air-slits-optical-slits/?gclid=EAIaIQobChMIoMbakN3S9gIVjNnVCh2HbgthEAMYASAAEgLMTvD_BwE)
-



- 
15. Diffraction from Single Slit [online]. In: *Physlab* . [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://physlab.org/experiment/diffraction-from-single-slit/>
  16. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-3943-1.
  17. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
  18. SAMEK, Radko, Zdeněk LIDMILA a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření: Část II*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4406-5.
  19. *CIRP Annals Manufacturing Technology: State of the Art of Micromachining*. 2000. Bern: Elsevier, 2000. ISSN 0007-8506. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607634519>
  20. WILEY. *Micro-cutting: fundamentals and applications*. Chichester: Wiley, 2013. Microsystem and nanotechnology. ISBN 978-0-470-97287-8
  21. LEE, Yan Jin a Hao WANG. Current understanding of surface effects in microcutting. *Materials & Design*. 2020, 192, 108688. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108688>
  22. HUNG, Wayne a Mike CORLISS. *Micromachining of Advanced Materials*. 2019/10/23. ISBN 978-1-78923-809-9. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.89432
  23. Micro Machining. In: *Ding Research Group: Laser Material Processing Lab* [online]. Iowa [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://research.engineering.uiowa.edu/ding/Micro-Machining>
  24. RAJU, Leera a Somashekhar S. HIREMATH. A State-of-the-art Review on Micro Electro-discharge Machining. *Procedia Technology*. 2016, 25, 1281-1288. ISSN 2212-0173. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.222>
  25. PANDEY, Ashutosh Kumar a Mohd ANAS. Sustainability and recent trends in micro- electric discharge machining ( $\mu$ -EDM): A state-of-the-art review: A state-of-the-art review. *Materials Today: Proceedings*. 2021. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.250>
  26. HABOVŠTIAKOVÁ, Mária. *Elektroerozivní drátové řezání technické keramiky* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124704>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osíčka
  27. MACCARINI, Giancarlo, Giuseppe PELLEGRINI a Chiara RAVASIO. Effects of the properties of workpiece, electrode and dielectric fluid in micro-EDM drilling process. *Procedia Manufacturing*. 2020, 51, 834-841. ISSN 2351-9789. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.117>
  28. CZELUSNIAK, Tiago, Camila HIGA, Ricardo TORRES, Carlos LAURINDO, José Mario DEPAIVA, Armin LOHRENGEL a Fred AMORIM. Materials used for sinking EDM electrodes: a review: a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019/01/01, 41. Dostupné z: doi:10.1007/s40430-018-1520-y
  29. *Navel* [online]. Velešín: Navel, © 1993 - 2022 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://navel.cz/sluzby/edm-elektroerozivni-obrabeni/>
-

- 
30. MAHENDRAN, S., Ramasamy DEVARAJAN, T. NAGARAJAN a Majdi A. A review of Micro-EDM. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*. 2010/03/01, 2181.
  31. Maity KP and Singh RK. *An optimisation of micro-EDM operation for fabrication of micro-hole*. *Int J Adv Manuf Technol* 2012; 61:1221-1229.
  32. OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. Nekonvenční technologie obrábění: vzdělávací a tréninkový modul. Brno, 2012, 96 s. Učební text Vysokého učení technického v Brně.
  33. Nový stroj umí obrábět laserem zastudena s mikrometrovou přesností. *Isibrno* [online]. Brno [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.isibrno.cz/cs/novy-stroj-umi-obrabet-laserem-zastudena-s-mikrometrovou-presnosti>
  34. Laserové řezání jako bezkontaktní proces oddělování. In: *Trumpf* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/reseni/pouziti/laserove-rezani/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/laserove-rezani/)
  35. DUBEY, Avaniš Kumar a Vinod YADAVA. Laser beam machining—A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2008, 48(6), 609-628. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.10.017>
  36. Obrábění laserem. In: *ELUC* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1423>
  37. HUBERT, Michael. Obrábění laserem pro všechna odvětví. In: *Průmyslové spektrum* [online]. 11. 02. 2015 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-laserem-pro-vsechna-odvetvi>
  38. LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ. In: *Lasertherm* [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-svarovani-kovu>
  39. LASEROVÉ KALENÍ. In: *Lasertherm* [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-kaleni>
  40. NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (1) – princip laseru. In: *Průmyslové spektrum* [online]. 13. 03. 2012 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru>
  41. MARTAN, Jiří. Víte, co máte v laserovém stroji za zdroj?. In: *InfoCube* [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://infocube.cz/cs/vite-co-mate-v-laserovem-stroji-za-zdroj/>
  42. Princip vláknového - FIBER LASERU. In: *Leonardo Technology* [online]. 13. 03. 2012 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
  43. MRŇA, Libor a Novotný JAN. Laserové mikroobrábění pikosekundovými pulzy. In: *Průmyslové spektrum* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-mikroobrabeni-pikosekundovymi-pulzy>
  44. Mikroobrábění – Jak opracováváme miniaturní součásti laserem. In: *Lascam* [online]. 12.6.2017 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/mikroobrabeni/>
-

- 
45. EL-HOFY, Hassan Abdel-Gawad. *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes. 2nd edition.* Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. ISBN 978-1-4665-7702-2.
  46. VYAS, Jayvardhan, Likhith SAWANT, Shubhang TYAGI, Girish JOSHI, Samadhan DESHMUKH a Asha INGLE. An overview on parametric study of photochemical machining process and its applications. *Materials Today: Proceedings.* 2022, 51, 1055-1062. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.093>
  47. The Photochemical Machining Process. In: *Photofabrication Engineering* [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.photofabrication.com/explore/etching-process/>
  48. THORAT, Sachin. Electron Beam Machining (EBM) – Diagram, Working, Advantages. In: *LearnMech* [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://learnmech.com/electron-beam-machining-ebm-advantages-disadvantages/>
  49. Obrábění elektronovým paprskem. In: *ELUC* [online]. [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1421>
  50. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění II: obrábění laserem, plazmou, ultrazvukem, elektronovým, iontovým a vodním paprskem.* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3944-8.
  51. ALLEN, D.M., P. SHORE, R.W. EVANS, C. FANARA, W. O'BRIEN, S. MARSON a W. O'NEILL. Ion beam, focused ion beam, and plasma discharge machining. *CIRP Annals.* 2009, 58(2), 647-662. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.007>
  52. KUMAR, Abhinav, Manjesh KUMAR, Anupam ALOK, H.N.S YADAV a Manas DAS. Fabrication of microtool for micromachining: A review: A review. *Materials Today: Proceedings.* 2021, 47, 3911-3918. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.592>
  53. PLICHTA, Vratislav. *Obrábění iontovým paprskem* [online]. In: . 5. listopad 2014 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/obrabeni-iontovym-paprskem\\_27769.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/obrabeni-iontovym-paprskem_27769.html)
  54. JÄGER, Aleš. *Mikroobrábění fokusovaným iontovým svazkem* [online]. In: . 8.9.2017 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/aktuality/mikroobrabeni-fokusovanim-iontovym-svazkem>
  55. YAO, Nan. *Focused Ion Beam System—a Multifunctional Tool for Nanotechnology.* 2005/01/01, s. 247-286. Dostupné z: doi:10.1007/1-4020-8006-9\_9
  56. MOURALOVA, K., J. BEDNAR, L. BENES, P. HRABEC, M. KALIVODA a J. FRIES. *The analysis of EDM electrodes wear in corners and edges.* *Archives of Civil and Mechanical Engineering.* 2020, 20(4), 130. ISSN 1644-9665. Dostupné z: doi:10.1007/s43452-020-00137-8
  57. MOURALOVA, Katerina, Libor BENES, Josef BEDNAR, Radim ZAHRADNICEK, Tomas PROKES a Jiří FRIES. Analysis of Machinability and Crack Occurrence of Steels 1.2363 and 1.2343ESR Machined by Die-Sinking EDM. *Mdpi* [online]. 19.4.2020 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2079-6412/10/4/406/htm>
-

- 
58. MOURALOVA, Katerina, Josef BEDNAR, Libor BENEŠ, Tomas PLICHTA, Tomas PROKES a Jiri FRIES. *Production of precision slots in copper foil using micro EDM. Scientific Reports*. 2022/03/23, 12, 5023. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-022-08957-9
  59. MAŇÁK, Jan. *Dotazy k FIB – diplomová práce VUT Brno* [elektronická pošta]. Message to: havlinova.denisa@gmail.com. 9. května 2022 10:00 [2022-14-05]. Osobní komunikace.
  60. KOPEČEK, Jaromír. *Dotazy k FIB – diplomová práce VUT Brno* [elektronická pošta]. Message to: havlinova.denisa@gmail.com. 13. května 2022 15:30 [2022-14-05]. Osobní komunikace.
  61. RIEDEL, Jiří. Chemické frézování přesné leptání kovových materiálů. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2.2011 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:5157/chemicke-frezovani-presne-leptani-kovovych-materialu>
  62. CAKIR, O. Copper etching with cupric chloride and regeneration of waste etchant. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, 175(1), 63-68. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.024>
  63. CHOI, Tae-Seop a Dennis W. HESS. Chemical Etching and Patterning of Copper, Silver, and Gold Films at Low Temperatures. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. The Electrochemical Society, 2014, 4(1), N3084-N3093. ISSN 2162-8769. Dostupné z: doi:10.1149/2.0111501jss
  64. MIKELL P. GROOVER. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems. 4th ed.* Hoboken, NJ: J. Wiley, 2010. ISBN 0470467002.
  65. Jak funguje laser: Princip laseru. *ČEZ* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
  66. Jak funguje laser: Typy laserů. In: *ČEZ* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
  67. Laserové řezání jako bezkontaktní proces oddělování. In: *TRUMPF* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/reseni/pouziti/laserove-rezani/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/laserove-rezani/)
  68. Laser Cut Quality Guide. *Precision Technologies* [online]. Minnesota [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.mate.com/technical-resources/tips-techniques/laser-cut-quality-guide/>
  69. Cutting Reflective Metals – Overcoming Issues with Laser Cutting. In: *Charles Day* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.daysteel.co.uk/news/cutting-reflective-metals-overcoming-issues-laser-cutting/>
  70. Laser Cut Copper Edge. In: *Cutting Technologies LTD* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.cut-tec.co.uk/blog/post/laser-cut-copper-edge/#.YoTW5qhBw2w>
  71. PERLA® 100: Tenkodiskový laserový systém. In: *Hilase* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.hilase.cz/produkty/perla-100/>
  72. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technologie: Advanced methods of material removal*. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
-

- 
73. Electron Beam Machining. In: *Mechanical E-notes* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://mechanicalenotes.com/electron-beam-machining/>
  74. M2 Factor (Quality Factor). *Scitec Instruments Ltd* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: [https://scitec.uk.com/lasers/m2\\_factor.php](https://scitec.uk.com/lasers/m2_factor.php)
  75. TEM sample of a nickel super alloy material being prepared by FIB milling. *Thermofisher* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/cz/en/home/electron-microscopy/products/dualbeam-fib-sem-microscopes.html>
  76. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
  77. KAŠPAR, JAN. Laserové řezání: volba a vlastnosti asistenčních plynů. In: *Technický týdeník* [online]. MESSER TECHNOGAS S. R. O., 10. prosinec 2014 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/laserove-rezani-volba-a-vlastnosti-asistencnich-plynu\\_28272.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/laserove-rezani-volba-a-vlastnosti-asistencnich-plynu_28272.html)
  78. RIVEIRO, A., F. QUINTERO, F. LUSQUIÑOS, R. COMESAÑA, J. DEL VAL a J. POU. *The Role of the Assist Gas Nature in Laser Cutting of Aluminum Alloys*. *Physics Procedia*. 2011, 12, 548-554. ISSN 1875-3892. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.069](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.069)
  79. OL 750 AUTOMATED SPECTRORADIOMETRIC MEASUREMENT SYSTEM. In: *Optronics Laboratories* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://optronicslabs.com/products/spectroradiometers/ol-750-automated-spectroradiometric-measurement-system/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Symboly

| Označení  | Legenda   | Jednotka          |
|-----------|---|-------------------|
| $R_a$     | drsnot povrchu                                  | [ $\mu\text{m}$ ] |
| $i_p$     | proud   | [A]               |
| $t_p$     | trvání pulzu                                    | [ $\mu\text{s}$ ] |
| $M^2$     | Kvalita laserového paprsku, Factor beam quality | [-]               |
| $F_e$     | Leptací faktor                                  | [-]               |
| $h$       | Hloubka leptání                                 | [mm]              |
| $u$       | podleptání                                      | [mm]              |
| $\lambda$ | vlnová délka                                    | [m]               |
| $N_s$     | Náklady na strojní práci                        | [Kč]              |
| $t_{AS}$  | Jednotkový čas strojní                          | [min]             |
| $N_{sm}$  | Nákladny na minutu strojní práce                | [Kč]              |

### Zkratky

| Označení | Legenda  |
|----------|--|
| EDM      | Elektroerozivní obrábění, Electrical Discharge Machining             |
| MEDM     | Mikro-elektroerozivní obrábění, Micro-Electrical Discharge Machining |
| SEDM     | Elektroerozivní hloubení, Sinking Electrical Discharge Machining     |
| WEDM     | Elektroerozivní drátové řezání, Wire Electrical Discharge Machining  |
| EDG      | Elektroerozivní broušení, Electrical Discharge Grinding              |
| R        | Odpor, resistance  |
| CIRP     | College International pour la Recherche en Productique               |
| MRR      | Rychlost úběru materiálu, Material removal rate                      |
| RC-RLC   | Relaxační generátory   |
| M        | Motor  |
| G        | Generátor  |
| C        | Kondenzátor, Capacitor   |
| D        | Dioda, Diod  |
| E        | Stejnoseměrný zdroj napětí, Direct current voltage                   |
| YAG      | Yttrito-hlinitý granát, Yttrium-aluminium-granat                     |
| PCM      | Fotochemické obrábění, Photochemical machining                       |
| LEEP     | Laserem vyvinutý proces leptání, Laser Evolved Etching Process       |
| LDI      | Přímé laserové zobrazení, Laser Direct Imaging                       |
| EBM      | Obrábění elektronovým paprskem, Electron Beam Machining              |
| IBM      | Obrábění iontovým paprskem, Ion Beam Machining                       |
| PVD      | Fyzikální depozice par, Physical vapour deposition                   |
| IP       | Iontové plátování, Ion plating                                       |
| IBAD     | Nanášení pomocí iontového paprsku, Ion beam assisted depositon       |
| FIB      | Fokuzovaný iontový paprsek, Focused Ion Beam                         |
| LMIS     | Zdroje iontů tekutých kovů, Liquid Metal Ion Sources                 |
| SEM      | Rastrovací elektronový mikroskop, Scanning Electron Microscope       |

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1 Materiálový list SLM materiálu IN 939

### **Seznam výkresů**

Clona se stěrbinou, 2022-DP-182603-01