



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**STANOVENÍ STUPNĚ VTAŽENÍ ZINKOVÉ  
POVRCHOVÉ VRSTVY DO HRANY SOUČÁSTKY  
V ZÁVISLOSTI NA POUŽITÉ TECHNOLOGII  
VÝROBY – LASEROVÉ ŘEZÁNÍ, VYSEKÁVÁNÍ**

DETERMINATION OF SIZE PENETRATION OF THE ZINC SURFACE LAYER TO THE EDGE  
OF THE PART IN DEPENDENCE ON USED TECHNOLOGY OF PRODUCTION – LASER  
CUTTING, PUNCHING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. MARTIN KLAZAR**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**doc. RNDr. LIBOR MRŇA Ph.D.**

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Martin Klazar

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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:

**Stanovení stupně vtažení zinkové povrchové vrstvy do hrany součástky v závislosti na použité technologii výroby - laserové řezání, vysekávání**

v anglickém jazyce:

**Determinantion of size penetration of the zinc surface layer to the edge of part in dependence on use technology of production - laser cutting, punching**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V sériové produkci se k výrobě dílů používají ocelové plechy s ochrannou zinkovou vrstvou. Při vytváření součástky dochází k částečnému vtažení této zinkové vrstvy do hrany dílu. Míra vtažení bude záviset na výrobní technologii. Cílem práce bude experimentálně prozkoumat a porovnat velikost zavlečení zinkové vrstvy pro dvě nejběžnější výrobní technologie - laserové dělení a vysekávání. Pro studium bude nutné využít metod elektronové mikroskopie a dalších analytických metod. Na míře vtažení zinku do hrany závisí korozivzdornost výsledného dílu.

Cíle diplomové práce:

Seznámení se s možnostmi technologie laserového dělení a technologií vysekávání dílů na CNC strojích.

Seznámení se s možnostmi a metodikou vhodných analytických metod pro požadované testy.

Na základě analýzy vypracovat doporučení vhodné technologie z hlediska korozivzdornosti hrany.

Seznam odborné literatury:

1. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technologie, 1. vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
2. TURŇA M., Špeciálne metódy zvarovania, ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9
3. MOHYLA, M. Technologie povrchových úprav kovů. 3. vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava. 2006. 156s. ISBN 80-248-1217-7.
4. SEDLÁČEK, V. Povrchy a povlaky kovů. 1. vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT Praha. 1992. 176s. ISBN 80-01-00799-5.
5. PODJUKLOVÁ, J. Speciální technologie povrchových úprav I. 1. vyd. Ostrava: Ediční středisko VŠB Ostrava. 1994. 76s. ISBN 80-7078-235-8
6. KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 2.11.2012

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

**KLAZAR Martin:** Stanovení stupně vtažení zinkové povrchové vrstvy do hrany součástky v závislosti na použité technologii výroby – laserové řezání, vysekávání.

---

Projekt vypracovaný v rámci inženýrského studia oboru M-STG Strojírenská technologie předkládá analytické hodnocení řezné plochy plechu u dvou nejpoužívanějších moderních technologií dělení, kterými jsou dělení laserovým paprskem a přesné vysekávání. Hodnocení této plochy bylo především zaměřeno na stupeň vtažení povrchové zinkové vrstvy plechu do oblasti řezu. Za pomoci moderních metod elektronové mikroskopie pak byly tyto hodnoty vtažení pro jednotlivé technologie určeny. Samotné analýze však předcházela literární studie jednotlivých částí do tohoto experimentu vstupujících.

Klíčová slova: pokovování, dělení materiálu, plech, elektronová mikroskopie

## **ABSTRACT**

**KLAZAR Martin:** Determination of size penetration of the zinc surface layer to the edge of a part in dependence on use technology of production – laser cutting, punching.

---

The project, developed under the terms of engineering studies of the M-STG Manufacturing Technology branch, presents the analytical assessment of the cutting surface of the metal sheet by two most commonly used modern technologies of cutting, which is the laser beam division and the exact cutting. The evaluation of this area was mainly focused on the level of the penetration of the zinc surface layer in the area of the given cutting. With the help of modern methods of electron microscopy, these values of penetration were then established for each technology. The analysis itself was preceded by literary studies of all individual parts participating in this experiment.

Key words: metal plating, material cutting, sheet of tin, electron microscopy

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KLAZAR, Martin. *Stanovení stupně vtažení zinkové povrchové vrstvy do hrany součástky v závislosti na použité technologii výroby - laserové řezání, vysekávání*. Brno, 2014.57s, 4 přílohy, CD, Diplomová práce Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D..

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 28.5.2014

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu doc.RNDr.Liboru Mrňovi Ph.D za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Tato práce vznikla za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017) "ALISI - Centrum pokročilých diagnostických metod a technologií" a tento je dále podpořen z Národního programu udržitelnosti I.- NPU I (LO1212), jehož cílem je podpora výzkumu, experimentálního vývoje a inovací z veřejných prostředků.

## Obsah

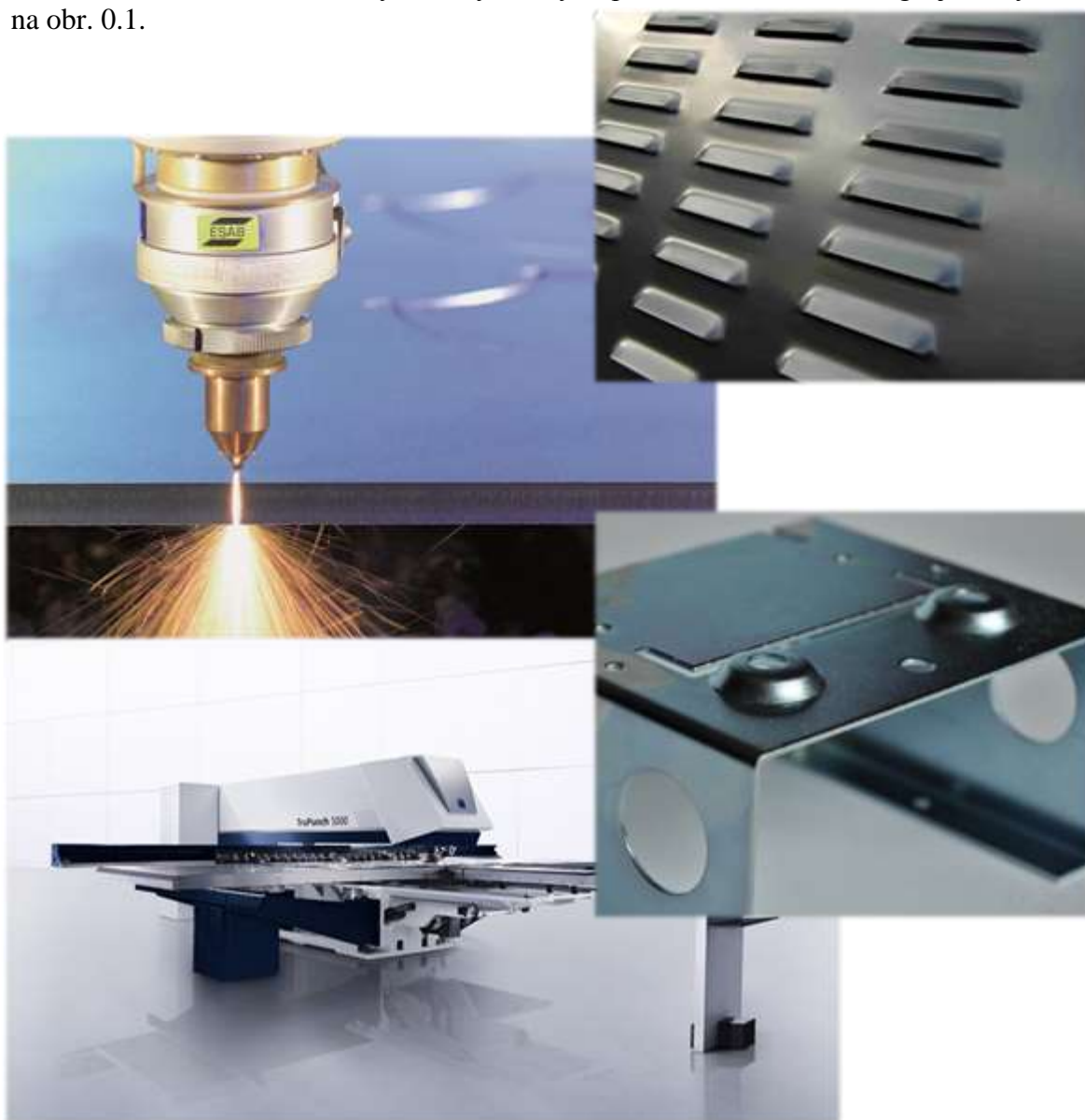
Zadání	
Abstrakt a bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Úvod	
1 Rozbor stávajícího problému .....	11
1.1 Úvod do zpracování plechů .....	11
2 Laser.....	14
2.1 Rozdělení laserů .....	15
2.2 Druhy laserů v technické praxi .....	16
2.3 Uplatnění laseru v průmyslu.....	19
2.3.1 Řezání laserovým paprskem .....	20
2.3.2 Ostatní laserové technologie .....	21
3 Vysekávání.....	26
3.1 Princip přesného vysekávání .....	27
4 Zinkování .....	28
4.1 Galvanické zinkování .....	28
4.2 Žárové zinkování .....	29
4.3 Měření tloušťky zinkové vrstvy .....	32
5 Použité analytické metody .....	33
5.1 Elektronová mikroskopie.....	33
5.2 Rastrovací elektronový mikroskop SEM.....	34
5.3 Transmisní elektronový mikroskop TEM .....	35
5.4 Energiově-Disperzní mikroanalýza EDX.....	36
6 Použité stroje.....	37
6.1 Laser AMADA FO 3015/4kW .....	37
6.2 Vysekávací stroj TruPunch-5000 .....	38
7 Vyhodnocení vtažení zinkové vrstvy do oblastí řezu .....	39
7.1 Vyhodnocení řezné plochy pomocí SEM.....	39
7.2 Vyhodnocení řezné plochy pomocí analýzy EDX .....	44
7.3 Vyhodnocení tloušťky vtažené zinkové vrstvy .....	53
8 Technicko-ekonomické zhodnocení .....	55
Závěr .....	57
Seznam použité literatury	
Seznam použitých zkratk a symbolů	
Seznam obrázků a tabulek	
Seznam příloh	

## ÚVOD

Strojírenská technologie je jedním z nejdéle rozvíjejících se oborů a v dnešní době lze dokonce říci, že je ve vyspělých zemích všudypřítomná. Rychlost tohoto rozvoje závisí hlavně na rozvoji a modernizaci jednotlivých technologií. Neméně důležitý je rozvoj samotných materiálů využívaných ve výrobě.

Jednou skupinou velmi důležitých technologií je technologie dělení materiálu. Lze říci, že se jedná o nejzákladnější technologii ve strojírenské výrobě, která prochází v posledních letech velmi výrazným rozvojem a modernizací. Jsou čím dále tím více používány moderní technologie dělení materiálu, kdy je zvyšována přesnost dělených dílů, jejich kvalita a rychlost této výroby.

Neméně důležitým vývojem procházejí i materiály ve strojírenství používané. Zvláště důležitou skupinou jsou materiály typu plech. Tato skupina materiálů může být označena jako jedna z nejvíce používaných a proto je jejich rozvoj velmi důležitý. Příklad moderních způsobů dělení materiálu a ukázky dílů vyrobených pomocí těchto technologií jsou vyobrazeny na obr. 0.1.



Obr. 0.1 Moderní technologie dělení a ukázky použití těchto technologií. [11] [28] [38]

## 1 Rozbor stávajícího problému

Vzhledem k faktu že u většiny dílů je požadována menší či větší korozní odolnost, je nutno zajistit aby tyto ocelové materiály byly nějakým způsobem chráněny. V dnešní době přichází tak na řadu různé druhy povrchových úprav. Jako nejčastější a nejpoužívanější základní protikorozní ochrana je nanášení povrchových vrstev z materiálů korozi odolávajících, z nichž nejvíce rozšířenou je zinkování. Zinkováním jakožto jednou z velmi účinných ochran tak bývají opatřeny již základní polotovary, zejména pak plechy. Při dalším zpracování plechů pak dochází k dalšímu dělení těchto polotovarů a tím k narušení této povrchové, ochranné vrstvy v místě řezu materiálu. Tím je narušena i korozní odolnost výsledných dílů.

V moderní strojírenské výrobě je k dělení plechů a výrobě plechových dílů využíváno dvou technologií přesného dělení, kterými jsou řezání svazkem laserového záření a přesné vysekávání. V souvislosti s těmito technologiemi byla vznesena myšlenka, zdali nedojde k částečnému vtažení zinkové vrstvy do oblasti řezu a tím nedojde ke zvýšení korozní odolnosti finálních dílů. Pro zjištění daného problému a jeho vyhodnocení však je nutno rozebrat a porozumět jednotlivým technologiím a částem výrobního a vyhodnocovacího procesu. Jednotlivými částmi jsou: plechy jako výchozí materiál, laserové technologie, technologie přesného vysekávání a technologie pro analýzu řešeného problému.

### 1.1 Úvod do zpracování plechů [26]

Plech je jeden z hojně využívaných polotovarů ve strojírenské výrobě. Může být definován jako plochá deska kovu, která je vyráběna tvářecími technologiemi. Základními z nich pak jsou kování, tažení a válcování. Největší zastoupení má plech ocelový. Pro aplikace kde není ocelový plech vhodný, je využito dalších materiálů, jako je měď, mosaz, hliník, titan a dalších. Je tedy zřejmé, že plech má předpoklad být využíván coby polotovar k výrobě širokého spektra dílů. Tyto díly pak můžeme rozdělit do dvou základních kategorií, ke kterým přísluší i základní technologie výroby.

- **Plechové díly plošné** – jedná se většinou o jednoduché nebo méně složité díly. K jejich výrobě je využíváno technologií plošného tváření nebo dělení. Jako základní technologie lze uvést následující:
  - **Stříhání** – je jednou z velmi používaných tvářecích technologií. Využívá se jak k přípravě polotovarů, tak i k vystříhování samotných finálních dílů. Stříhání rozdělujeme na stříhání za tepla a za studena. Všechny stříhací technologie však vycházejí ze vzájemné interakce děleného materiálu a dvou protilehlých střížných hran, které způsobí ve střížné rovině smykové napětí. Jako základní technologie stříhání můžeme uvést následující: vystříhování, děrování, ostříhování, přistříhování a mnohé další.
  - **Přesné vysekávání** – jedná se o technologii vycházející z klasického stříhání, kdy střížník vysekává daný tvar proti matici, střížníku náležející. Oba tyto komponenty jsou vedeny CNC vysekávacím strojem dle daného programu. Tato problematika je podrobněji rozepsána v kapitole 3
  - **Řezání** – do okruhu řezání je možno zařadit mnoho druhů technologií ať již kontaktních jako jsou různé druhy pil, nebo technologie využívající k dělení materiálu různých řezných kotoučů. Nebo technologie bezkontaktní jakými jsou například dělení plamenem, dělení pomocí vodního paprsku a další.

- Řezání laserem – velice specifický druh patřící do kategorie řezání. Je to velice přesná technologie dělení materiálu za použití svazku laserového záření. Tato problematika je podrobněji rozepsána v kapitole 2.3.1
  - Řezání plasmou – je další z řezacích technologií, kde dělení materiálu je realizováno prostřednictvím vysokoteplotního plazmového paprsku
- **Plechové díly prostorové** – jedná se o složitější plechové díly. Jako polotovary pro ně zpravidla slouží plechový díl plošný, který je následně méně či více, za tepla nebo za studena formován do finálního tvaru. Základními operacemi pro výrobu dílu tohoto typu jsou:



Obr. 1.1 Příklad ohýbaného dílu [28]

- Ohýbání – technologie, při které dochází k trvalé, plastické deformaci materiálu. Materiál je ohýbán v různých úhlech a s různou velikostí zaoblení hrany. Ohýbanou součástí je tak možné prezentovat jako součást rozvinutelného tvaru. Finální díl je pak nazýván ohybkem (Obr.1.1). Ohýbací nástroj se pak skládá ze dvou základ-

ních součástí, kterými jsou ohybník a ohybnice.

- Tažení – je proces, při kterém je z plošného dílu za pomoci jedné či několika tažných operací, vytvořen prostorový díl, neboli také výlisek (Obr.1.2), na rozdíl od ohýbání, nerozvinutelného tvaru. Nástrojem je v tomto případě tažidlo, které se skládá ze dvou základních dílů, kterými jsou tažník a tažnice.



Obr. 1.2 Příklad taženého dílu [13]

Samotné plechy, které mohou být využívány pro výrobu dílů je možno dělit následovně:

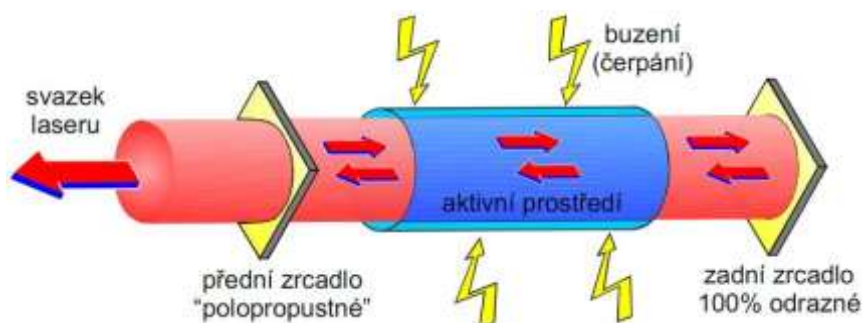
- **Ocelový plech válcovaný za studena** – je plech z oceli třídy 10 až 16 a 19, válcovaných na válcovacích strojích při okolní teplotě. Tloušťka plechu válcovaného za studena bývá nejčastěji do 4 milimetrů. Tyto stroje jsou nejčastěji čtyř nebo pětistolicové. Při válcování za studena je nutno válcovat takovým způsobem, aby bylo dosaženo rovnoměrné struktury materiálu, přesného tvaru, rozměrů a vysoké kvality povrchu. Válcované plechy jsou vyráběny buď jako svitky, pásy nebo tabule.
- **Ocelový plech válcovaný za tepla** – plechy jsou válcovány na širokopásmové trati při teplotě přibližně 1100°C. Plechy válcované za tepla mohou být děleny na tenké (1,5-4mm) a tlusté (5-120mm). Pro výrobu těchto plechů je použito oceli třídy 10 až 16 a oceli třídy 19. Válcovací trať musí být vybavena technologií válcování, doválcování a režimem řízeného ochlazování. Při válcování za tepla musí být dosaženo rovnoměrné struktury materiálu s přesným tvarem, rozměry a kvalitou povrchu. Válcované plechy jsou vyráběny stejně jako oceli válcované za studena buď jako svitky, pásy nebo tabule.
- **Pozinkovaný plech** – ochrana plechu zinkováním se provádí z důvodu zvýšení korozní odolnosti. Zinkový povlak vytváří s ocelovým podkladem elektrický člunek. Zinkování se provádí buď elektrolyticky, nebo žárově. Podrobněji je tato problematika rozepsána v kapitole 4.
- **Pocínované plechy** – cínování plechů se provádí nejčastěji elektrolyticky. Plechy s povrchovou vrstvou cínu jsou nejčastěji využity v potravinářském průmyslu, kdy cín na rozdíl od zinkovaného plechu nereaguje s potravinami. Dále se také využívá v elektrotechnickém průmyslu jako plech pro výrobu transformátorů a rozvaděčů.

- **Plech nerezový** – plechy nejčastěji z oceli třídy 17. Obsahuje 10,5 až 30 % chromu a vyrábějí se nejčastěji válcováním za studena. Nerezové plechy musí vykazovat vysokou odolnost proti korozi za zvýšených teplot v náročných podmínkách. Proto jsou velmi často používány v automobilním, chemickém a potravinářském průmyslu.
- **Plech hliníkový** – základním složením plechu s ohledem na účel použití je 99,5 % hliníku. Na nelakovaném hliníkovém povrchu se vytváří vrstva oxidu hlinitého, která zabraňuje další korozi. Průmyslové zpracování však využívá povlakovaných povrchů a to buď eloxovaných, nebo povlakovaných organicky. Plechy z hliníku a jeho slitin jsou velmi často pro své vlastnosti, využívány v leteckém, elektrotechnickém či potravinářském průmyslu.
- **Plech měděný** – jsou plechy vyznačující se především velmi dobrou protikorozní odolností, což jim zaručuje velmi dlouhou životnost. Na jeho povrchu se vytváří reakcí na vzduchu uhličitán měďnatý neboli měděnka, která brání další korozi materiálu. Měděný plech je velmi dobře zpracovatelný a nachází uplatnění ve všech odvětvích průmyslové výroby jako je elektrotechnika, chemický a chladírenský průmysl, potravinářský průmysl, výroba střešních krytin či teplovodné rozvody domů.
- **Plech mosazný** – je materiál s dobrou tvařitelností za studena., proto je velmi často využíván k operacím tažení, ohýbání či lisování. Mosaz má nižší odolnost proti korozi při srovnání s mědí. Použití je nejčastější v elektrotechnice a pro svoje vzhledové vlastnosti je velmi vhodná k dekorativním účelům.
- **Ostatní plechy** - do této kategorie je možno zařadit všechny ostatní netypické plechy jako jsou plechy trapézové, děrované, dekorované, bimetalové, potahované, plechy z netypických materiálů a další.

## 2 Laser [19] [24] [25]

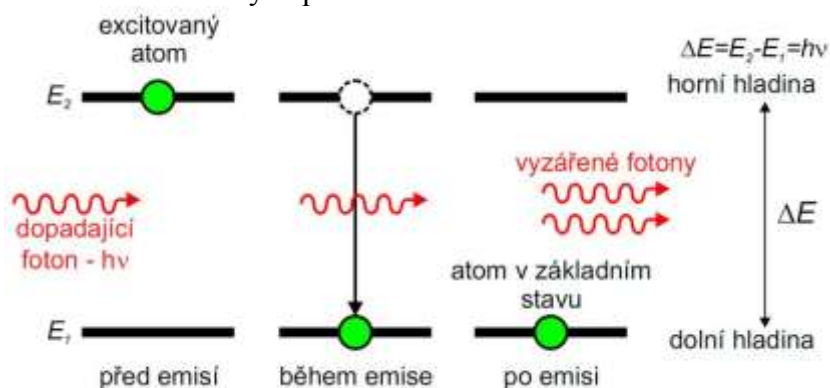
Objev laseru byl jeden ze zásadních mezníků ve vědě a technice. Tímto objevem byl získán zdroj světla s vlastnostmi, kterých nebylo možno do té doby dosáhnout. Za hlavní znaky laserového paprsku považujeme koherentnost (uspořádanost), monochromaticnost (jednobarvnost) paprsku, který disponuje velmi malou divergencí (rozbíhavostí). Název vzniknul jako zkratka z anglického „*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*“.

Základními prvky laseru jsou jeho aktivní prostředí a tzv. optický rezonátor. Toto aktivní prostředí je buzeno, čímž dodáváme do laseru energii, která je následně díky procesu stimulované emise vyzářena jako laserový paprsek. Optický rezonátor (Obr.2.1) je obvykle tvořen dvěma zrcadly, odrazným a polopropustným.



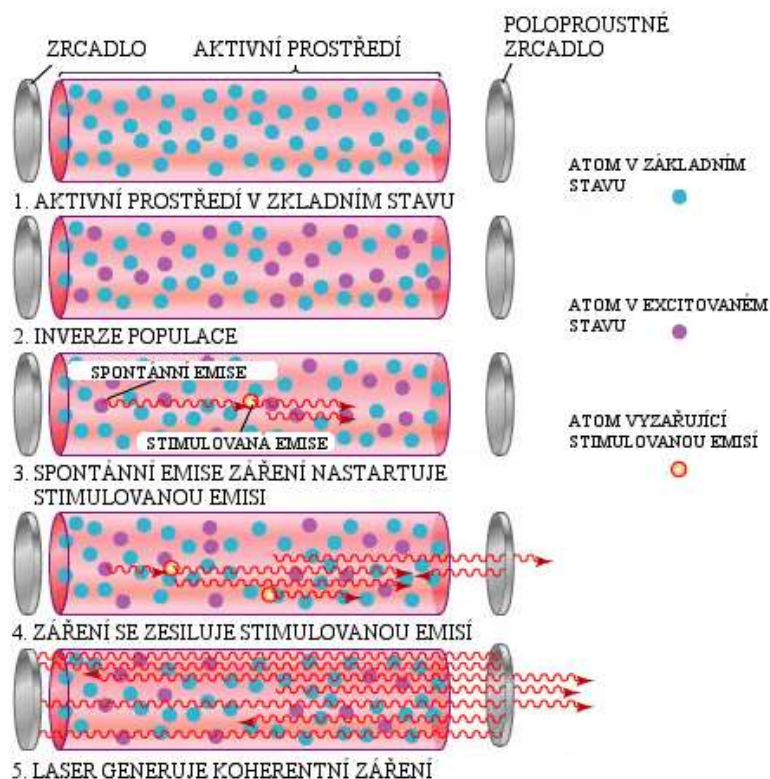
Obr. 2.1 Schematicky znázorněný optický rezonátor [24]

Přeměnu energie, kterou dodáváme, do aktivního prostředí a přeměnění se na laserový paprsek, můžeme popsat následovně. Aktivní prostředí obsahuje nejčastěji atom, který se nachází buď ve stavu základním s nižší energií, nebo ve stavu s energií vyšší, excitovaném. Pokud tento atom přechází z vyššího energetického stavu do nižšího, pak při tom dochází k vyzáření fotonu. Tento jev probíhá samovolně, kdy prostředí přechází na stav s co nejnižší energií. Buzením je tento stav porušen a prostředí je převedeno do vybuzeného (excitovaného) stavu, čímž dochází k přesunu atomů do vyšší energetické hladiny. Následně může dojít k přeměně energie dodané aktivnímu prostředí na laserový svazek. Ve své podstatě jde o lavinový efekt, kdy foton dopadá na vybuzený atom, a tím dochází k jeho stimulaci, což způsobí jeho přechod z vyšší energetické hladiny do nižší. Při tomto přechodu dochází k emitaci dalšího fotonu. Tento efekt se nazývá proces stimulované emise viz. obr 2.2.



Obr. 2.2 Proces stimulované emise [24]

Pomocí optického rezonátoru jsou fotony odraženy zpět do aktivního prostředí, kde jejich počet narůstá a dochází k vyzáření energie jako laserového paprsku (proud fotonů),(Obr. 2.3).



Obr. 2.3 Základní princip Laseru [24]

## 2.1 Rozdělení laserů

Dlouhým vývojem laserových technologií byla získána celá řada jejich různých typů. Ty se od sebe navzájem liší jejich vlastnostmi, kterými jsou předurčeny pro různé využití v praxi.

Nejčastěji se používá rozdělení dle následujících hledisek:

- dle aktivního prostředí:
  - pevnolátkové
  - kapalinové
  - plynové
- dle energie buzení aktivního materiálu:
  - optické
  - elektrické
  - chemické
- dle režimu práce:
  - spojitě
  - impulsní
- dle vyzářované vlnové délky:
  - submilimetrové
  - infračervené
  - v oblasti viditelného světla
  - ultrafialové
  - rentgenové

## 2.2 Druhy laserů v technické praxi [19] [24] [25] [33] [37]

V dnešní strojírenské praxi jsou nejvíce zastoupeny lasery s aktivním prostředím plyným a pevnolátkovým. Ve strojírenské výrobě je laserového paprsku použito k celé řadě výrobních aplikací a to díky svým výhodám, kterými jsou:

- vysoká přesnost
- lokální ohřev materiálu – velmi malá tepelně ovlivněná oblast
- vysoká pracovní rychlost, která zpravidla převyšuje konvenční metody obrábění
- obrábění bez kontaktu s materiálem
- flexibilita – při použití jednoho nástroje je možno vyrábět široké spektrum výrobků

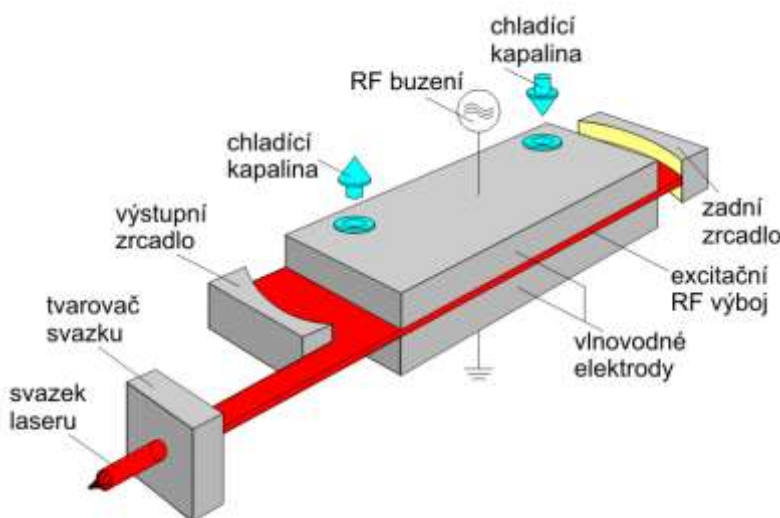
### ▪ Plynový laser

Plynové lasery jsou jedny z nejstarších typů laserů. Aktivním prostředím je plyn či jejich směs, kterých je možno získat široké spektrum. V průmyslové praxi se nejvíce však užívají lasery, které mají za aktivní prostředí oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ , a jsou jedny z nejvýkonnějších laserů. Jsou nejčastěji buzeny radio-frekvenčně (RF), případně elektrickým výbojem (DC). Dále se dělí dle uzavřenosti rezonátoru, na lasery s hermeticky uzavřeným rezonátorem a na lasery tzv. průtočné, u kterých plyn skrze rezonátor neustále proudí (toto je nutné při vysokých výkonech  $\sim 10$  kW).

Při výkonech do 5 kW se nejčastěji využívají DC RF  $\text{CO}_2$  lasery (RF buzené a difuzně chlazené) viz. obr. 2.4. Buzení aktivního prostředí se provádí za pomoci radio-frekvenčního vlnění mezi dvěma deskovými elektrodami, které díky velké ploše zajišťují i difuzní chlazení aktivního plynu v rezonátoru. Tento typ laserů se vyznačuje dlouhou životností, vysokou spolehlivostí a nízkými náklady na provoz.

$\text{CO}_2$  lasery emitují záření o vlnové délce  $10,6 \mu\text{m}$ , které nelze vést optickým vláknem. Pro vedení svazku se používá zrcadel, což přináší velké nevýhody. Optická dráha se tak stává složitější a je nutno ji kalibrovat. Velké nároky jsou také kladeny na čistotu zrcadel a jejich údržbu.

Tyto lasery se používají v aplikacích u kterých nelze využít paprsek s vlnovou délkou  $1 \mu\text{m}$ , jako jsou řezání nekovových materiálů (papír, kůže sklo atd.), gravírování značení. Při těchto operacích se používají výkony laserů do 1,5 kW. Při řezání a svařování kovových materiálů mají lasery výkon až do 20 kW.



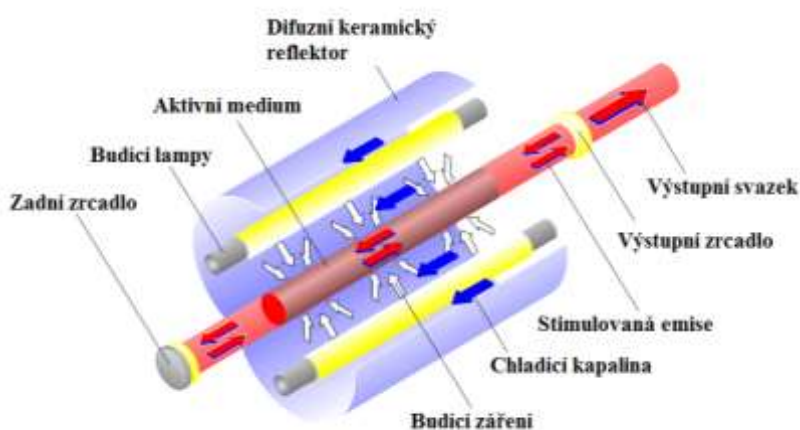
Obr. 2.4 Schéma plynového  $\text{CO}_2$  Laseru [24]

### ▪ Pevnolátkový laser

Za pevnolátkové, můžeme označit takové lasery, které mají jako aktivní prostředí dielektrickou, pevnou, opticky propustnou látku která je nejčastěji monokrystalická. Tato základní matrice, která má velký podíl na vlastnostech laseru musí být opticky homogenní, průzračná a musí jí být možno vyrábět uměle. Buzení aktivního prostředí se provádí nejčastěji opticky a za pomoci výbojek nebo laserových diod. Typ aktivního prostředí je určující pro parametry laseru. Dle aktivního prostředí mohou být určeny základní typy laseru, kterými jsou:

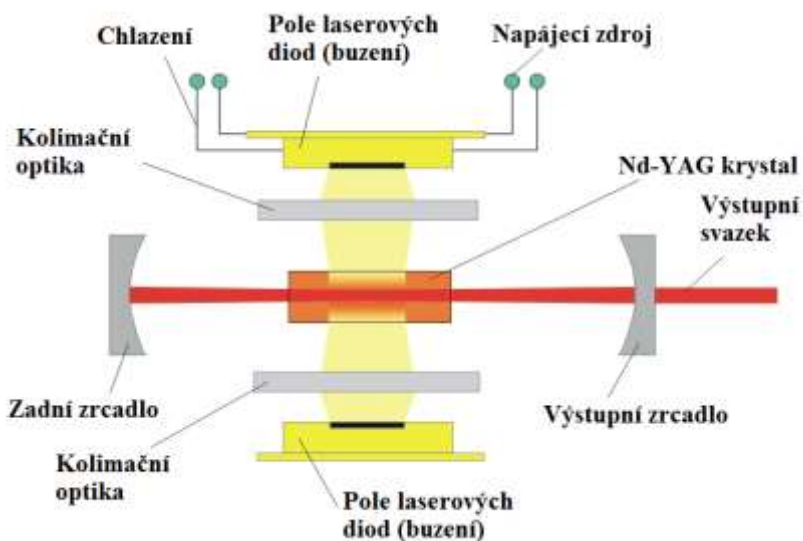
- **Rubínový laser:** byl prvním zkonstruovaným laserem. Jako aktivní prostředí zde je využit krystal rubínu. Tento krystal umožňuje generovat záření s vlnovou délkou  $0,6943 \mu\text{m}$ . Tento laser se nejčastěji používá v pulzním režimu. Rubínový laser je využíván například pro vrtání do tvrdých materiálů. Používá se však i v lékařství, dermatologii nebo při laserové lokaci družic. V dnešní době je velmi často nahrazován Nd:YAG laserem.
- **Nd-YAG laser:** byl jako první z laserů zařazen do průmyslové výroby. V dnešní době se jedná o jeden z nejpoužívanějších pevnolátkových laserů. Tyto typy laserů se ve strojírenské výrobě používají nejčastěji ke svařování, řezání nebo vrtání. Při pokojové teplotě je jeho vlnová délka  $1,06 \mu\text{m}$ . Za použití nelineární optiky je možnost měnit vlnovou délku záření na  $0,532 \mu\text{m}$ ,  $0,35 \mu\text{m}$  nebo  $0,266 \mu\text{m}$ . Aktivní prostředí, kterým je v tomto případě krystal yttrium-aluminiového granátu dopovaného neodymem, je buzeno buď výbojkami (LPSS- lamp pumped solid state) viz obr.2.5, nebo laserovými diodami (DPSS. diode pumped solid state).

Lasery buzené výbojkami se v dnešní době využívají nejčastěji v pulsním režimu a to při aplikacích jako jsou svařování a vrtání. Technologie vyniká vysokou energií pulsu (až  $100 \text{ J/ms}$ ), která je při těchto operacích vyžadována. Za nevýhodu této technologie je považována nízká účinnost a značné nároky na chlazení laseru s ním spojené. Neboť velká část energie vydaná výbojkou je nevyužita a přeměněna na teplo. Jako další nevýhody je nutno uvést krátkou životnost výbojek a vysoké náklady na provoz.



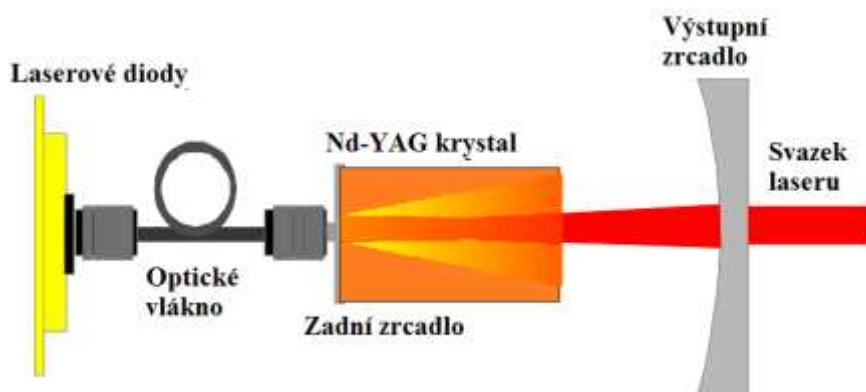
Obr. 2.5 Schéma pevnolátkového Nd-YAG laseru [24]

U laserů buzených laserovými diodami rozlišujeme dva základní typy buzení. Toto buzení je rozděleno dle uspořádání rezonátoru na boční buzení viz. obr. 2.6.



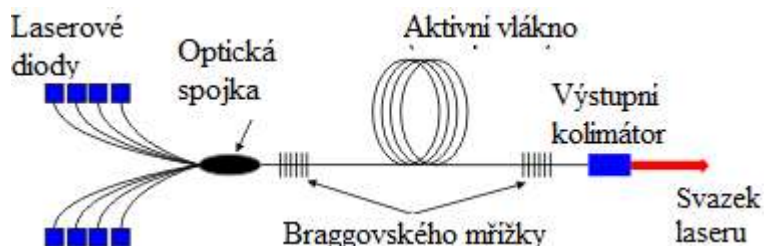
Obr. 2.6 Rezonátor s bočním buzením [24]

a zadní buzení viz. obr. 2.7. Lasery se zadním buzením mají budící impuls vedený z laserových diod k aktivnímu krystalu za pomoci optického vlákna. Což umožňuje umístění diod externě od rezonátoru. Při zadním buzení se dosahuje oproti buzení bočnímu kvalitnějšího laserového svazku, za cenu nižších výkonů. Boční buzení má svazek laseru horší kvality, ale je možno dosahovat vyšších výkonů.



Obr. 2.7 Rezonátor se zadním buzením [24]

- **Vláknový laser:** je technologicky nejvyspělejším typem pevnolátkového laseru. Princip vláknového laseru viz obr. 2.8. Aktivním prostředím je zde několik metrů dlouhé, křemíkové optické vlákno, které má v průměru několik mikrometrů. Tyto vlákna bývají dopována prvky vzácných zemin, které se přidávají během výroby, ve formě velmi malých částic. Nejpoužívanějšími prvky jsou ytterbium, erbium a neodym. K buzení aktivního pro-



Obr. 2.8 Schéma vláknového laseru [24]

středí je použito laserových diod, do optického vlákna je vedeno přes optickou spojku. Místo rezonátorových zrcadel je u tohoto typu laseru použito Braggovského mřížek. Tyto mřížky, kterými jsou opatřeny konce optického vlákna, obsahují velký počet pásem, které mají různé indexy lomu. Vláknové lasery našli pro své výhody uplatnění v celé řadě aplikací. Jako příklad lze uvést oblast chirurgie dermatologie či telekomunikací. Ve strojírenské technologii získal vláknový laser uplatnění zejména u přesného obrábění, jako je vrtání, gravírování či řezání. Tento typ laserů umožňuje pracovat jak v režimu kontinuálním, tak v režimu pulsním nebo kvazipulsním. Velkými výhodami vláknového laseru jsou:

- Jednoduchost vedení paprsku
  - Modularita: možnost spojování laserových modulů za účelem zvýšení výkonu
  - Vysoká účinnost (30-35 %)
  - Dlouhá životnost (až 100 000 h)
  - Nízké nároky na prostor
  - Vysoká kvalita laserového paprsku
  - Nízké provozní nároky
  - Nízké nároky na údržbu
- **Diskový laser:** velmi moderní technologie, Principiálně podobný s Nd-YAG laserem. Aktivním prostředím je v tomto případě malý disk, který bývá spojen jednou stranou s chladičem, který slouží k odvodu tepla.
- Mezi hlavní výhody této technologie patří:
    - Rovný teplotní profil celého disku
    - Vysoké výkony (až 16 kW)
    - Dobrá kvalita výstupního paprsku, která neklesá ani při rostoucím výkonu laseru.
  - Hlavními nevýhodami však je:
    - Nižší účinnost (15-20 %)
    - Nižší životnost ve srovnání s vláknovými lasery

### 2.3 Uplatnění laseru v průmyslu

Do průmyslové výroby se laser začal začleňovat téměř ihned po jeho prvním sestavení. Dnes jsou proto laserové technologie zastoupené téměř ve všech odvětvích strojírenského průmyslu. Základními operacemi prováděných pomocí laserů jsou tyto následující:

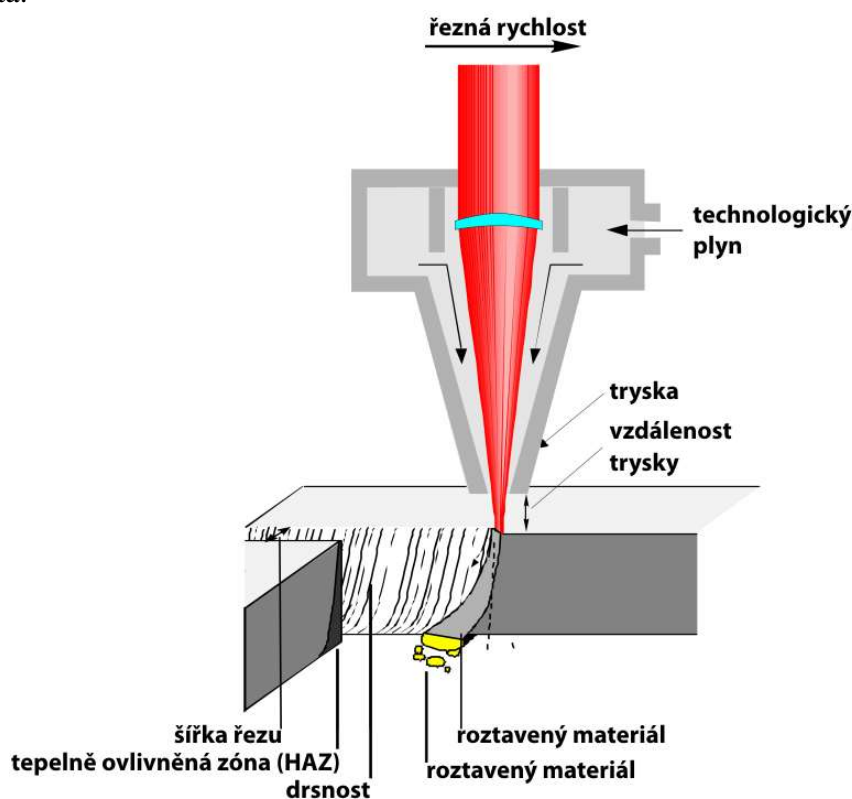
- Svařování
- Řezání
- Vrtání
- Dekorování skla
- Gravírování
- Značení a popis
- Soustružení
- Frézování
- Tepelné zpracování
- Nanášení otěruvzdorných a ochranných povlaků

### 2.3.1 Řezání laserovým paprskem [6] [33] [34]

Jednou z nerozšířenějších technologií s použitím laserového paprsku ke zpracování materiálu je řezání (Obr.2.9)

Dle použité technologie můžeme pak řezání rozdělit do následujících skupin:

- **Sublimační řezání:** materiál je odpařován laserovým paprskem s vysokou intenzitou záření a vytvořené páry jsou následně vyfukovány z řezu pomocí asistenčního plynu. Asistenčním plynem bývá nejčastěji argon nebo dusík, při jejich použití nedochází k následné oxidaci materiálu. Při sublimačním řezání získáváme kvalitní řez, který je hladký a bez ořepů.
- **Tavné řezání:** při tavném řezání se používají nižší výkony než při sublimačním, jelikož je materiál pouze taven. Natavený materiál je následně vyfukován z místa řezu asistenčním inertním plynem.
- **Oxidační řezání:** tento způsob vyniká vysokými řeznými rychlostmi, a tudíž našel uplatnění při dělení konstrukčních a běžných ocelí. Jako asistenční plyn se zde používá kyslík, který je přiváděn do místa řezu. Přivedením kyslíku k materiálu, zahřátému na zápalnou teplotu, dojde v místě řezu k exotermické reakci, která ho spálí. Při tomto procesu vzniká struska, která je zároveň asistenčním plynem vyfouknuta.



Obr. 2.9 Princip řezání laserem [34]

Jako výhody použití laserového řezání mohou být uvedeny tyto:

- šířka řezu - dle druhu a tloušťky materiálu 0,02-0,2 mm
- úzké pásmo tepelně ovlivněné oblasti - 0,05-0,2 mm
- opotřebení nástroje- není jelikož se jedná o nekonvenční metodu
- řezy jsou čisté a bez ořepů
- je možné řezat i velmi složité tvary
- ekonomicky hospodárné i při kusové výrobě či malých sériích

Za nevýhody jsou považovány:

- náklady na pořízení stroje
- provozní náklady spojené s údržbou a vysokou spotřebou plynů
- CO<sub>2</sub> lasery mají menší účinnost
- v porovnání s přesným vysekáváním je dražší

V oblasti řezání jsou nejvíce zastoupeny lasery kontinuální - CO<sub>2</sub>, u kterých se dosahuje středního výkonu do 15 kW. Těmito lasery je možno řezat do tloušťky až 20 mm u konstrukčních ocelí, do tloušťky 10 mm u ocelí korozivzdorných a do tloušťky 5 mm u slitin hliníku a litin.

Pokud je nutno dosáhnout přesnějších řezů a menších šířek řezné spáry je vhodné použít Nd:YAG laser s výkonem 100 W-1 kW. Těmito lasery je možné řezat do tloušťky 6 mm u konstrukčních ocelí, do tloušťky 3 mm u korozivzdorných ocelí a do tloušťky 2 mm u litin a slitin hliníku.



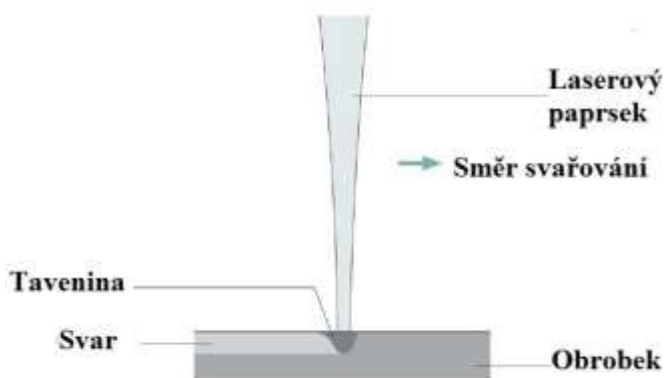
Obr. 2.10 Charakteristická řezná plocha při dělení laserem [32]

Při dělení pomocí laserového paprsku je také nutno uvést, že vzniká pro laser velmi charakteristická řezná plocha, která je způsobena prouděním asistenčního případně řezného plynu. Schématicky je tvar přezné plochy vidět již na obr. 2.9. Reálná řezná plocha je na obr. 2.10

### 2.3.2 Ostatní laserové technologie [3] [17] [21] [34] [35]

➤ **Svařování laserovým paprskem** - Svařování pomocí laserového paprsku je spolu s řezáním nejpoužívanější metodou použití laseru v průmyslové výrobě. Při tomto způsobu svařování dochází k absorpci tepla dodaného laserovým paprskem povrchem materiálu. Akumulací tepla dochází k nárůstu teploty uvnitř materiálu, což může vést k lokálnímu natavení, nebo i odpařování materiálu. Svařování samotné pak můžeme rozdělit na dvě základní varianty.

- **Kondukční svařování**-viz. obr. 2.11 při tomto režimu svařování se zpravidla využívají lasery s hustotou výkonu do  $10^6 \text{ W.cm}^{-2}$ . Kdy odpar materiálu je minimální

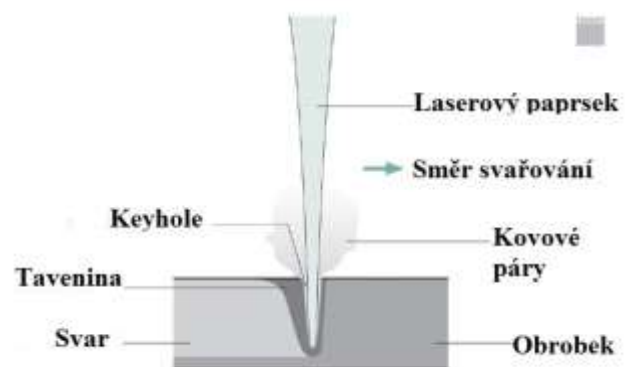


Obr. 2.11 Kondukční laserové svařování [35]

Nejvhodnějším laserem pro svařování kondukcí je laser pevnolátkový, pracující ve spojitém nebo pulsním režimu.

nebo žádný. Dochází k absorpci energie povrchem materiálu, jeho natavení a výsledný vznik svaru, který se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi. Vzniklý svar je hladký, zaoblený a není nutno ho dále obrábět. Hloubka svaru se pohybuje od několika desetin milimetru až po jeden milimetr. Hloubka průvaru je ovlivněna především tepelnou vodivostí materiálu. Proto je tento způsob svařování vhodný především pro tenkostěnné součásti.

- **Hluboké svařování**- viz. obr. 2.12 pro tento typ svařování je nutno disponovat výkony laseru nad  $10^6 \text{ W.cm}^{-2}$ . Při hlubokém svařování dochází nejen k tavení materiálu ale i k jeho částečnému odparu. Tavenina pak je částečně tlakem páry vypuzována. Při dalším natavování obrobku se pak vytváří úzká kapilára, která je vyplněna párou

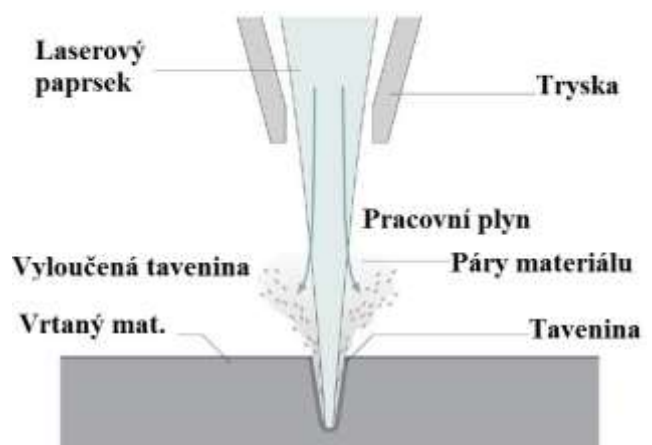


Obr. 2.12 Hluboké laserové svařování [35]

kovu, která je také často nazývána key hole-klíčová dírka. Tato kapilára je obklopena roztaveným kovem, který při pohybu kapiláry, ke kterému dochází pohybem laserového svazku, kapiláru obtéká a na její zadní straně tuhne. Takto dochází ke vzniku úzkého a hlubokého švového svaru. Svar má stejnoměrnou strukturu a je možno dosáhnout průvaru až 25 mm. V kapiláře dochází také k mnohonásobnému odrazu laserového paprsku od natavených stěn, které tento paprsek následně téměř úplně absorbují. Dochází tak ke zvýšení účinnosti svařování. Při použití  $\text{CO}_2$  laserů dochází také k absorpci laserového světla a jeho částečné ionizaci. Dochází ke vzniku plasmu a k dalšímu průniku energie do materiálu. Díky těmto aspektům je hluboké svařování vhodné pro svařování do velké hloubky, nebo pokud je nutno svar provést přes více vrstev najednou. Hluboké svařování disponuje také vysokými svařovacími rychlostmi a vysokou účinností.

Jako výhody laserového svařování můžeme uvést:

- vysokou rychlost a jakost svařovacího procesu
  - čistý úzký a hluboký svar
  - malou tepelně ovlivněnou oblast
  - minimální deformace svařovaných dílů
  - provedení svaru, i pokud je přístup možný pouze z jedné strany
  - nároky na povrchovou jakost svařovaného materiálu jsou nízké
  - vysoká pevnost svaru
  - dobrý povrchový vzhled
  - možnost automatizace
- **Vrtání** -viz. obr. 2.13 Jako další technologie použití laseru je možno uvést vrtání. Tato technologie byla použita k vrtání do diamantových průvlaků, sloužících k tažení drátu, již v roce 1965. Laserové vrtání je založeno na odpařování materiálu. Protože musí být intenzita svazku ve srovnání se svařováním vyšší, je vhodnější použití pulzních laserů. V průmyslové výrobě se nejčastěji používá Nd:YAG laser o výkonu až 500 W. Doba vrtání je závislá především na tloušťce materiálu a výkonu laseru. Jako výhoda může být



Obr. 2.13 Vrtání laserem [35]

uvedena především možnost vrtání děr už od průměru 0.1 mm a hloubce až 50 mm přičemž je možné i vrtání v místech konvenčními metodami nedostupných. Jako další výhodu je možno uvést vrtání do širokého spektra materiálu jako jsou: kovy, dřevo, keramika plasty, sklo a mnoho dalších.

Dle konkrétní technologie pak také můžeme rozdělit vrtání na:

- pulzní- jednotlivými nebo opakovanými pulzy
- trepanační- laserový paprsek vrtá pohybem do kružnice
- spirálové- vyřezávání díry při pohybu do šroubovice

- **Dekorování skla** - Dekorování skla je jednou z modifikací řezání laserovým paprskem. Paprsek je v tomto případě fokusován na skleněný povrch, v místě dopadu záření tak dojde k jeho částečnému odpaření a povrchovému poprasování. V těchto místech pak dochází k rozptylu dopadajícího světla a ke vzniku zářivého dekoru (Obr. 2.14) V poslední době velmi oblíbenou laserovou aplikací v oblasti dekorace skla je prostorová dekorace skla neboli intravolumární glyptika. Trojrozměrné objekty ve skle jsou vytvářeny fokusací laserového paprsku do různé hloubky skleněného objektu, přičemž princip viditelnosti zůstává stejný jako u plošného dekorování.



Obr. 2.14 Příklad dekorování [1]

Pro plošnou dekoraci skla, je nutné používat laserů, které vytvářejí paprsek, jehož záření sklo dobře absorbuje. K tomuto účelu se velmi dobře hodí CO<sub>2</sub> a Nd:YAG laserů. Pro trojrozměrné dekorování je však vhodnější pouze pulzní Nd:YAG laser s výkonem do 1 MW.

- **Gravírování** - Gravírování, nebo také mikrofrézování je operace sloužící k vytváření jednoduchých nebo i velmi složitých reliéfů (Obr.2.15) v hloubce až několika milimetrů do širokého spektra



Obr. 2.15 Příklad gravírování laserem [36]

různých materiálů. Nejčastěji však kalených ocelí a keramiky, kde je používán především laser Nd:YAG. Nebo i dřeva a gumy, kde je vhodnější použití CO<sub>2</sub> lasery. ;

- **Značení a popis**

Technologie značení laserem je založena na lokálním odparu povrchu materiálu, nebo změně jeho barvy. Pomocí laseru je tak vytvářen stálý, velmi kontrastní popis s vysokou přesností a mechanickou odolností. Tento popis je jinak nenapodobitelný (Obr.2.16).

Popis je proveden v krátké operaci a nejsou při něm použita žádná chemická činidla ani nutné mechanické zásahy do struktury materiálu. Výška značení se počítá od mikrometrů až do několika milimetrů. Tloušťka odpařovaného materiálu bývá však v řádu mikrometrů.



Obr. 2.16 Příklad značení laserem [15]

Značení je možné provádět u všech materiálu. Lze popisovat jak rovinné tak válcové případně jinak zakřivené plochy. Popis je možno umístit na místech, která jsou málo přístupná.

V dnešní době je nejpoužívanější způsob značení tento:

- **popis vychýlením laserového paprsku-** laserový paprsek je vychylován počítačem řízenými zrcadly viz obr. 2.17. Používá se CO<sub>2</sub> lasery které mají výstupní výkon až 100 W a rychlostí popisu maximálně 1 mm.s<sup>-1</sup>. Při použití Nd:YAG laserů je možno použít optická vlákna čímž lze dosáhnout popisu i na méně přístupných místech. Rychlost popisu je vyšší a dosahuje až 4 mm.s<sup>-1</sup>. Výhodou v případě použití vychylování paprsku je vysoká operativnost a rychlé změny v popisovaném textu. Změna je provedena pouze změnou programu.



Obr. 2.17 Princip laserového popisování [33]

#### ➤ Soustružení

Je jednou z méně častých aplikací využití laseru. Při soustružení se používá těchto tří metod:

- **obrábění s předehřevem-** do povrchu materiálu je přivedeno teplo, dochází ke změně mechanických vlastností, kdy se snižuje pevnost s tvrdostí a dochází ke zlepšení obrobitelnosti. Paprsek laseru je v tomto případě nasměrován na soustružnou plochu těsně před břit soustružnického nástroje,
- **odtavování materiálu-** kdy je materiál odtavován intenzivním ohřevem pomocí laserového paprsku. Tavenina je pak odstraňována za pomoci asistenčního plynu,
- **odřezávání za pomoci dvou různoběžných laserových paprsků-** dva laserové paprsky jsou nasměrovány na obráběný povrch pod určitým úhlem, čímž dochází k úběru materiálu (Obr. 2.18).



Obr. 2.18 Laserové soustružení [33]

Při soustružení jsou používány CO<sub>2</sub> lasery nebo Nd:YAG lasery, které dosahují výstupního výkonu od 500 W do 2,5 kW.

#### ➤ Frézování

Stejně jako soustružení i frézování je jednou z méně častých technologií obrábění za pomoci laseru. Při frézování jsou použity dva principy, které jsou totožné s technologií soustružení:

- odtavování materiálu obrobku
- odřezávání materiálu dvěma různoběžnými paprsky

Pro frézování jsou vhodné jak CO<sub>2</sub> tak Nd:YAG lasery se stejnými parametry jako v případě soustružení.

#### ➤ Tepelné zpracování laserem

Můžeme charakterizovat jako ohřev s krátkou dobou a malým objemem materiálu, který je ohříván (Obr.2.19). Je založeno dle typu tepelného zpracování na:

- ohřevu materiálu- používáno pro operace kalení, žhání a popouštění,
- tavení povrchu- pro amorfizaci a zpevnění povrchu,
- odpar materiálu- používáný pro rázové zpevnění, které je založené na vypařování.

Jednou z nejvíce používaných laserových technologií tepelného zpracování je kalení pomocí laserového paprsku.

#### Kalení laserem

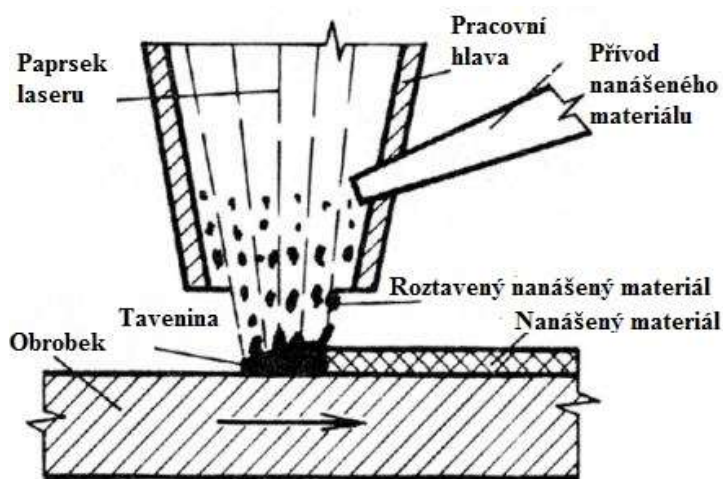
Operace, která využívá k rychlému ohřevu kovu záření laserového paprsku. Používá se hlavně pro svou výhodu oproti jiným způsobům, kterou je možnost lokálního tepelného zpracování, které je možné i na místech jinak nepřístupných. Při tomto způsobu kalení také odpadá nutnost používat chladicí kapalinu. Pro kalení laserem se používá CO<sub>2</sub> laserů v kontinuálním režimu s výkonem až několik kilowattů. Používá se například pro kalení vodících ploch, drážek nebo vnějších a vnitřních dosedacích ploch.



Obr. 2.19 Tepelné zpracování [33]

#### ➤ Nanášení otěruvzdorných a ochranných povlaků a barev

Další méně známou technologií je nanášení ochranných materiálů za pomoci laserového paprsku (Obr.2.20). Nanášeným materiálem bývá kov keramika a podobné materiály. Tento materiál se přivádí do laserového paprsku jako prášek či drát. Je taven a nanášen na povrch výrobku. Je také možné nanášet povlak na obrobek a následně ho laserem přetavit. Nebo může být povlak vytvořen reakcí plynu, který se přivádí do místa ohřevu s nataveným materiálem. Při povlakování pomocí laseru se dosahuje tlouštěk až 1 mm. Výhodou nanášení povlaku pomocí laseru je, že nanášený povlak neobsahuje žádné trhliny a má k obrobku dobrou přilnavost. Je možné ho nanášet na široké spektrum materiálů včetně velmi složitých tvarů součástí. K laserovému nanášení povlaků jsou využívány CO<sub>2</sub> lasery s výkony kolem 5 kW. Rychlost nanášení se pohybuje mezi 20 a 100 cm<sup>2</sup>.min<sup>-1</sup>.



Obr. 2.20 Nanášení povlaků a barev [33]

### 3 Vysekávání [6] [7] [18] [20]

Jako další z nejpoužívanějších technologií dělení plechů a tvorby dílů nebo polotovarů je vysekávání. O této technologii je možno uvést že se jedná o jednu z nejproduktivnějších a nejmodernějších technologií konvenčního beztržiskového dělení plechů. Vysekávání se využívá v případech výroby tvarově složitých dílů, často v případech kdy je nemožné, nebo nevhodné použít jinou metodu.

Vysekávání samozřejmě není určeno pouze pro ocelové materiály. Mezi materiály, které jsou k vysekávání vhodné, je možné uvést například měděné nebo hliníkové plechy, gumu nebo některé druhy plastů. V běžné strojírenské výrobě je nejčastěji využíváno strojního vysekávání. K tomuto úkonu je použito CNC děrovacích lisů a jejich nástrojů jako jsou razníky, matrice, stěrače, nebo různé druhy multitoolových nástrojů (Obr.3.1). Tyto nástroje jsou pak vybírány a používány dle aktuálního programu z nástrojového zásobníku stroje.

Vysekávání může být rozděleno do dvou základních skupin. Základní technologií je děrování. Při této činnosti dochází zpravidla k vystřihování daného tvaru do plechu pomocí vhodných tvarových nástrojů. Výstřížek bývá nejčastěji v tomto případě odpadem. Druhou možnou technologií je použití tzv. niblování. Při této technologii jsou jednotlivé prostřížené otvory umístěny tak, aby se překrývali. Tímto způsobem pak můžou být vytvořeny otvory nebo kontury libovolných tvarů. Tato technologie je nejčastěji využívána při vystřihování velkých poloměrů nebo nepravidelných tvarů. Nevýhodou této technologie jsou pozůstatky jednotlivých střížných zdvihů, které jsou viditelné na střížné hraně. Tento jev je možno však eliminovat zmenšením přesahů jednotlivých stříhů.

Jako výhody vysekávání je možno uvést:

- Dosažení vysoké přesnosti dílů
- Vysokou produktivitu
- Vhodnost jak pro kusovou tak sériovou výrobu
- Nedochozí ke vzniku tepelně ovlivněné oblasti materiálu
- Ekonomicky hospodárný způsob výroby
- Vystřížená díra je levnější a přesnější v porovnání s laserovým řezáním

Nevýhodami vysekávání jsou:

- Omezená tloušťka vysekávání – v závislosti na použitém stroji
- Opatření vysekávacích nástrojů



Obr. 3.1 Příklad vysekávacího multitoolového nástroje [18]

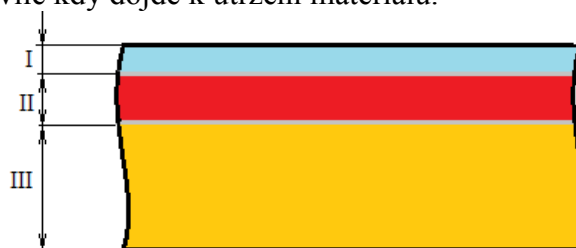
### 3.1 Princip přesného vysekávání [6] [7] [20] [31]

Pojmem děrování je označen proces, při kterém oddělujeme materiál vnesením smykového napětí do řezné roviny materiálu. Tohoto napětí se dosahuje za působení řezných, protilehlých hran. Průběh stříhu můžeme rozdělit do třech fází viz. obr. 3.2 a obr. 3.3. Při děrování je plech umístěn mezi razníkem a matricí. Razník se pohybuje proti raznici.

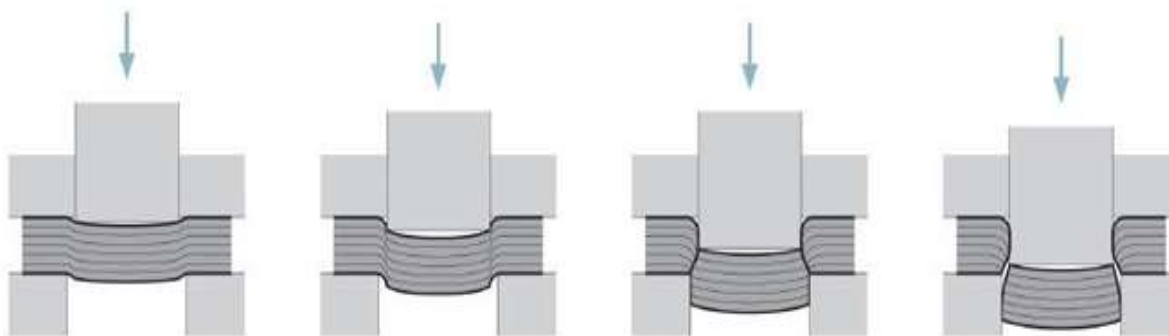
- První fáze stříhu je v oblasti pružných deformací. Dochází k němu krátce po kontaktu materiálu se střížníkem. Materiál je stlačován ohýbán a vtačován do matrice.
- Jako druhá fáze je označena deformace materiálu v oblasti plastické deformace. V této fázi je střížník vtačován do plechu a dále do otvoru matrice. Napětí, které vzniká na hranách střížného nástroje, přesahuje mez kluzu a přibližuje se hodnotě mezi pevnosti.
- Třetí fáze, je část stříhu kdy se na střížných hranách začínají tvořit první trhlinky. Ty se pak dále zvětšují, až do chvíle kdy dojde k utržení materiálu.

Z posledního bodu je zřejmé, že k oddělení materiálu dojde již před úplným průchodem střížníku skrze celou tloušťku materiálu a výstřížek je v závěru střížníkem pouze vytlačen.

(Někdy bývá označeno jako fáze čtyři, která se nazývá pásmo odtlačení.) Tímto faktem je způsobeno to, že okraje střížných ploch nejsou zcela rovinné a zároveň má střížná plocha určitou hodnotu drsnosti. Tato drsnost však není ve střížné ploše rovnoměrně rozmístěna. Oblasti, kde došlo k výskytu prvních trhlin, mají drsnost vyšší než oblasti ostatní. Čím vyšší je podíl řezu ve střížné ploše, tím lepší je kvalita hran. Pokud je nutno získat přesný otvor, je otvor děrován nejprve předběžně. A poté je na konečný průměr prostřížen nástrojem o mírně větším rozměru. Tímto způsobem je možno dosáhnout až stoprocentního podílu řezu ve střížné ploše.



Obr. 3.2 Pásma stříhu [20]



Obr. 3.3 Jednotlivé kroky při přesném vysekávání [31]

## 4 Zinkování [29]

Nanášení zinkových vrstev na povrch ocelových výrobků, je v průmyslové výrobě dávno zavedená praxe. Ve srovnání s nátěrovými hmotami koroduje zinková vrstva pouze na povrchu oceli a poskytuje materiálu katodickou ochranu na místech, kde je povlak poškozen. To znamená, že na rozhraní mezi zinkovou vrstvou a samotným povrchem materiálu nedochází ke vzniku koroze.

### 4.1 Galvanické zinkování [29]

Povrch upravované součásti se nejprve odmastí a následně se mořením očistí od rzi a okují. Často je předúprava spojena s odmašťováním elektrolytickým.

Díly jsou následně zavěšeny do vodného roztoku zinečnatých solí (elektrolytu) a zapojeny na záporný pól zdroje stejnosměrného proudu jako katoda. Na kladný pól jsou připojeny jako anoda desky z čistého zinku (99,995%) viz.obr. 4.1.

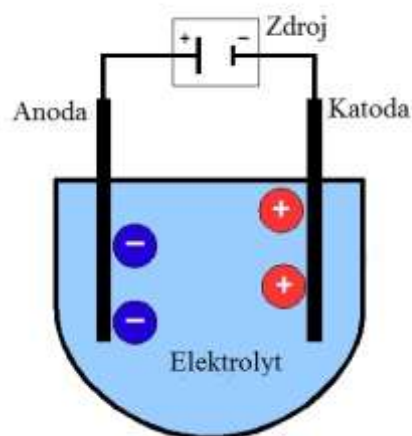
Dle použitých druhů soli můžeme rozdělit elektrolyt na alkalický, kyselý nebo neutrální. Po zapojení proudu, se začne zinková anoda rozpouštět. Vznikají zinečnaté ionty, které putují ke katodě (zinkovaný díl), a vylučují se na jejím povrchu. U ocelí, které jsou citlivé na vodíkovou křehkost, má velký význam tzv. proudový výtěžek, který můžeme charakterizovat jako podíl proudu využitého na vyloučení zinku.

U zinkování objemnějších předmětů, nebo kusové výroby jsou díly většinou zavěšovány nebo je využito pokovování v bubnech. Tyto přípravky a bubny jsou přesouvány mezi jednotlivými kroky. K manipulaci mezi lázněmi se využívají často programovatelné roboty.

U takto vytvořené zinkové vrstvy se dosahuje velmi jemnozrné struktury, která je s povrchem oceli spojená pouze mechanicky viz. obr. 4.2 Zinkovaná vrstva je běžně 5-8  $\mu\text{m}$  silná, přičemž normou udávané tloušťky jsou 3, 5, 8, 12 a 20  $\mu\text{m}$ . Při hromadné výrobě se volí spíše povlaky tenčí. Povlaky silnější se dají zpravidla vytvořit pouze na kusech geometricky nenáročných např. drát. Při zinkování vrstev větších než 15  $\mu\text{m}$  je z ekonomického hlediska vhodné použít zinkování žárové.

Při galvanickém zinkování, lze pozorovat měnící se sílu povlaku v závislosti na tvaru součásti a vzájemné pozici součásti a anody. Při zinkování složitějších dílů je nutné použít pomocných anod, z důvodu vytvoření povlaku i v zastíněných oblastech.

Galvanickým zinkováním se též dosahuje velmi hladkých povrchů s kovovým leskem. Těchto vysoce lesklých povlaků dosahujeme přidáním tzv. leskutvorných přísad. Pro ochranu zinkované vrstvy při přepravě a skladování se tyto předměty běžně chromátují. Galvanicky zinkované povrchy není vhodné používat v exteriérech, výjimkou jsou pouze krátkodobé expozice. Pro venkovní účely by se měly používat pouze povrchy žárově zinkované.



Obr. 4.1 Princip galvanického pokovování [29]



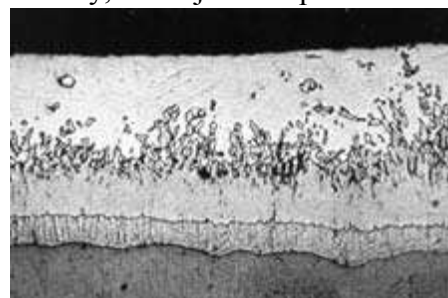
Obr. 4.2 Přechod ocel-zinek při galvanickém pokovení [29]

## 4.2 Žárové zinkování [29]

Povrchy, které jsou znečištěny barvou, či struskou je třeba nejprve mechanicky očistit. Tato operace se provádí tryskáním či broušením. Pokud povrch obsahuje formovací písek je nutno tento odstranit tryskáním. Písek obsahuje křemičitany, které není následně možno odstranit mořením v kyselině sírové, chlorovodíkové, nebo chloridu železnatém.

Následným krokem je odstranění tuků olejů a dehtu. K tomuto se používá alkalického odmašťování. Současná výroba se čím dál tím více přiklání k ekologičtějším řešením. Proto se k odmašťování používají lázně s tenzidy a bakteriemi. Použití těchto lázní umožňuje vynechání lázní oplachových a je možné rovnou přejít k moření. Moření se provádí z důvodu odstranění okují a rzí.

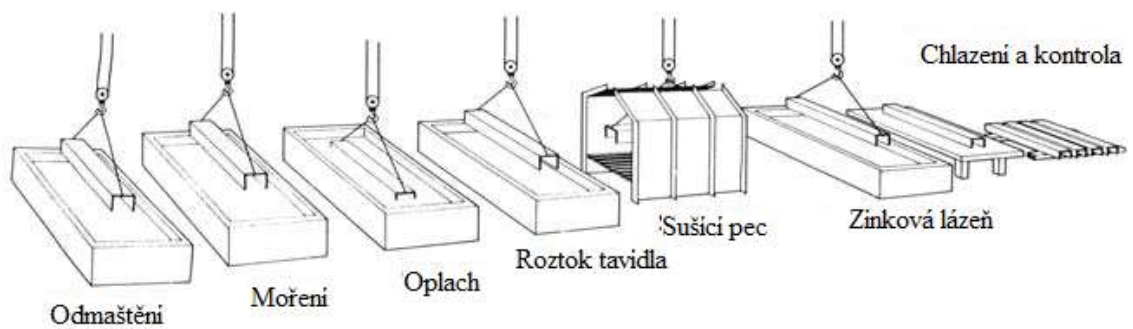
Před samotným žárovým zinkováním, které se provádí ponořením do roztaveného zinku, je nutné na povrch nanést nejprve tavidlo. Tavidlo rozpouští oxidy, které jsou na povrchu oceli a zinku a zároveň zabraňuje jejich opětovnému tvoření. Rozpuštěním oxidů pak dojde k přímému kontaktu obou kovů. Tato operace je možná provést dvěma způsoby, zinkováním suchým nebo mokřím. Při zinkování žárovém oproti galvanickému, dojde při kontaktu oceli s roztaveným zinkem k reakci mezi těmito kovy a dojde k vytvoření slitiny železo-zinek na povrchu součásti viz.obr. 4.3. Slitinu tvoří různé fáze železo-zinek, přičemž od povrchu, kde se vyloučí téměř čistý zinek, směrem k základnímu materiálu roste podíl železa.



Obr. 4.3 Přechod ocel zinek při žárovém zinkování [29]

### ➤ Suché zinkování (Obr. 4.4)

Prvotními operacemi jsou odmaštění, moření a oplach. Následně se díl ponoří do lázně tavidla (vodný roztok chloridu amonného a chloridu zinečnatého). Tavidlo se poté usuší a vytvoří na povrchu součásti tenkou vrstvu, která zabrání oxidaci tohoto povrchu. Tato vrstva tavidla čistí i hladinu zinkové lázně od oxidů při vkládání součástí. Při vkládání a vyjímání součástí ze zinkové lázně je nutné setřít popel, vzniklý spálením tavidla, a oxidy zinku z povrchu roztaveného zinku. Po vyjmutí součásti ze zinkové lázně, následuje ochlazení na vzduchu nebo ve vodě. Následuje kontrola, balení, eventuelní úpravy a expedice.

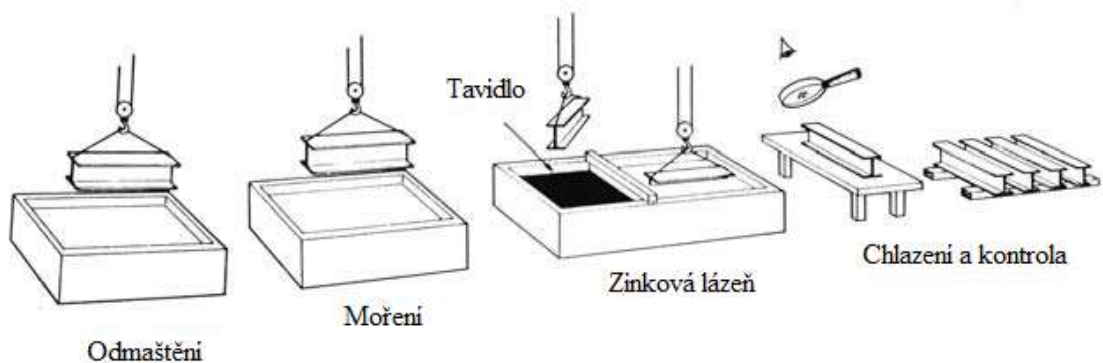


Obr. 4.4 Jednotlivé fáze suchého zinkování [29]

➤ **Mokrý zinkování (Obr. 4.5)**

Při mokřém zinkování jsou vynechány některé kroky zinkování suchého. Tento způsob má rozdělenou hladinu zinkovací lázně přepážkou na dvě části. Jedna část má na povrchu zinkové lázně vrstvu tavidla, kterou je v tomto případě chlorid amonný. Po krocích odmaštění a moření se součást ihned ponořuje skrze vrstvu tavidla do zinkovací lázně. Následně je součást protažena do té části zinkové lázně, která nemá na své hladině vrstvu tavidla. V této části je nutno z povrchu stírat popel vzniklý spáleným tavidlem a zinkové oxidy. Po vytažení součásti z lázně následuje ochlazení ve vodě nebo na vzduchu. Poté následuje stejně jako u předchozí metody kontrola, eventuální úpravy, balení a expedice.

Metody suchého i mokřého zinkování jsou zcela rovnocenné jak kvalitativního hlediska tak i z hlediska protikorozní ochrany. Nejběžnější způsob je však zinkování suché z důvodu snazší automatizace provozu.



Obr. 4.5 Jednotlivé fáze mokřého zinkování [29]

○ **Výhody zinkování**

- Vstupní náklady jsou přijatelné.
- Trvanlivost povrchové úpravy je dlouhodobá.
- Za životnost dílu není nutná další povrchová úprava.
- Kvalitní a rovnoměrná vrstva po celém povrchu předmětu.
- Tvorba stejného nebo silnějšího povlaku na ostrých hranách nebo nerovnostech povrchu, oproti rovným plochám.

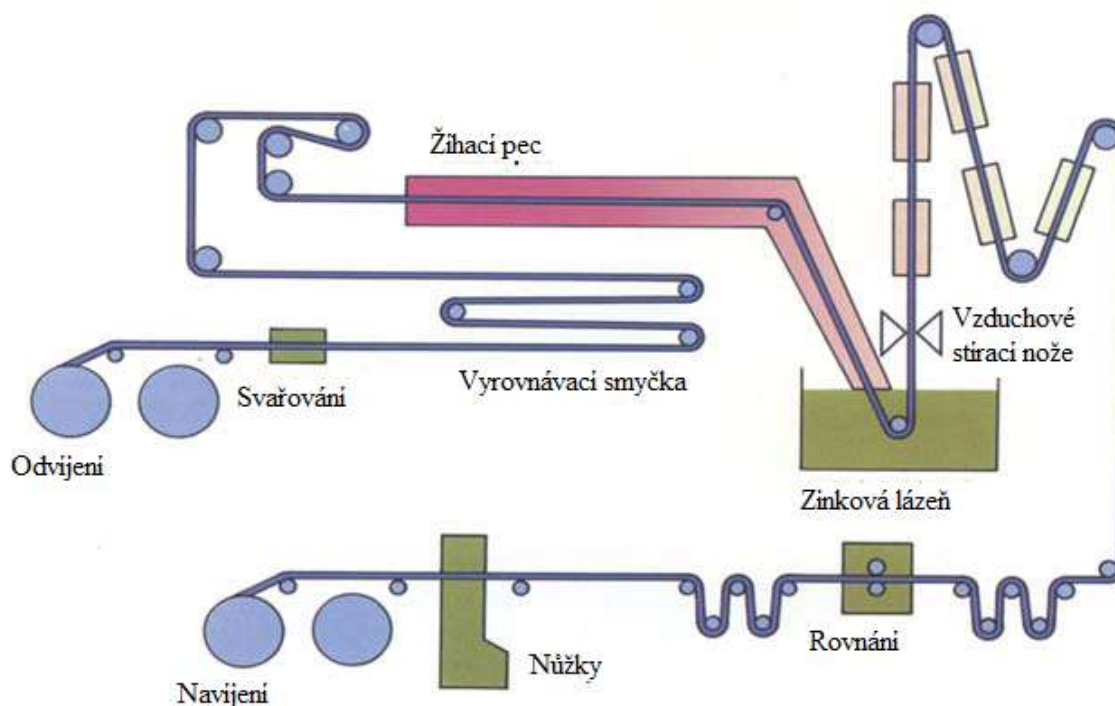
- Nízká náchylnost vrstvy na mechanické vlivy, kterých je dosahováno při montáži či přepravě
  - Katodická ochrana oceli při vzniku malých vrypů.
  - Nízká obtížnost kontroly povrchu
- Nevýhody zinkování
- Problematictější svařování zinkovaných dílů.
  - Textura zinkového povrchu.
  - U mohutných konstrukcí náročnost na jejich úpravu.
  - Plochy tvářené za studena mají, při vložení do zinkové lázně, vyšší riziko deformace způsobené její teplotou.

➤ **Žárové zinkování ocelových plechů**

Poměrná část žárového zinkování se věnuje povrchové úpravě tenkých plechů. Tento proces se provádí v kontinuálních zařízeních. Základním materiálem jsou svitky za studena válcovaného plechu, které jsou průběžně svařovány do nekonečného pásu, viz. obr. 4.6.

Nejprve se pás odmastí a následně se oxiduje nebo moří. V žhací peci se následně při 950°C provádí změkčovací žhání oceli, současně se ocel redukcí zbaví oxidů. Ocel vstupující v ochranné atmosféře do zinkovací lázně má kovově čistý povrch. Pás, který po několika sekundách vystupuje kolmo vzhůru od zinkovací lázně, prochází skrze tzv. vzduchové stírací nože, které zajišťují požadovanou sílu zinkového povlaku. Tloušťka zinkové vrstvy je upravována nastavením stíracích nožů. Měření se provádí pomocí tloušťkoměrů.

Následně pás prochází přes sekci ochlazovací, rovnací a v další části se provádí úprava, která zabraňuje vzniku bíle rzi. Následně se pásy navíjejí na svitky, které jsou kráceny formátovacími nůžkami. Svitky jsou následně expedovány nebo můžou být dále upravovány, polákovány či tvářeny.



Obr. 4.6 Schéma linky pro žárové zinkování plechů [29]

### 4.3 Měření tloušťky zinkové vrstvy [8] [22] [30]

Pro měření tloušťky povrchové vrstvy je nejprve nutno charakterizovat danou povrchovou vrstvu a materiál základní k této povrchové vrstvě a to z důvodu různých fyzikálních vlastností měřených vrstev a materiálů. Příklad použití zinku jako povrchové vrstvy na ocelový plech tedy můžeme charakterizovat jako rozhraní vodivého neferomagnetického materiálu, kterým je v daném případě zinek, s vodivým feromagnetickým materiálem, kterým je základní materiál, ocelový plech. K tomuto účelu je nejčastěji použito následující měřicí metody.

- **Metoda magneticko-induktivní** (Obr.4.7)- měřicí sonda pro daný typ měření obsahuje jádro z feromagnetického materiálu. Na toto jádro je navinuto budící vinutí, které je napájeno střídavým proudem s nízkou frekvencí. Touto sondou je pak v jejím okolí vytvářeno elektromagnetické pole, které případný feromagnetický materiál, který se dostane do její blízkosti, zesiluje. Zesílení elektromagnetického pole je odpovídající vzdálenosti feromagnetického materiálu od sondy. Toto zesílení je pak měřené druhou snímací cívkou. Jedná se o velice přesnou metodu, kde odchylka měření dosahuje přibližně 3 %. Rozsah měření je 0-5 mm, pokud je použito speciální sondy je možné měřit tloušťky až 20 mm.



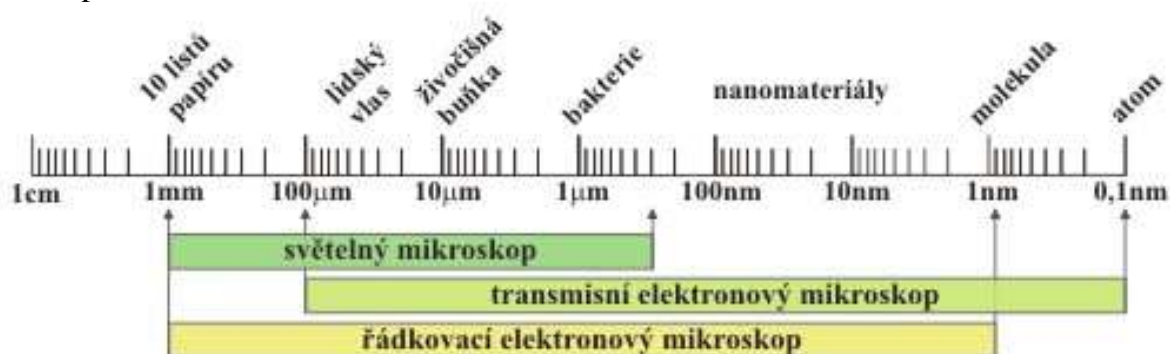
Obr. 4.7 Přístroj k měření tloušťky povrchové vrstvy metodou magneticko induktivní [8]

## 5 Použité analytické metody.

Při analyzování řezné hrany plechu a určení možnosti, případně hodnoty vtažení zinkové vrstvy, bylo nutno použít moderní technologie, elektronové mikroskopie. Pouze s použitím těchto analytických metod, bylo možno zobrazit dané plochy v rozlišení umožňujícím určit a vyhodnotit požadované parametry.

### 5.1 Elektronová mikroskopie [9] [14]

Elektronová mikroskopie je v dnešní době jedním z velmi využívaných zdrojů analýzy materiálů. Při této mikroskopii jsou využívány přístroje principiálně velmi podobné světelným mikroskopům. Jedná se ve své podstatě o optický mikroskop, kde proud fotonů je nahrazen elektrony urychlenými elektrickým polem, optická soustava skleněných čoček je nahrazena čočkami elektromagnetickými. A protože je velice důležité, aby nedocházelo ke srážkám elektronů s okolními molekulami vzduchu, je nutné celou aparaturu umístit do vakuového prostředí. Nejdůležitější vlastnost při mikroskopickém zkoumání materiálů je nazývána mezní rozlišovací schopnost. Tento parametr je závislý na použitém záření a jeho vlnové délce, a protože vlnová délka elektronového paprsku je výrazně kratší v porovnání s viditelným světlem, dosahuje elektronový mikroskop daleko vyšších rozlišovacích schopností. Zvětšení takového mikroskopu je pak až 1 000 000x vyšší než při použití běžných světelných mikroskopů. Srovnání velikosti objektů, které lze mikroskopicky pozorovat je schematicky zobrazeno na obr.5.1. Elektronové mikroskopy můžeme rozdělit na dvě základní skupiny. Rastrovací elektronový mikroskop **SEM** z anglického scanning electron microscope a transmisní elektronové mikroskopy **TEM** opět z anglického transmission electron microscope. Uspořádání obou mikroskopů je zobrazeno na obr.5.3 v porovnání s uspořádáním klasického světelného mikroskopu.



Obr. 5.1 Schematicky - velikost objektů a vhodnost použití mikroskopů [14]

## 5.2 Rastrovací elektronový mikroskop SEM [4] [9] [12] [14]

První v praxi využitelný mikroskop tohoto typu byl vyroben kolektivem pod vedením V. K. Zworykina roku 1942. Roku 1965 pak byl uveden na trh první SEM mikroskop pro komerční využití. Od té doby prošla elektronová mikroskopie dlouhým vývojem a modernizací. Běžný typ řádkovacího elektronového mikroskopu je zobrazen na obr. 5.2.

Rastrovací nebo také řádkovací elektronový mikroskop využívá k zobrazení sledovaného vzorku ostře fokusovaného svazku elektronů. Tento svazek je pak veden skenovací optikou, složenou s řady elektromagnetických čoček po povrchu vzorku, kde snímá postupně bod po bodu. K výslednému zobrazení povrchu vzorku pak dochází detekcí nejčastěji sekundárních SE elektronů, případně elektronů zpětně odražených BSE. Napětí využívané k urychlování elektronů při SEM mikroskopii bývá nejčastěji v rozmezí 0,1-30 kV. Tento způsob analýzy povrchu je vhodný především k zobrazení povrchových charakteristik vzorku jako je fázové složení, celková topografie, případně je možno určit i chemické složení. Velkou výhodou je vysoká rozlišovací schopnost a zároveň hloubka ostrosti, která zůstává zachována i při tomto rozlišení. Což následně způsobuje, že zobrazený povrch se zdá být trojrozměrným. Velikost vzorku v tomto případě omezuje pouze velikost vakuové komory mikroskopu. Omezením je pak pouze fakt, že vzorek musí být povrchově elektricky vodivý, což bývá v některých případech



řešeno povrchovým pokovováním vzorků.

Obr. 5.2 Skenovací elektronový mikroskop [14]

Při použití rastrovací elektronové mikroskopie je možno použít několik druhů detektorů dle signálů, které je nutno sledovat. Základní detektory SEM analýzy jsou:

- Detektor pro detekci sekundárních elektronů – SE
- Detektor pro detekci zpětně odražených elektronů – BSE
- Detektor pro detekci prošlých elektronů – TE
- Detektor pro detekci charakteristického RTG záření – EDX (WDS)
- Detektor difrakce zpětně odražených elektronů – EBSD

Jak je již výše uvedeno, pro zobrazení mikroskopovaného vzorku je využito, buď zpětně odražených elektronů, nebo elektronů sekundárních. Zpětně odražené elektrony můžeme definovat jako takové, které byly při vniku do vzorku odraženy, a energie těchto elektronů se významně nesnížila. V praxi to znamená, že došlo pouze ke změně jejich směru beze změny rychlosti. Nevýhodou těchto odražených elektronů je, že mohou unikat i z oblastí hlubších, čímž dochází ke zkreslení obrazu povrchu obrazem hlubších vrstev. Při použití zobrazení pomocí sekundárních elektronů se dosahuje rozlišení vyššího, což je způsobeno faktem, že detektorem jsou zachyceny pouze tyto sekundární elektrony z povrchových ploch vzorků.

### 5.3 Transmisní elektronový mikroskop TEM [9] [12] [14]

Transmisní elektronový mikroskop byl historicky prvním elektronovým mikroskopem, který byl komerčně vyráběn. První byl vynalezen a následně zkonstruován vědcem Ernstem Ruskou již v roce 1931. Roku 1986 byl pak za tento vynález oceněn Nobelovou cenou. Přestože jeho původní princip zůstal i nadále stejný, tak i transmisní mikroskop prošel v průběhu let velkým vývojem. Jeden ze současných je ukázán na obr. 5.4.

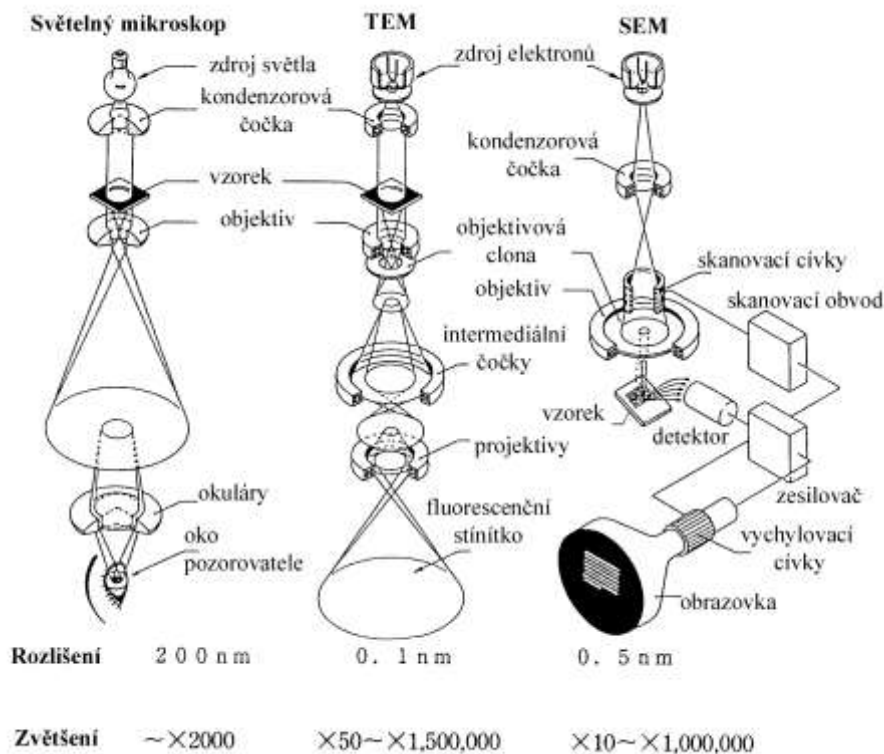
Principiálně funguje na stejném principu jako klasický světelný prozařovací mikroskop.

Rozdílem mezi těmito mikroskopy je, že vzorek není prozařován světlem ale svazkem elektronů, který je stejně jako u metody SEM veden ke vzorku pomocí elektromagnetických čoček. Tato metoda analyzování vzorků však vyžaduje vysoce vakuovanou komoru a vzorky které jsou

velice tenké (cca 10-500 nm), nebo měřící podložku kterou pokrývají velice malé krystalky.



Obr. 5.4 Transmisní elektronový mikroskop [14]



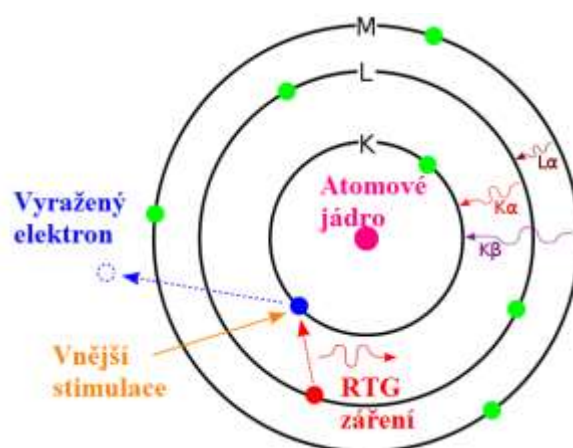
Obr. 5.3 Porovnání funkce jednotlivých mikroskopů [23]

I v případě takto tenkých vzorků je však nutno použít vysoké urychlovací napětí, které se většinou pohybuje v rozmezí 100-400 kV, aby energie elektronů byla dostatečná k průchodu vzorkem. Předmět je pak zobrazován na fluorescenčním stínítku případně pomocí CCD čipu zobrazován na monitoru počítače. Vzhledem k tomu, že při tomto typu analýzy vzorků procházejí elektrony skrze celý vzorek, je tato metoda nejen vhodná pro zkoumání vnitřních struktur vzorků jako jsou poruchy a uspořádání krystalových mřížek, ale i pro zobrazování jednotlivých atomů.

#### 5.4 Energiově-Disperzní mikroanalýza EDX [4] [5] [10] [12]

Je analytická metoda, využívaná k určení chemického složení vzorku nebo pro jeho elementární analýzu. Metoda je založená na interakci rentgenového záření se vzorkem. Základním faktem této analýzy je, že každý prvek má svou jedinečnou atomovou strukturu a energie rentgenového záření má pro každý tento prvek specifické hodnoty, které slouží k určení obsahu těchto prvků ve vzorku.

Pro stimulování emise tohoto specifického rentgenového záření je vzorek ozářen, buď paprskem vysoce nabitých částic, kterými jsou protony nebo elektrony, nebo svazkem rentgenového záření. Rentgenové záření charakteristické pro jednotlivé prvky pak vzniká tak, že po zásahu vzorku primárními elektrony jsou vyraženy elektrony z vnitřních elektronových vrstev atomů, které byly do tohoto okamžiku v základním neexcitovaném stavu. Tyto vyražené elektrony jsou následně nahrazeny elektrony z hladin



Obr. 5.5 Princip EDX analýzy [10]

s energeticky vyšším potenciálem. Rozdíl energie elektronu vyraženého a elektronu, který ho nahradil, se pak projeví jako rentgenové záření viz. obr. 5.5.

Vhodná zařízení pro tento druh analýzy jsou elektronové mikroskopy (SEM, STEM) využívající jako paprsek excitace proud elektronů. Jako další přístroj je možno uvést spektrometr, který jako budící paprsek využívá rentgenové záření. Analýza na spektrometru se nazývá rentgenová fluorescence (XRF). Oba tyto přístroje obsahují víceméně stejné vybavení. Základním prvkem je budící zdroj, kterým je elektronový nebo rentgenový paprsek. Dále pak detektor rentgenového záření, sloužící k zachycení záření a jeho převodu do napětových impulsů. Pulsní procesor, který přijímá signály z detektoru, měří je a dále je předává do analyzátoru, kde jsou data zobrazována a dále vyhodnocována. Jako nejběžnější detektor je v dnešní době využíván křemíkový detektor. Ten je nutno chladit tekutým dusíkem na kryogenní teploty. Modernější systémy bývají vybaveny křemíkovými drift detektory, které jsou chlazeny systémem dle Peltierova.

## 6 Použité stroje

Obou dělicích zařízení bylo zvoleno na základě jejich kvalitativní srovnatelnosti. Jedná se o stroje s řízením typu CNC a mohou být označeny jako jedny z velmi moderních v dnešní strojírenské výrobě.

### 6.1 Laser AMADA FO 3015/4kW [27]

Pro dělení materiálu pomocí laseru bylo zvoleno NC vyřezávacího stroje od japonské firmy Amada (Obr.6.1). Přestože byl tento stroj vyroben již v roce 2000, stále dosahuje potřebných kvalit a lze ho řadit k moderním strojům. Jedná se o vysokorychlostní, počítačem řízený, CO<sub>2</sub> laser s vysokofrekvenčním buzením výboje. Řízení paprsku je použito řídicího systému Fanuc. Pro dělení plechu se zinkovou vrstvou muselo být použito dusíku jako asistenčního plynu z důvodu reaktivity zinku na vzdušný kyslík. V případě použití reaktivního asistenčního plynu by docházelo při dělení k reakci s povrchovou vrstvou, čímž by došlo k poškození této vrstvy. V případě zinku, který za tepla reaguje na vzduchu velmi bouřlivě, by bylo velmi pravděpodobné, že dojde k poškození optiky laseru.

Tab. 6.1 Základní technické údaje dělicího laserového zařízení [27]

Současně řízené osy	X, Y, Z
Velikost pracovního prostoru	3070 x 1550 x 200 mm
Řezná rychlost	X, Y: 0 – 20 m/min
Maximální posuvová rychlost	X, Y: 80m/min; Z: 60m/min
Maximální hmotnost obrobku	850 kg
Hloubka řezu	Přibližně 27mm



Obr. 6.1 Laserové dělicí zařízení AMADA FO 3015/4kW [27]

## 6.2 Vysekávací stroj TruPunch-5000 [18]

Pro dělení materiálu vysekáváním byl zvolen vysekávací stroj od německé firmy Trumpf (Obr.6.2). Tento stroj se vyznačuje vysokou produktivitou a vysokým stupněm automatizace. Na tomto vysekávacím stroji je též možno vyrábět bez zbytkových mříží a současně bez poškrábání materiálu. Stroj také disponuje osou C, která zvyšuje rychlost obrábění, případně umožňuje i tváření, například závitů. Řízení stroje je obstaráváno řídicím programem Sinumeric.

Tab. 6.2 Základní technické údaje vysekávacího zařízení [18]

Současně řízené osy	X, Y, C
Velikost pracovního prostoru	2500 x 1250 mm
Maximální tloušťka plechu	8mm
Maximální posuvová rychlost	X: 100m/min; Y: 60m/min X, Y součastně: 116m/min
Osa C	330 ot/min
Maximální hmotnost obrobku	200 kg
Maximální počet zdvihů	2800 min <sup>-1</sup>
Maximální vysekávací síla	220kN



Obr. 6.2 Vysekávací zařízení TruPunch-5000 [18]

## 7 Vyhodnocení vtažení zinkové vrstvy do oblasti řezu

Experiment vyhodnocování stupně vtažení zinkové vrstvy do oblasti řezu při použití uvedených technologií dělení vycházel z daných předpokladů.

Při dělení materiálu laserovým paprskem je materiál v místě řezu taven a vyfukován asistenčním plynem z místa řezu. Jako asistenčního plynu musí být využito netečného plynu, který nezpůsobí oxidační reakci zinkové vrstvy. Při tavení a následném odvodu materiálu tedy může dojít k ulpění zinkových částic v ploše řezu. Při porovnání s přesným vysekáváním se však jedná o méně pravděpodobnou variantu vtažení zinkové vrstvy do oblasti řezu s přihlédnutím k rychlosti proudícího asistenčního plynu.

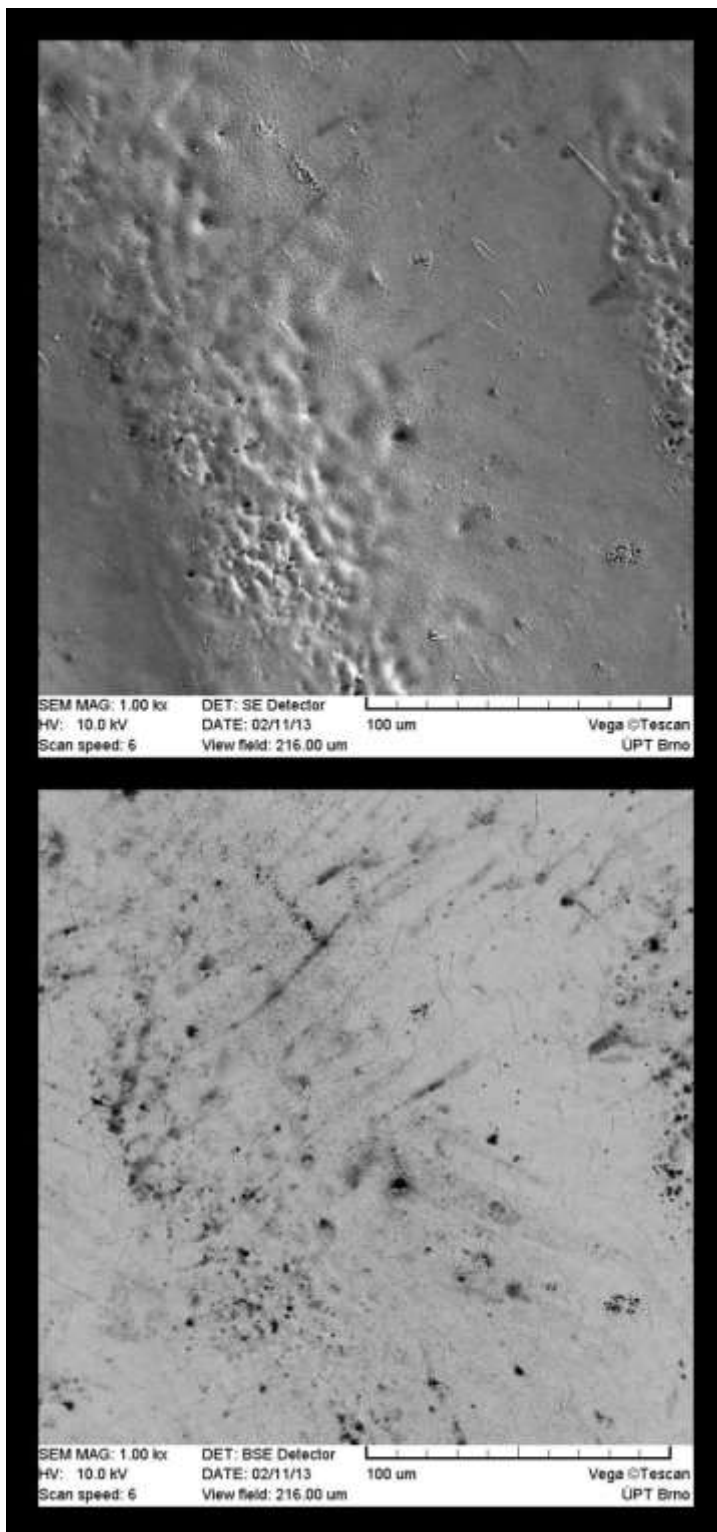
Vtažení zinkové vrstvy při dělení použitím technologie přesného vysekávání je z hlediska principu dělení materiálu střížným procesem daleko pravděpodobnější. Neboť jak již bylo uvedeno v kapitole 3.1 (Princip přesného vysekávání) střížná plocha obsahuje tři oblasti, přičemž oblast I. je oblastí pružné deformace a oblast II. je oblastí plastické deformace. V těchto oblastech je materiál střížníkem vtlačován do matrice, dochází ke kluzu ve střížné rovině materiálu a je zde předpoklad vtažení vrstvy zinku do oblasti stříhu.

### 7.1 Vyhodnocení řezné plochy pomocí SEM

Při vyhodnocování pomocí elektronové mikroskopie bylo využito elektronového skenovacího mikroskopu. Byly pořízeny snímky jak v režimu SE – sekundárních elektronů, tak v režimu BSE – zpětně odražených elektronů. Při vyhodnocování snímků z elektronových mikroskopů je pro správnou interpretaci nutné, aby vyhodnocující osoba měla dostatečné zkušenosti a praxi v určování informací, které daný snímek poskytuje. Přesto jde při vyhodnocování touto metodou o subjektivní závěry, které je nutno doplnit o informace a analýzy, které tyto závěry zobjektivizují.

➤ **Zinkovaný plech dělený laserovým paprskem**

Po dělení zinkovaného plechu laserem byly pořízeny na elektronovém mikroskopu následující fotografie. Prvotní snímky (Obr.7.1) zobrazují plochu řezu v tisícinásobném zvětšení.



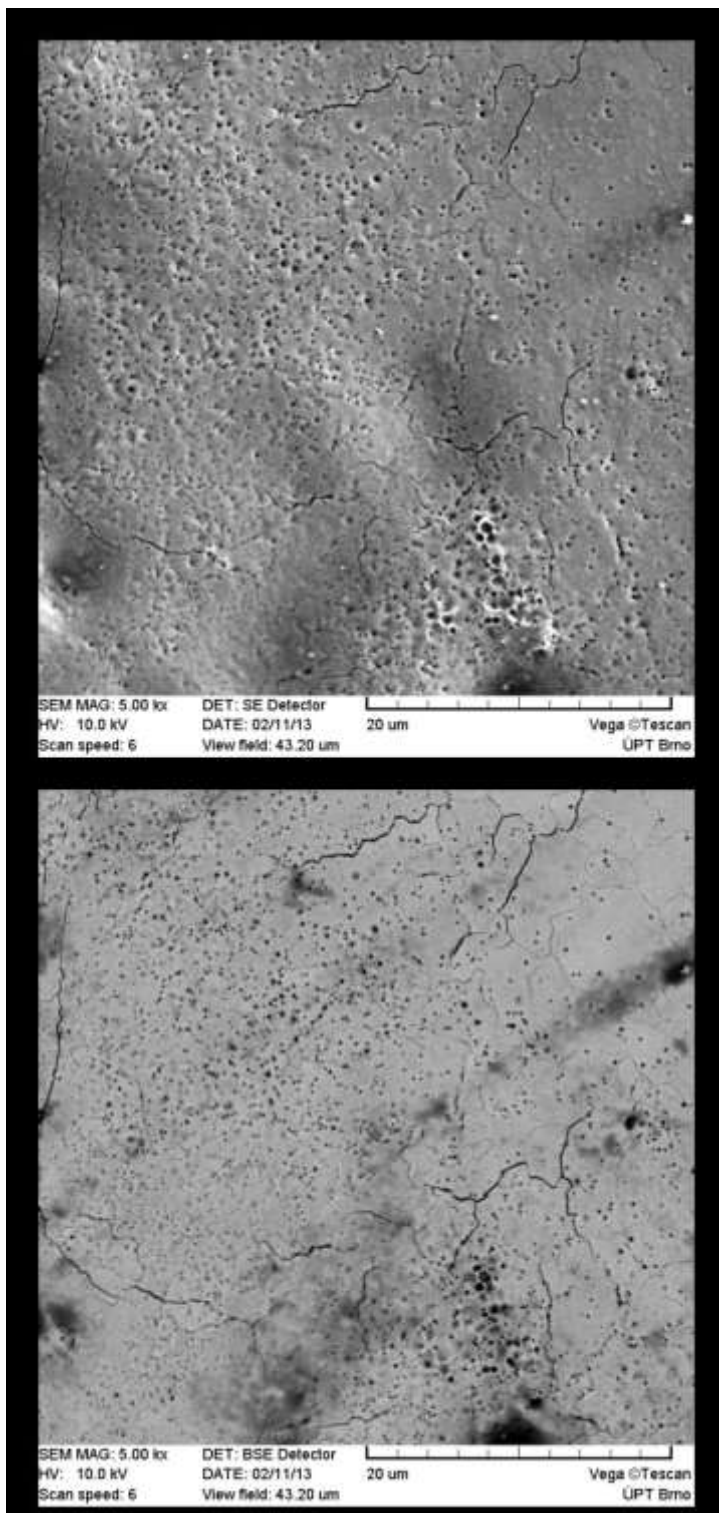
Snímek (7.1 vrchní) je snímek pořízený detektorem prošlých elektronů (SE). Na tomto snímku nejsou zřetelné žádné hranice, které by ukazovaly na možnost výskytu zinkového pole, které by bylo přímo vtažené z povrchové vrstvy. Materiál se zdá být homogenním.

Zvlněné oblasti, které jsou zřetelnější na obr.7.1 (vrchním), jakožto černé oblasti nejsou považovány za vměstky či nečistoty ale jedná se pravděpodobně o jevy způsobené tepelným působením a prouděním plynu při dělení materiálu. Viz. obr. 2.10 v kapitole 2.3.1

Na snímku 7.1 (spodním) je zobrazena stejná oblast jako na snímku předchozím. Snímek je pořízen detektorem zpětně odražených elektronů a víceméně potvrzuje předchozí určení. Materiál bez jakékoliv hranice přechodu dvou rozdílných oblastí/materiálů. Z této fotky je zřetelnější homogenita materiálu.

Obr. 7.1 SEM analýza laserového řezu – 1000x zvětšeno

Následující snímek (Obr. 7.2) byl pořízen se zvětšením 5000x. Oblast, která byla zvětšena, je středová oblast předchozího snímku (Obr.7.1) a byla vybrána z důvodu lepší interpretace tmavých oblastí fotografie.

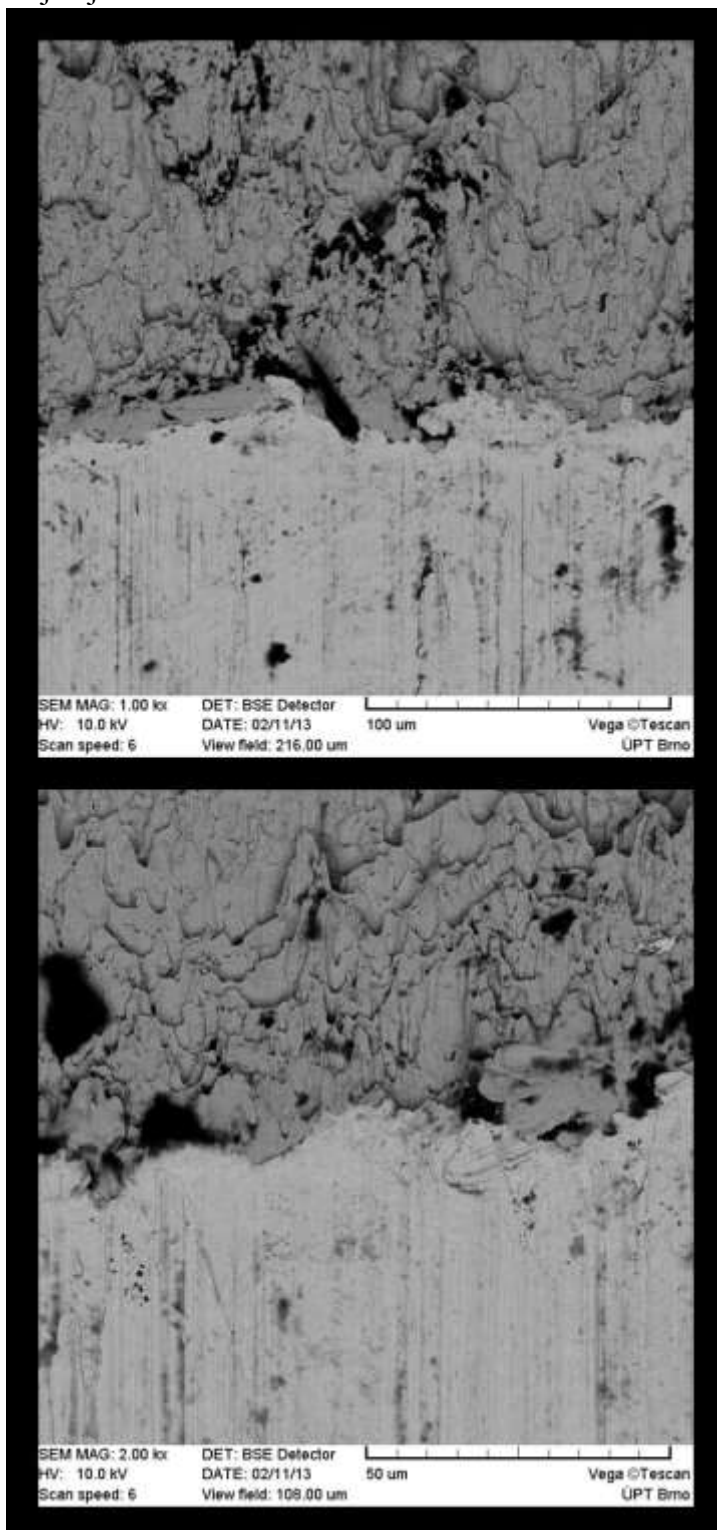


Obr. 7.2 SEM analýza laserového řezu – 5000x zvětšeno

Stejně jako u předchozího snímku (7.1) se nenachází ani na jeho zvětšené oblasti jakákoliv oblast, která by mohla být určena jako známky zinkové vrstvy vzniklé dělením materiálu. Sporné oblasti v podobě černých bodů v oblasti řezu se podobají bublinám vzniklým při tepelném působení laseru na materiál. Tomuto faktu naznačují i černé vlasové stopy které jsou zvláště viditelné na fotografii pořízené v BSE režimu (Obr.7.1 dolní). Tyto stopy mohou být určeny pravděpodobně jako mikrotrhliny v povrchové tepelně ovlivněné vrstvě a jsou pravděpodobně způsobeny rychlým ohřevem a chladnutím, které je charakteristické pro dělení laserem

➤ **Zinkovaný plech dělený vysekáváním**

Po dělení zinkovaného plechu technologií přesného vysekávání byly pořízeny na elektronovém mikroskopu následující fotografie. Prvotní snímky (Obr.7.3) zobrazují plochu řezu stejně jako u dělení laserem v tisícinásobném zvětšení

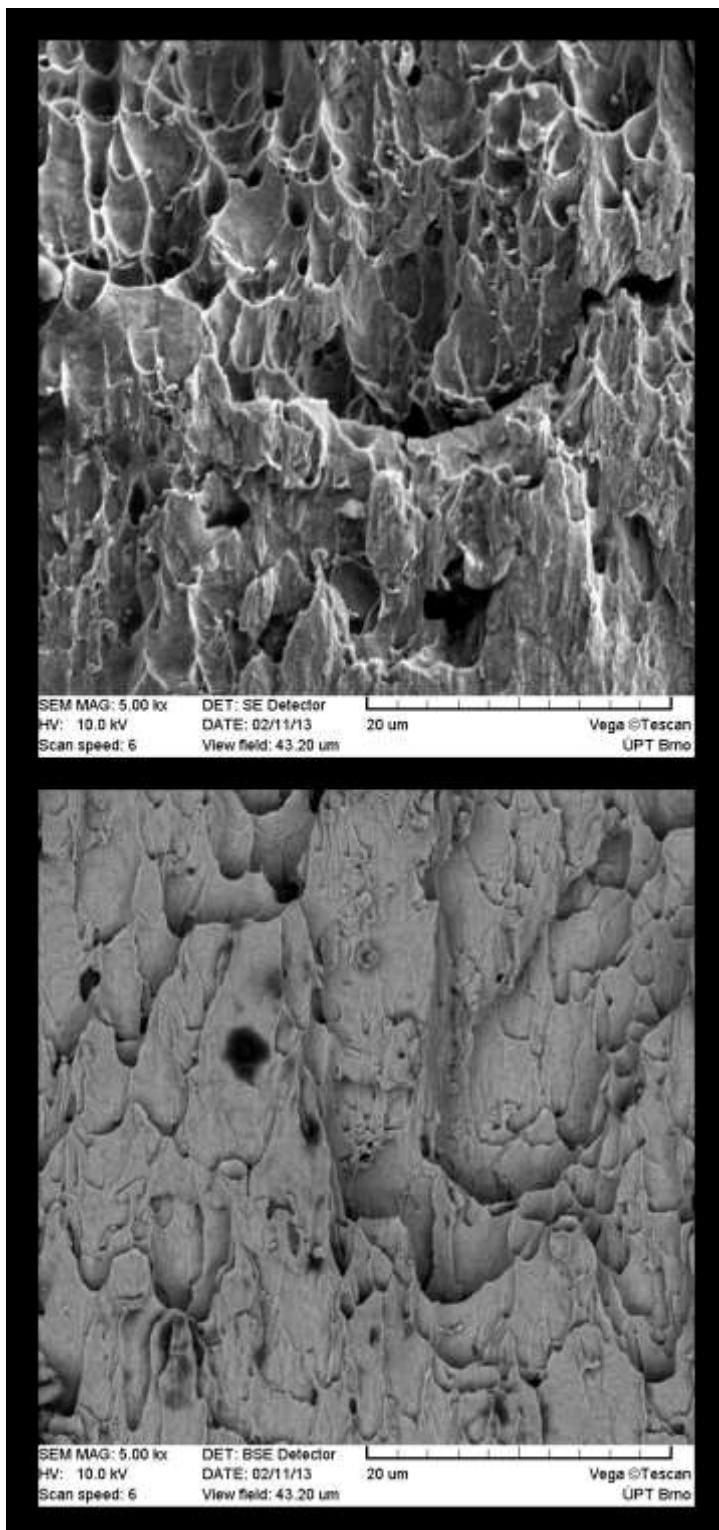


Oba snímky z obr. 7.3 byly pořízeny v režimu snímání zpětně odražených elektronů BSE. Tento režim byl využit, protože ze snímků jsou zde jasně zřetelné hranice přechodu jednotlivých materiálů. V tomto případě se tedy jedná s nejvyšší pravděpodobností o přechod zinková vrstva-ocel. Ve vrchní části snímků je zřetelně vidět posun jednotlivých vrstev materiálu ve směru pohybu střížníku. Tedy z vrchu dolů. Tento posun je zřetelnější na snímku spodním (Obr.7.3 spodní) Ve spodní části snímků jsou pak vidět jednotlivé stopy zanechané střížníkem při dalším průchodem skrze materiál.

Obr. 7.3 SEM analýza přesného vysekávání – 1000x zvětšeno

Následující snímek (Obr. 7.4) byl pořízen se zvětšením 5000x. Zvětšená oblast je vrchní oblastí z předchozího snímku a jedná se tedy o část, kde je předpokládána zinková oblast vtažená z povrchové vrstvy plechu.

Na těchto snímcích (Obr. 7.4), začínají být zřetelná jednotlivá zrna materiálu. A to zvláště pak v režimu snímání SE (Obr.7.4 horní)



Obr. 7.4 SEM analýza přesného vysekávání – 5000x zvětšeno

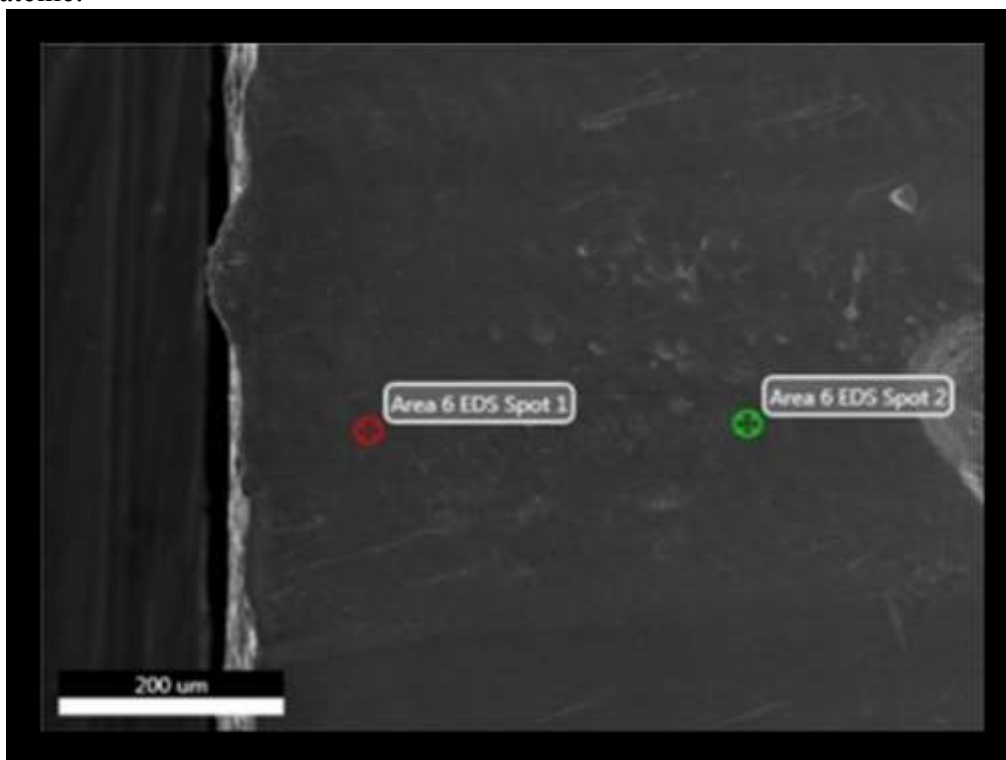
## 7.2 Vyhodnocení řezné plochy pomocí analýzy EDX

Jak již bylo uvedeno na začátku předchozí kapitoly, vyhodnocení pouze fotek z elektronového mikroskopu není dostatečně objektivní pro vyvození požadovaných závěrů, neboť hodnotícím subjektem je člověk, jehož znalosti a pohled na problematiku nemusí být dostačující.

Proto je využito energiově disperzní mikroanalýzy (EDX). Díky této analýze je možno určit přesný obsah požadovaných prvků v dané ploše a proto je možné uvést závěry z dané analýzy za objektivní. Neboť hlavním objektivním vyhodnocovacím prostředkem je analyzační software a na osobu provádějící analýzu zbývá jenom slovní interpretace těchto závěrů.

### ➤ Zinkovaný plech dělený laserovým paprskem

Jako první v tomto případě byla provedena analýza bodová. Protože ze samotného elektronového snímku není zřetelný jakýkoliv rozdíl v ploše, byly umístěny pouze dva body (Obr.7.5). Jeden blíže povrchu materiálu a druhý ve stejné přímce pouze ve větší vzdálenosti od povrchu. Díky této analýze je možno určit zdali plocha neobsahuje stopové množství ze zinkového povlaku materiálu, které by bylo na elektronovém mikroskopu okem nerozpoznatelné.

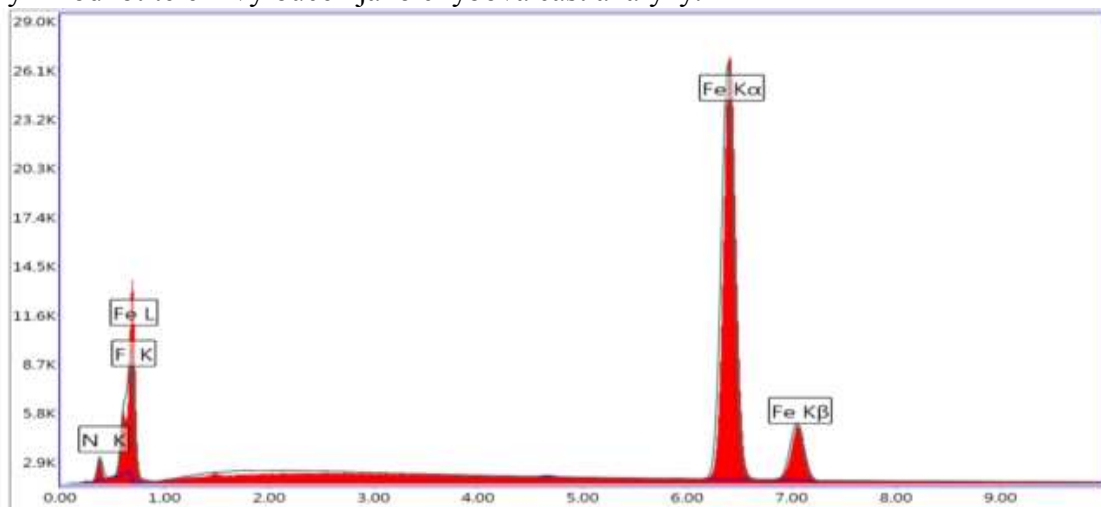


Obr. 7.5 Bodová EDX analýza řezu laserem

Jedním z výstupů této bodové analýzy bylo grafické vyjádření zastoupení hledaných prvků viz. obr.7.6 pro bod první a obr.7.7 pro bod druhý. Toto prvkové zastoupení je v grafech uváděno v hmotnostních procentech. Jako hlavní určující informace, která udávala přesné hodnoty zastoupení jednotlivých prvků, byly tabulky získané tímto měřením viz. tab.7.1 a tab. 7.2 V těchto tabulkách je zastoupení jednotlivých prvků uváděné jak v procentech hmotnostních, tak v procentech atomových. Třetím sloupcem tabulek je udávána relativní intenzita signálu jdoucí do detektoru a čtvrtý sloupec udává signál na pozadí měřeného signálu, který lze označit jako signál chybový.

Z údajů získaných za pomoci bodové EDX analýzy bylo určeno, že nebyly zachyceny známky vtažení zinkové vrstvy do oblastí řezu. A to ani v bodě prvním ani v bodě druhém. Detektorem a následně počítačem vyhodnocen byl prvek Fluor. V tomto případě však lze říci, že se jedná o počítačem chybně vyhodnocenou část signálu. Případně může nastat situace,

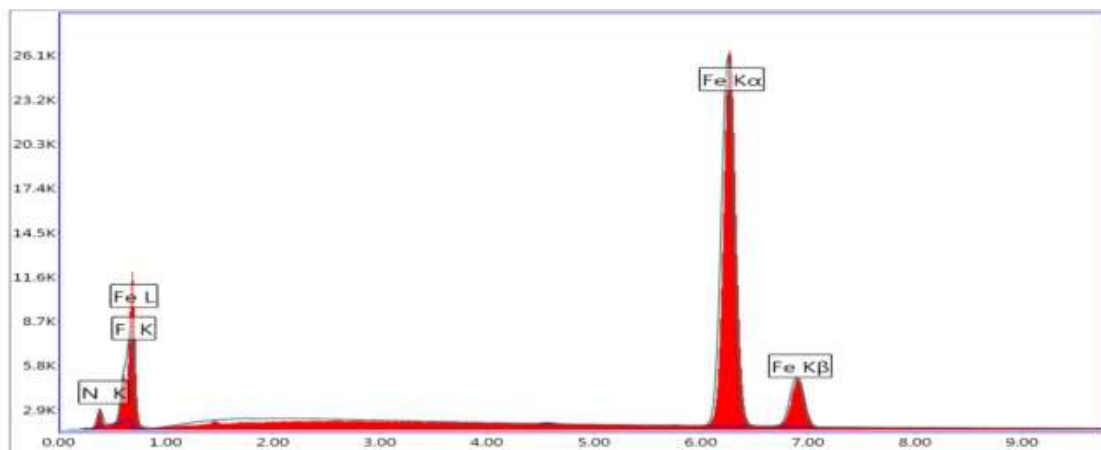
kdy byl z ocelového materiálu vyražen elektron z energetické hladiny takové, která je totožná s některou z energetických hladin fluoru. Prvek fluor jako takový pak může být z analýzy lidským hodnotitelem vyloučen jako chybová část analýzy.



Obr. 7.6 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 1 - Laser

Tab. 7.1 Bod 1 Analýza EDX - Laser

Prvek	Hmotnost %	Atomic %	Net Int.	Net Int.
N K	6,37	20,85	376,48	0,02
F K	1,45	3,49	469,54	0,03
Fe K	92,18	75,66	16673,97	0

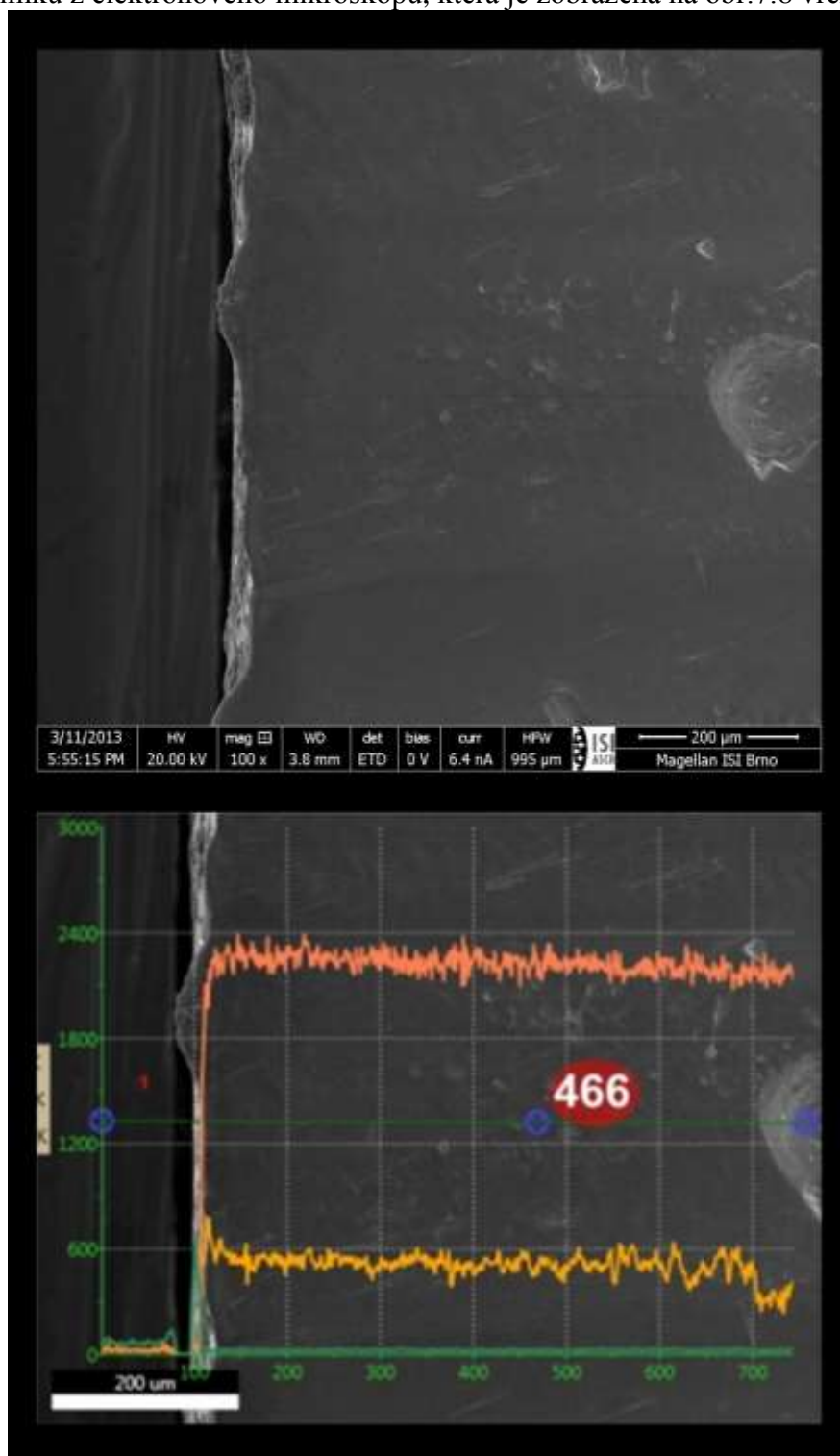


Obr. 7.7 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 2 - Laser

Tab. 7.2 Bod 2 Analýza EDX - Laser

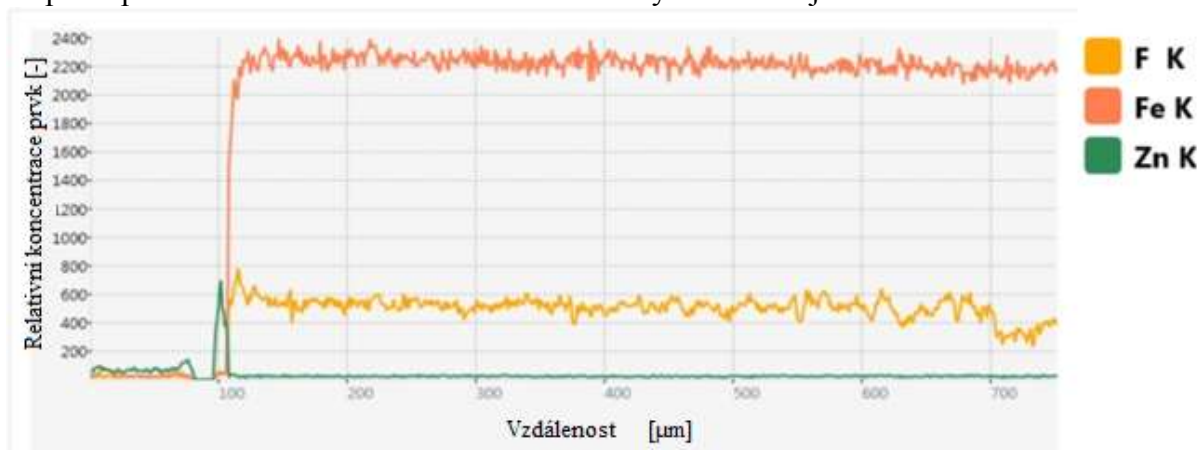
Prvek	Hmotnost %	Atomic %	Net Int.	Net Int.
N K	5,54	18,49	310,06	0,02
F K	1,45	3,58	457,98	0,03
Fe K	93,01	77,93	16047,03	0

Přestože při bodové EDX analýze bylo určeno, že se v daných bodech nenachází žádné stopové množství zinku, byla provedena i čárová analýza přes celou tloušťku plechu tzv. Linescan. Pro analýzu relevantní část je zobrazena viz. obr. 7.8 spodní. Teoreticky mohla nastat situace, kdy by jednotlivé body byly rozmístěny tak, že by se nacházeli v bodě zinek neobsahující, přestože by mohl být v některém místě plochy přítomen. Při analýze byla použita část snímku z elektronového mikroskopu, která je zobrazena na obr.7.8 vrchním.



Obr. 7.8 EDX Linescan laserového řezu

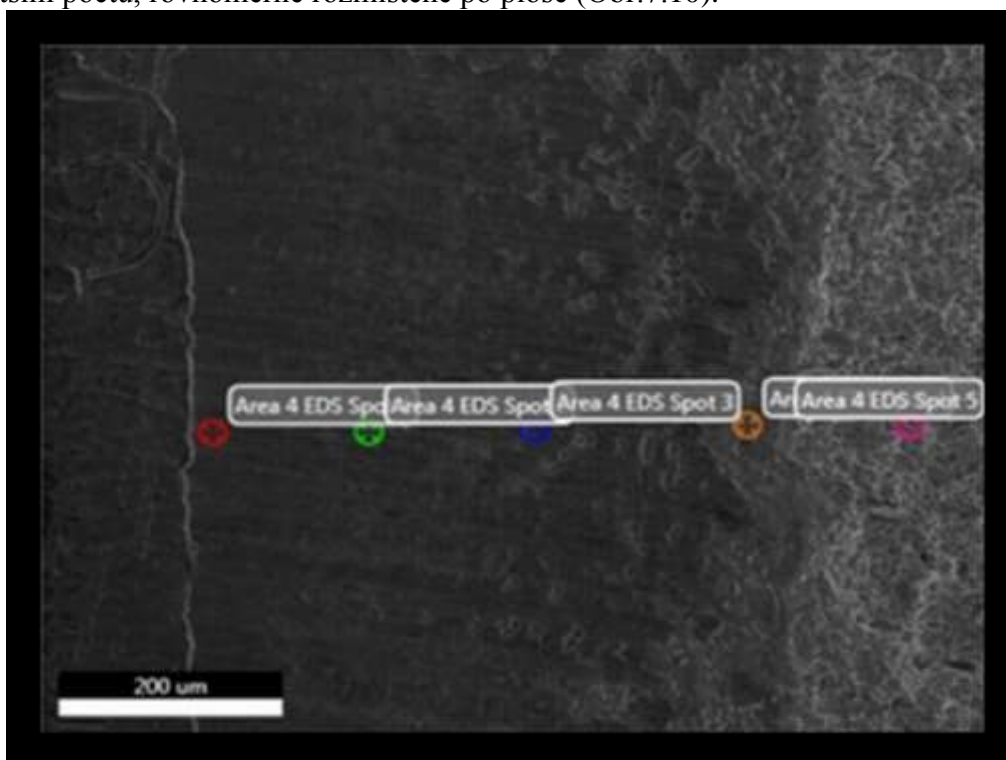
Ze snímku EDX analýzy laserového řezu byl extrahován graf znázorňující relativní koncentrace jednotlivých prvků v závislosti na vzdálenosti na hloubce řezu viz. obr. 7.9. Povrch plechu, tj. začátek zinkové vrstvy, byl umístěn na hodnotu 100  $\mu\text{m}$ . Před tímto bodem je možno pozorovat jistou hodnotu zinku, která byla zachycena ze vzdálenější plochy šikmo umístěného vzorku a v analýze ji není nutno brát v potaz. Na počátku analyzovaného povrchu tj. 100  $\mu\text{m}$  je patrný v malé oblasti nárůst koncentrace zinku, což je oblast odpovídající pouze povrchové zinkované vrstvě plechu. Pod touto vrstvou je zřejmé, že zinek nadále není v této řezné ploše přítomen a hodnota vtažení zinku může být označena jako nulová.



Obr. 7.9 Graf EDX Linescan laserového řezu

➤ **Zinkovaný plech dělený vysekáváním**

I u plechu děleného přesným vysekáváním, kde byla již pouze z pořízené fotografie zřetelná hranice přechodu vtažená vrstva-základní materiál, byla prvně provedena EDX bodová analýza. Stejně jako v předchozím případě byly body uspořádány v přímce tentokrát však ve větším počtu, rovnoměrně rozmístěné po ploše (Obr.7.10).



Obr. 7.10 Bodová EDX analýza přesného vysekávání

Výstupní hodnoty z této analýzy byly již přiblíženy v bodové analýze laserem řezaného plechu. Při analýze vysekávání byly naměřeny následující hodnoty určující obsah hledaných prvků v řezné ploše.

V bodě jedna byly analyzovány prvky, určující přítomnost vtažené zinkové vrstvy do oblasti řezu. Z uvedených hodnot (Obr.7.11, Tab 7.3) je patrné že zinková vrstva, která mimo jiné obsahuje i značné množství hliníku, zde převládá nad hodnotami železa, poukazujícího na vlastní ocelový plech.

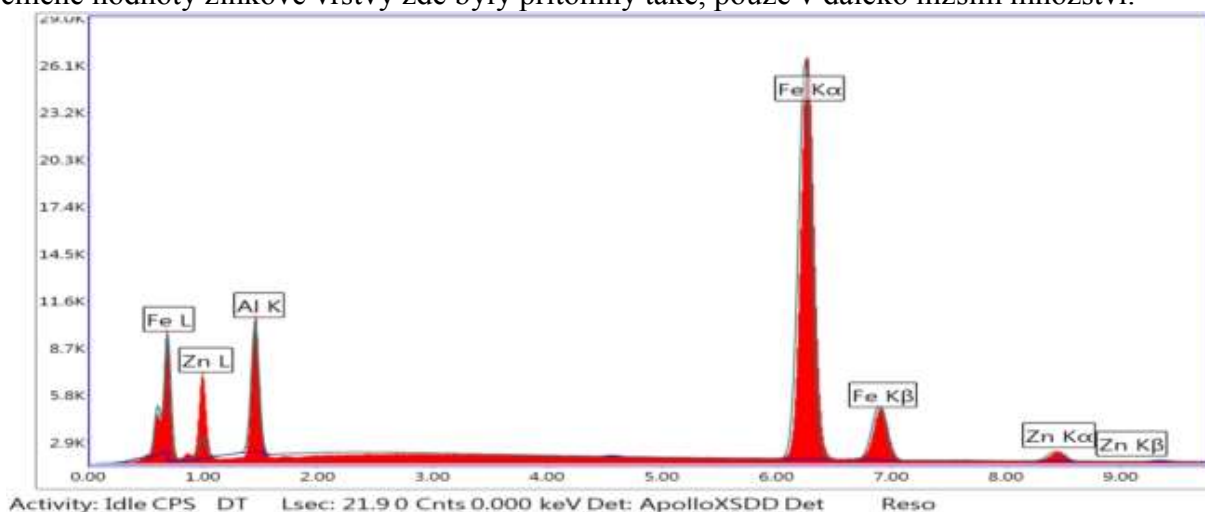


Obr. 7.11 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 1 - Vysekávání

Tab. 7.3 Bod 1 Analýza EDX - přesné vysekávání

Prvek	Hmotnost %	Atomic %	Net Int.	Net Int.
Al K	61,83	79,44	21667,11	0
Fe K	3,58	2,22	646,19	0,02
Zn K	34,59	18,34	2827,91	0,01

Z bodu dva (Obr.7.12 a Tab.7.4) je patrné, že v tomto místě došlo k narušení vtažení zinkové vrstvy. Hodnoty naměřeného železa zde byly diametrálně odlišné od bodu jedna. Nicméně hodnoty zinkové vrstvy zde byly přítomny také, pouze v daleko nižším množství.

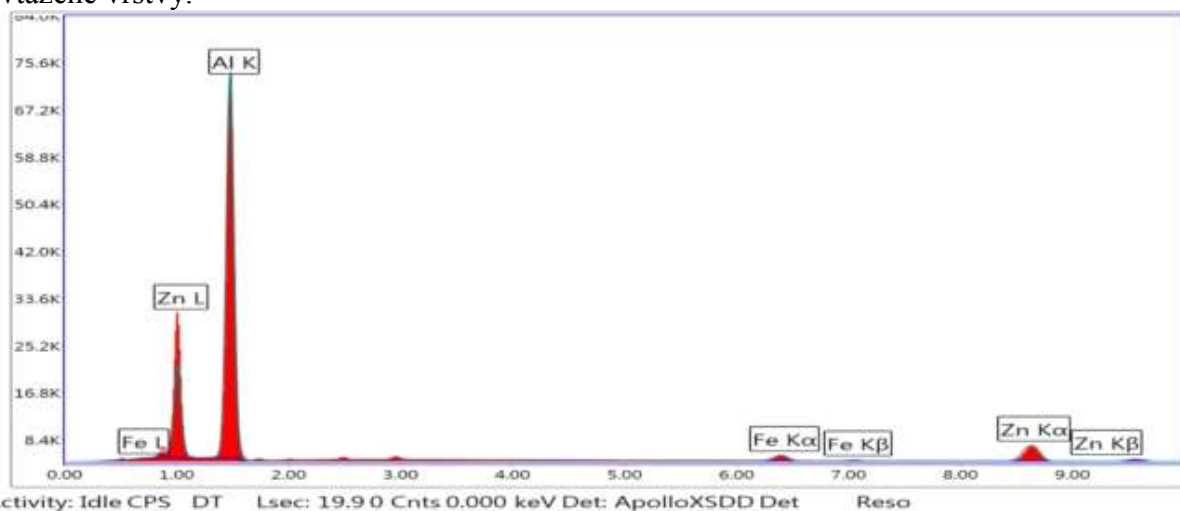


Obr. 7.12 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 2 – Vysekávání

Tab. 7.4 Bod 2 Analýza EDX - přesné vysekávání

Prvek	Hmotnost %	Atomic %	Net Int.	Net Int.
Al K	10,37	19,45	3173,03	0,01
Fe K	84,54	76,61	17180,7	0
Zn K	5,09	3,94	483,12	0,03

V bodě tři (Obr.7.13 a Tab 7.5) byly opět naměřeny hodnoty značící převládající vtažení zinkové vrstvy. Je tedy pravděpodobné, že přechází bod dva byl pouze lokálním narušením této vtažené vrstvy.

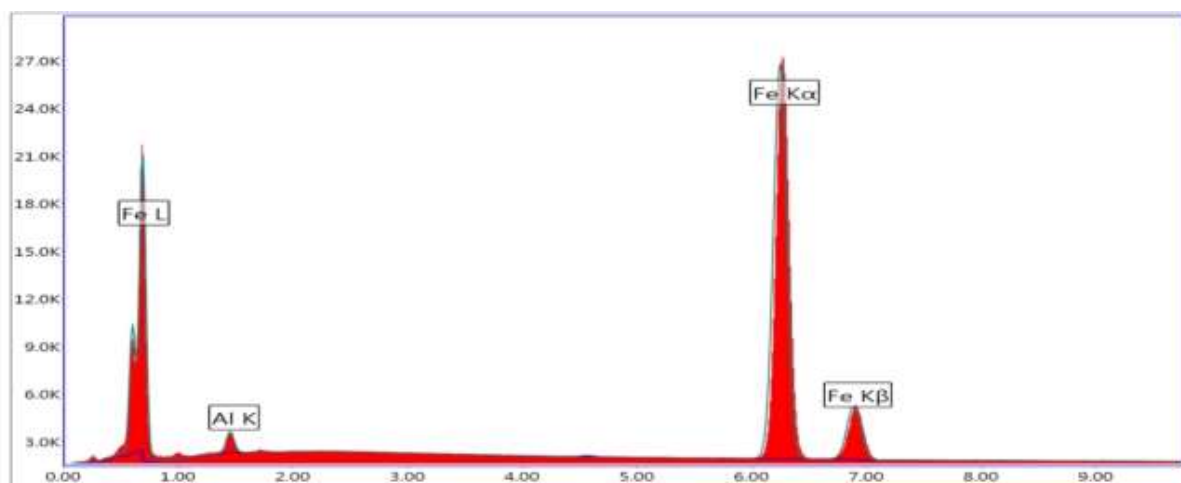


Obr. 7.13 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 3 – Vysekávání

Tab. 7.5 Bod 3 Analýza EDX - přesné vysekávání

Prvek	Hmotnost %	Atomic %	Net Int.	Net Int.
Al K	68,96	84,05	30193,78	0
Fe K	3,85	2,26	752,66	0,02
Zn K	27,2	13,68	2464,21	0,01

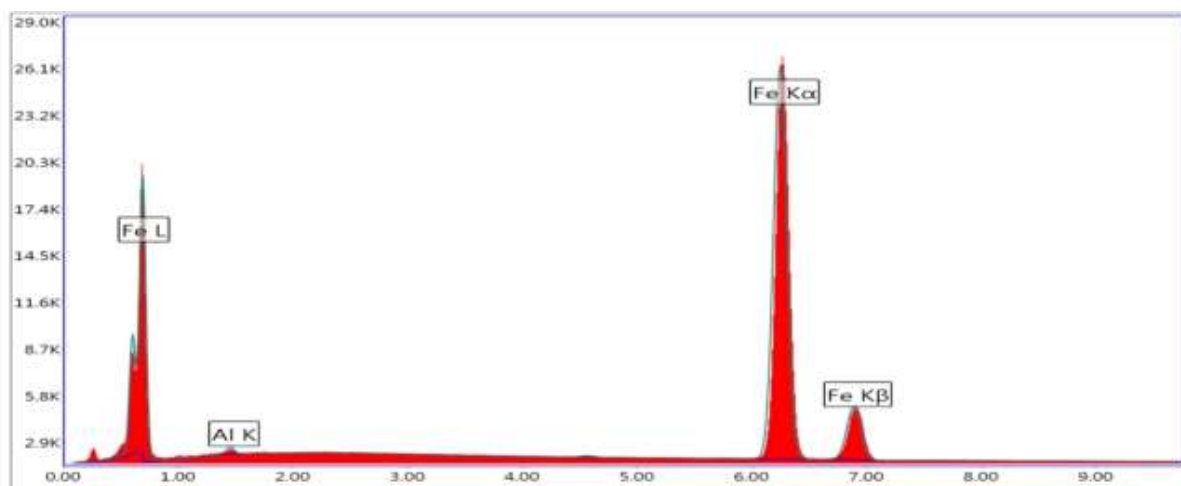
V bodě čtyři a pět (Obr. 7.14, obr.7.15, Tab.7.6 a tab 7.8) bylo analyzováno již úplné vymizení zinku a byly zde zjištěny pouze zbytkové hodnoty hliníku pocházející ze zinkované vrstvy. Hlavní zastoupení zde má však železo značící vlastní ocelový plech.



Obr. 7.14 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 4 - Vysekávání

Tab. 7.6 Bod 4 Analýza EDX - přesné vysekávání

Prvek	Hmotnost %	Atomic %	Net Int.	Net Int.
Al K	2,07	4,2	560,42	0,02
Fe K	97,93	95,8	18340,21	0

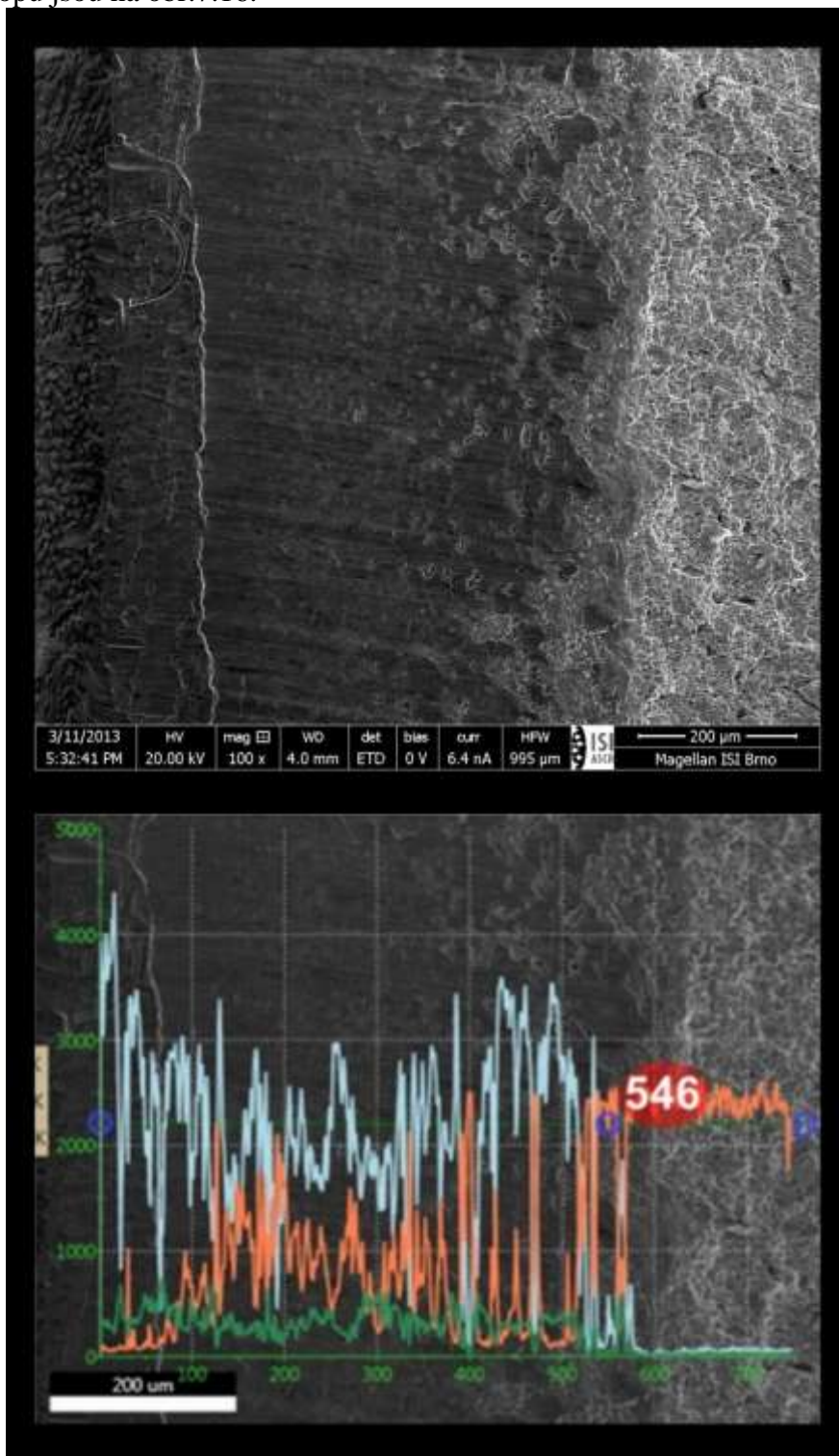


Obr. 7.15 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 5 - Vysekávání

Tab. 7.7 Bod 5 Analýza EDX - přesné vysekávání

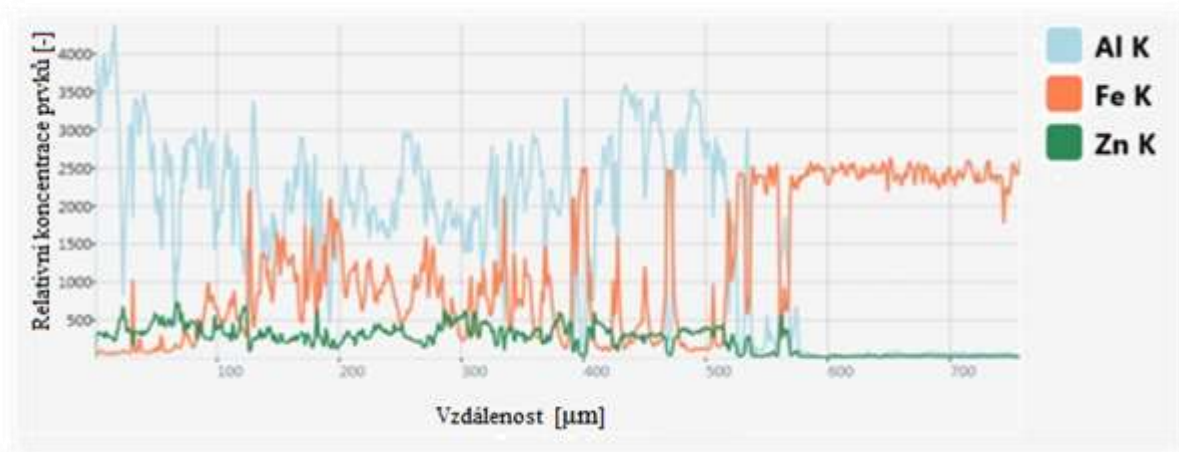
Prvek	Hmotnost %	Atomic %	Net Int.	Net Int.
Al K	0,69	1,42	170,45	0,02
Fe K	99,31	98,58	17202,21	0

Při bodové analýze vzorku děleného přesným vysekáváním bylo stanoveno, že analyzovaná plocha zinek vtažený z povrchové vrstvy obsahuje. Následně tedy byla provedena čárová analýza přes daný průřez plechu (Linescan) pro přesnější vyhodnocení této plochy a zinkové vrstvy do této plochy vtažené. Výsledek linescan analýzy a snímek z elektronového mikroskopu jsou na obr.7.16.



Obr. 7.16 EDX Linescan přesného vysekávání

Stejně jako u laserového řezu byl i u vysekávání extrahován graf ze snímku EDX analýzy, který znázorňuje relativní koncentraci prvků na hloubce řezu. viz. obr. 7.17. Z tohoto grafu je patrné, že je již od samotného povrchu přítomna jistá koncentrace zinku, která je zaznamenána až do vzdálenosti přibližně 570  $\mu\text{m}$  od povrchu. Do stejné vzdálenosti od povrchu byla naměřena také poměrně vysoká koncentrace hliníku, který je však běžně přítomen v zinkovacích lázních a při kontinuálním žárovém zinkování plechů může tato lázeň obsahovat až 55 % hliníku. Tato zinkovací lázeň má pak obchodní označení Aluzink. Za hranicí 500  $\mu\text{m}$  pak koncentrace zinku i hliníku klesají přibližně na padesáti mikrometrech až na nulu, což lze vysvětlit jako postupné ztenčování vrstvy a dále jsou měřeny jenom hodnoty železa, což naznačuje pouze ocelový plech bez pokračování vtažení této zinkové vrstvy. V bodové analýze však byl označen bod dva, který určoval pokles zinkové vrstvy a vyšší hodnoty železa. V grafu EDX linescanu tento bod odpovídá přibližně hodnotě 200  $\mu\text{m}$  vzdálenosti od povrchu je zde tento bod patrný.



Obr. 7.17 Graf EDX Linescan přesného vysekávání

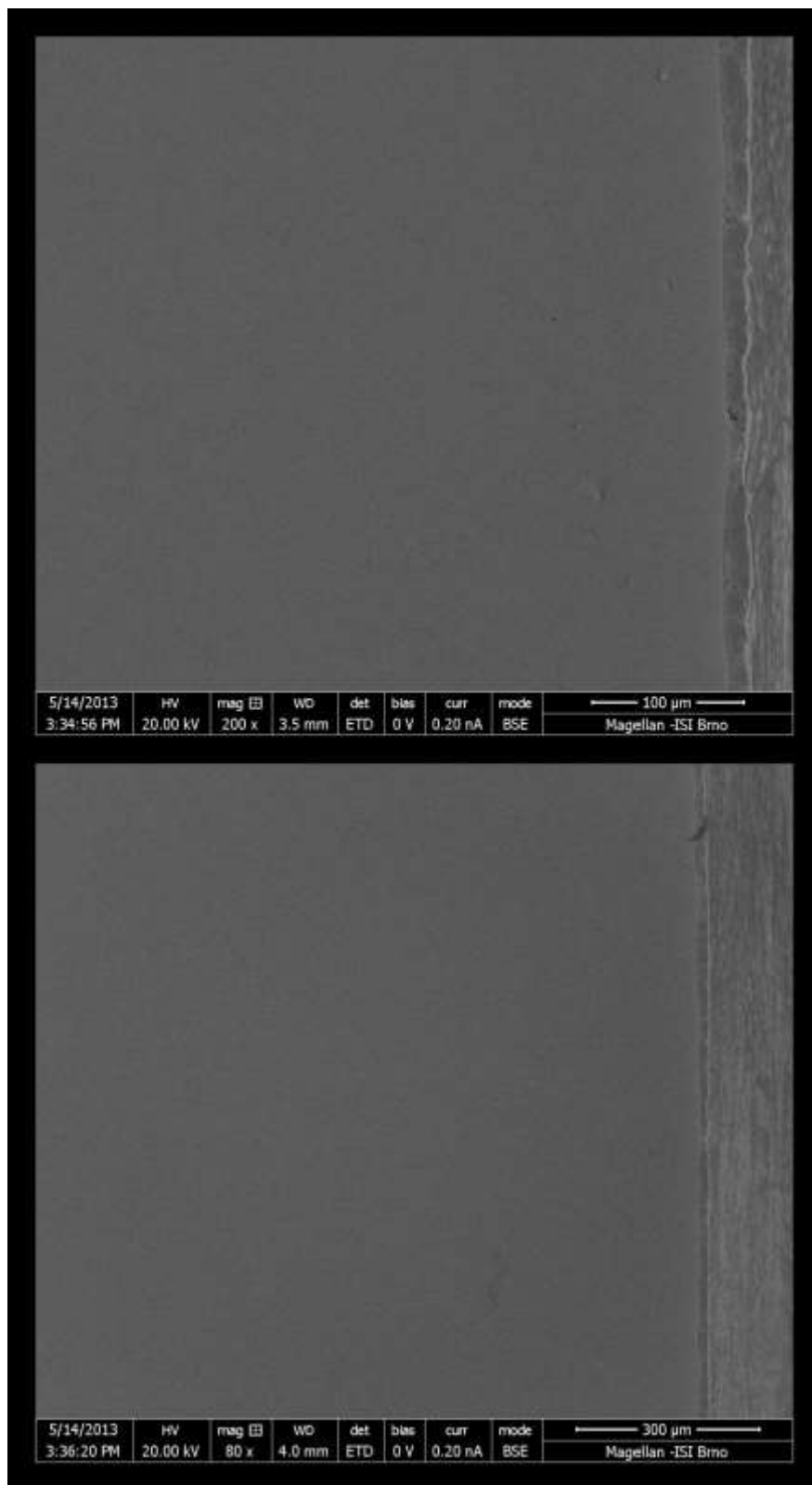
### 7.3 Vyhodnocení tloušťky vtažené zinkové vrstvy

Při EDX analýze řezné plochy plechu, bylo prokázáno, že ke vtažení zinkové vrstvy do oblasti řezu, dochází pouze při dělení přesným vysekáváním. Při dělení laserovým paprskem

k žádnému vtažení nedochází, a proto nebylo nutno tento vzorek dále zkoumat. Při dělení přesným vysekáváním však bylo nutno zjistit tloušťku této vrstvy vtažené do oblasti řezu. Byl tedy proveden řez kolmý k řezné ploše a za pomoci elektronové mikroskopie byly vytvořeny snímky, které ukazují tuto požadovanou plochu.

Na přiloženém obrázku (obr.7.18) jsou zobrazeny dva snímky z elektronového mikroskopu. Z těchto snímků je patrná zinková vrstva, která má po celé své délce relativně konstantní hodnotu tloušťky. Tento fakt je lépe viditelný na snímku 7.18 vrchním.

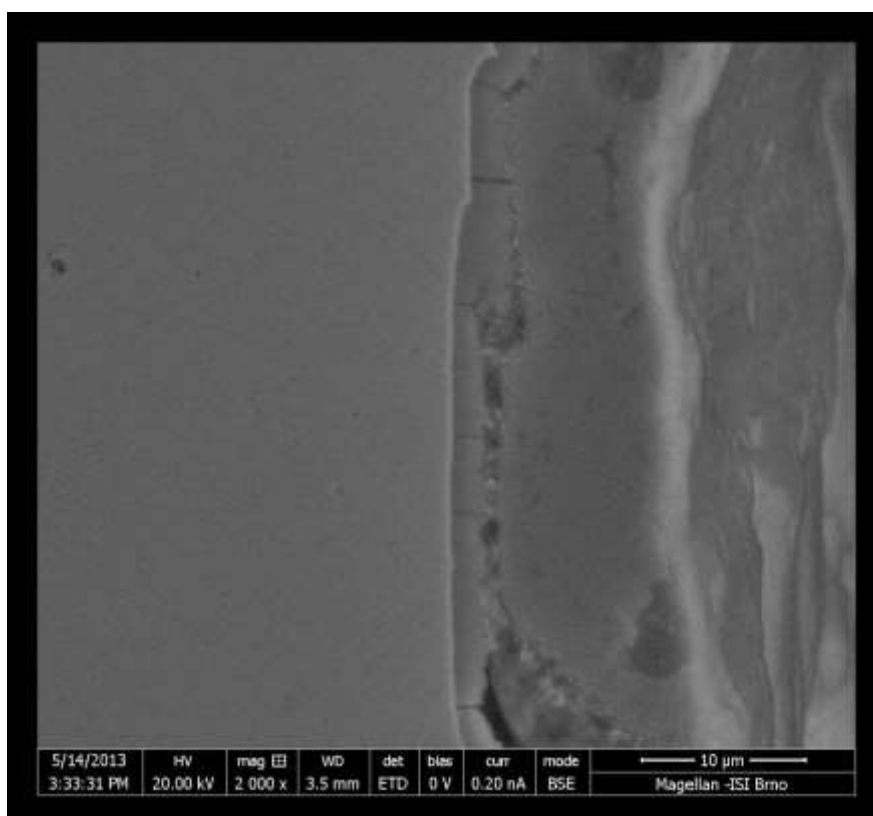
Na snímku spodním je patrný délkový rozsah této vrstvy. Ze snímku 7.18 spodním je možno určit že zinková vrstva je přítomna po celé výšce snímku, která je přibližně jeden milimetr. Tento fakt je nutno označit jako značně pochybný neboť při EDX analýze vtažená nulová zinková vrstva byla naměřena přibližně do hloubky 570  $\mu\text{m}$ .



Obr. 7.18 Tloušťka vtažené zinkové vrstvy

Dále pak byl pořízen snímek (obr.7.19) s vysokým přiblížením, ze kterého je možno určit samotnou tloušťku tohoto povlaku. Ze snímku je možno určit, že tato zinková vrstva má průměrnou tloušťku 15  $\mu\text{m}$ .

S přihlédnutím k faktu, že takto silný povlak je viditelný po celé výšce přechozích snímku (obr.7.18), je nutno konstatovat, že mohla nastat situace, kdy byly obsluhou mikroskopu pořízeny snímky zinkového povlaku na povrchu plechu a nikoliv snímky tloušťky vtažené zinkové vrstvy. Tomuto tvrzení přispívá i fakt, že předpokládaným průběhem tloušťky vtažené zinkové vrstvy by mělo být postupné ztenčování se této vrstvy, nikoliv konstantní tloušťka vtažení.



Obr. 7.19 Detail tloušťky vtažené zinkové vrstvy

## 8 Technicko-ekonomické zhodnocení [16]

Z předchozích analýz vyplývá, že pokud bude plech dělen pomocí vysekávání, je díky vtažené zinkové vrstvě zvýšena korozní odolnost řezné hrany. Pokud však bude dělení provedeno pomocí laserového řezání a k vtažení zinku nedojde. Jeli však nutno protikorozně ošetřit díly dělené pomocí laseru, je nutno vzít v úvahu, zdali není výhodnější vyřezat laserem díly z běžného plechu nemajícího zinkovou vrstvu a tyto díly následně pozinkovat.

Následně je tedy nutno porovnat ekonomické aspekty jednotlivých metod. Pro toto hodnocení bylo využito modelové situace, při které byl použitým polotovarem materiál typu plech o rozměrech 1x2 metry a tloušťky 1 mm. Využitelnost materiálu byla zvolena méně příznivá a to 50 %. Následně byly zjištěny cenové parametry zvolených plechů viz. tab.8.1.

Tab. 8.1 Cenové parametry plechů [16]

	Váha plechu [kg]	Cena plechu [Kč]	Cena jednoho kilogramu plechu [Kč/kg]
Plech pozinkovaný 1mm - 1x2m	16	462,86	28,93
Plech bez povrchové úpravy 1mm - 1x2m	16	385,53	24,10

Ze zjištěných cen je zřejmé, že plech upravený zinkovou vrstvou je dražší. Cena této zinkované vrstvy jednoho plechu je 77,33 Kč, převedeno na kilogram 4,83 Kč/kg plechu

U situace kdy je využit plech bez zinkované vrstvy a tato vrstva je dodána následovně po samotné dělicí operaci bylo nutno zjistit cenu zinkování jednotlivých dílů. Ceny zinkování jsou počítány na kilo zinkovaného materiálu dle tab 8.2.

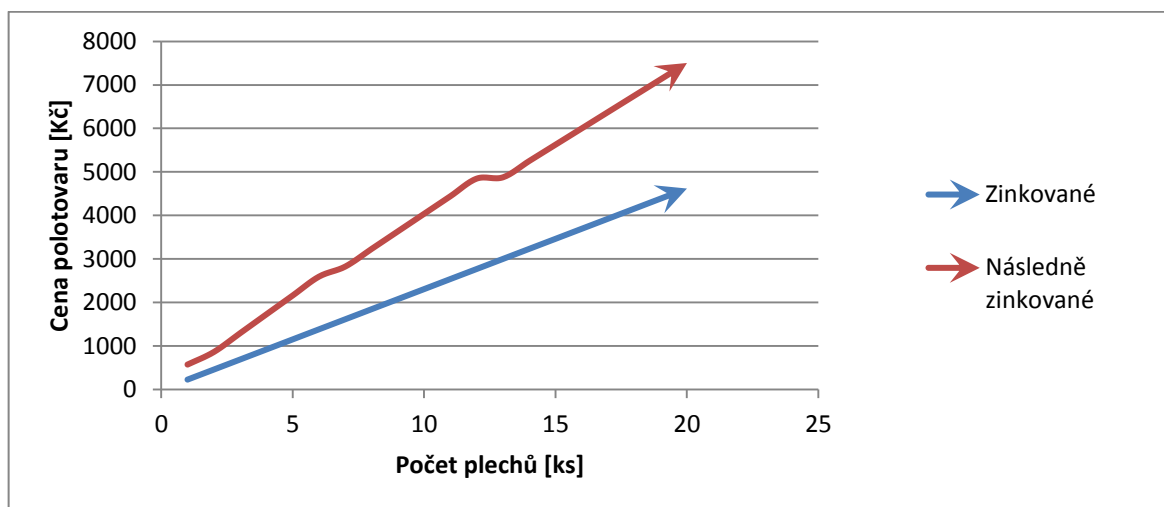
Tab. 8.2 Ceny zinkování oceli [16]

Hmotnost materiálu [kg]	Cena [Kč/kg]
1 - 10	48,00
11 - 50	30,00
51 - 100	26,40
101 - 500	22,80
501 - 1000	19,20

Z této tabulky je pak zřejmé, že cena zinkování materiálu dodatečně po vystřížení je až desetkrát vyšší než cena zinkované vrstvy jednoho kilogramu plechu při nákupu plechu zinkovaného.

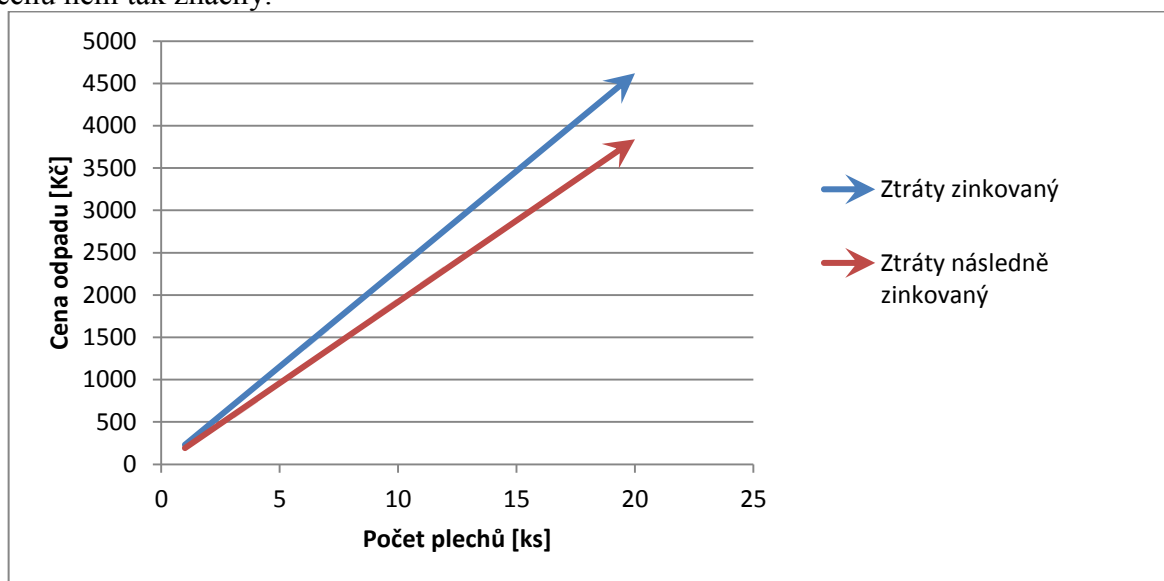
Graficky je pak možno porovnat dvě dané technologie následovně viz. obr. 8.1. Kde je porovnáno množství plechů použitých k výrobě a finální cena polotovarů z daného počtu plechů, v případě následného zinkování je započtena i cena zinkové vrstvy.

Z daného grafu (Obr. 8.1) je pak zřejmý rychlý růst ceny u technologie laserového dělení a následovného pozinkování polotovar v porovnání s technologií vysekávání, jejíž cena nestoupá tak strmě. Jednotlivé skoky v grafu následně zinkovaných dílů jsou projevem změny cen zinkování v závislosti na hmotnosti zinkovaných dílů.



Obr. 8.1 Graf závislosti použitých plechů na ceně

Protože při technologii vysekávání je následným odpadem zbytek zinkovaného plechu, tj. dražší materiál a po dělení pomocí laserového paprsku je odpadem obyčejný povrchově neupravený plech tj. levnější materiál, do ekonomického hodnocení bylo nutno započítat také odpadní materiál. V tomto případě byla modelově zvolená odpadovost 50 % materiálu. Z následujícího grafu (Obr.8.2) je zřejmé, že růst ceny odpadního materiálu u pozinkovaného plechu není tak značný.



Obr. 8.2 Graf závislosti použitých plechů na ceně - odpadní materiál

Vyhodnocením získaných informací bylo zjištěno, že použití technologie vysekávání je za daných okolností výhodnější než dělení laserem. Při dělení laserovým paprskem a následném zinkování dílů je cena touto povrchovou úpravou i přes levnější vstupní materiál navyšována.

Pokud dojde k započítání cen odpadního materiálu, bylo zjištěno, že rozdíl cen odpadního materiálu těchto dvou způsobů výroby je v neprospěch technologie vysekávání. Přesto však tento cenový rozdíl není tak značný v porovnání cenového rozdílu výroby samotných polotovarů, kde laserové řezání a následné pokovování je přibližně třikrát dražší než výroba přesným vysekáváním. Při případném zvyšování využitelnosti plechu by také docházelo k čím dál většímu rozdílu v cenách výroby, což by způsobovalo čím dále větší zvýhodňování použití přesného vysekávání.

## Závěr

Diplomová práce se zabývala analytickým vyhodnocením vtažení zinkové vrstvy do oblasti řezu při dělení zinkovaného plechu. Pro dělení bylo využito dvou moderních technologií a to dělení pomocí laserového paprsku a přesného vysekávání. Samotné analýze předcházela rozbor jednotlivých technologií dělení materiálu, používaných plechových materiálů a jednotlivých možností analytického vyhodnocení použitelných pro daný případ.

V rámci této práce bylo provedeno analytické vyhodnocení dělených ploch jednotlivých vzorků pro dané technologie. Při vyhodnocování snímků z elektronového mikroskopu bylo zjištěno, že po dělení laserovým paprskem nedochází ke vtažení zinkové vrstvy. Při stejném hodnocení snímků řezné hrany po dělení přesným vysekáváním bylo zjištěno, že vtažení zinkové vrstvy je pravděpodobné. Bylo však nutno ověřit oba závěry prvkovou EDX analýzou, která určila podíl jednotlivých prvků v analyzované ploše.

Za pomoci EDX analýzy bylo následně zjištěno, že u laserového řezu skutečně nedochází ke vtažení či ulpění jednotlivých částic zinku v této řezné ploše. Pravděpodobně je to způsobeno rychlostí proudícího asistenčního plynu, který taveninu vyfukuje z míst řezu.

Při EDX analýze řezné plochy vzorku děleného přesným vysekáváním bylo zjištěno, že dochází ke vtažení zinkové vrstvy do oblasti řezu. Kromě zinku zde bylo analyzováno i značné množství hliníku, což by odpovídalo zinkové vrstvě nanášené na plech při kontinuálním zinkování ocelových pásů, kde hodnoty přidaného hliníku mohou být i 50 %. Hloubka tohoto vtažení pak byla určena přibližně na 570  $\mu\text{m}$ , kde v posledních přibližně padesáti mikrometrech docházelo k postupnému ubývání.

Následně analyzovaný řez přes tuto vtaženou zinkovou vrstvu odhalil stabilní tloušťku zinkové vrstvy, které byla přiřazena hodnota přibližně 15  $\mu\text{m}$ . Následným rozбором faktů však byla tato analýza zpochybněna a vedla k domněnce, že mohl být obsluhou elektronového mikroskopu pořízen snímek nezachycující požadovanou plochu.

Z následného technicko-ekonomického zhodnocení byl zjištěn fakt, že pokud by měla obsahovat zinek i řezná hrana laserového řezu, bylo by vhodné řezat polotovary z obyčejného plechu a následně tento pozinkovat. Přesto náklady na tuto výrobu budou daleko dražší než pokud by byl díl dělen přesným vysekáváním ze zinkovaného plechu. Do tohoto ekonomického hodnocení však nebyly zahrnuty provozní náklady jednotlivých strojů.

## Seznam použitých zdrojů [2]

1. *Astera glass: 3D Laser* [online]. © 2013 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.astera-glass.cz/o-nas/3d-laser/>
2. *Citace.com: naučte se citovat* [online]. ©2004-2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.citace.com/>
3. *Centrum laserových a automatizačních technologií: Laserové svařování* [online]. © 2000 – 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-svarovani>
4. ČERVENÝ, O., A. SEJKOROVÁ, P. TROUBIL a T. VYCHODIL. *Mikroskopie a lokální elektronová mikroanalýza v materiálovém výzkumu*. Praha, [2006]. Dostupné z: <http://fyztyd.fjfi.cvut.cz/2003/cd/prispevky/sbpdf/matvyzk.pdf>
5. DANIHEL, Ľ. *Energo-disperzná mikroanalýza EDX*. UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE. *Lekárska fakulta* [online]. 03.01.2008 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <https://www.fmed.uniba.sk/index.php?id=1730>
6. DVOŘÁK, J. *Návrh technologie výroby dílu "svěrací kroužek"* [online]. Brno, 2009 [cit. 2014-05-16]. 37 s. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/10876/2009\\_BP\\_Dvorak\\_Jiri\\_101472.pdf?sequence=1](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/10876/2009_BP_Dvorak_Jiri_101472.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta Strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Michaela Marečková.
7. DVOŘÁK, R. a A KOL. Akademie tváření: Stříhání. *MM průmyslové spektrum* [online]. 17.05.2010, roč. 2010, č. 6 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani.html>
8. Elektromagnetické měření tloušťky galvanických povlaků. *NDTI KRaft* [online]. 2012 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.ndtone.com/docs/prednaskaGalv.pdf>
9. Elektronový mikroskop. *Wikipedia* [online]. 22. 12. 2013 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronov%C3%BD\\_mikroskop](http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronov%C3%BD_mikroskop)
10. Energy-dispersive X-ray spectroscopy. *Wikipedia* [online]. 25.4 2014 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Energy-dispersive\\_X-ray\\_spectroscopy](http://en.wikipedia.org/wiki/Energy-dispersive_X-ray_spectroscopy)
11. *ESAB svařování a pálení Česká republika: Obrázkový archiv* [online]. ©2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.esab.cz/cz/cz/news/image-archive.cfm>
12. GRYGAR, T. Metody analýza pevných látek. *Ústav anorganické chemie AV ČR* [online]. [16. března 2012] [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.iic.cas.cz/~grygar/mapl-L2,3.pdf>
13. HLADÍK, J. *Top Články: Výroba energy drinku od plechu až po vypití - Novinky ze světa energy drinků* [online]. 22.2.2012 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.topclanky.cz/Video-Vyroba-energy-drinku-plechu-po-vypiti-Novinky-sveta-energy-drinku-39236>

14. JÄGER, A. a V. GÄRTNEROVÁ. Elektronovým mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich struktura. *Fyzikální ústav Akademie věd ČR* [online]. © 2008-2010 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>
15. *Kavalir: Průmyslový popis* [online]. ©1989 - 2013 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.gravirovani-laserem.com/prumyslovy-popis.php>
16. KONDOR HUTNÍ MATERIÁLY. *Prodej a dělení hutních materiálů* [online]. © 2013 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.kondor.cz/>
17. KOŘÁN, P. *Istrojirensvi.cz: Svařování laserem - poslední trendy* [online]. 06.05.2013 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?navez=svarovani-laserem-posledni-trendy&id=20>
18. *KOZ makina: Punching with potential* [online]. [2002] [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: [http://www.koz.com.tr/docs/TruPunch\\_en.pdf](http://www.koz.com.tr/docs/TruPunch_en.pdf)
19. KUSALA, J. *Skupina ČEZ: Lasery kolem nás* [online]. 2004 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm>
20. LENFELD, P. TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC. *Katedra tváření kovů a plastů: Technologie plošného tváření - stříhání* [online]. [2005] [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/index.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm)
21. *Lintech: Laserové svařování* [online]. © 2009-2011 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-svarovani-k>
22. Měření tloušťky povlaků. *Technotest* [online]. 2005 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: [http://www.technotest.cz/mereni\\_tloustky\\_povlaku](http://www.technotest.cz/mereni_tloustky_povlaku)
23. *NanoMataChar-prednaska4*. Ústí nad Labem, 1.11.2012. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/~mkormund/P219/NanoMataChar-prednaska4.pdf>
24. NOVÁK, M. *Lao Lasery a optika: Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení* [online]. 15.3.2011 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
25. NOVÁK, M. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: Vogel Publishing, 04.09.2012, roč. 2012, č. 9 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
26. *Plech server* [online]. [2001] [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.i-plech.cz/hlavni-menu-serveru.html>
27. *Powel McNeil: AMADA FO 3015 4KW STOCK 01300* [online]. ©2011 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: [http://powellmneil.com/product.php?id=3501&product\\_name=fo\\_3015\\_\\_4kw\\_stock\\_01300](http://powellmneil.com/product.php?id=3501&product_name=fo_3015__4kw_stock_01300)

28. *PROMAT CZ: CNC vysekávání plechů* [online]. © 2011 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.promatcz.cz/sluzby/vysekavani-plechu>
29. *Příručka žárového zinkování*. Praha, 2007. Dostupné z: [http://www.zinkoza.sk/prirucka\\_ziaroveho\\_zinkovania.pdf](http://www.zinkoza.sk/prirucka_ziaroveho_zinkovania.pdf)
30. *Přístroje a metody pro měření vrstev nátěrů a pokovení. Testima* [online]. © 2006 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: [http://www.vrstvy.eu/phynix\\_metody.html](http://www.vrstvy.eu/phynix_metody.html)
31. *Punching principle. Trumpf* [online]. © 2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.trumpf-machines.com/en/solutions/more-knowledge-for-the-best-production/punching-principle.html>
32. RÜTERING, M. Co rozhoduje při volbě typu laseru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: Vogel Publishing, 2011, 07.09.2011, č. 9 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
33. ŘASA, J. a Z. KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění – 4. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: Vogel Publishing, 19.03.2008, roč. 2008, č. 3 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-4-dil.html>
34. ŘASA, J. a Z. KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění – 5. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: Vogel Publishing, 12.05.2008, roč. 5, č. 2008 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-5-dil.html>
35. Svařování laserovým paprskem a pájení laserem. *Trumpf* [online]. © 2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svareni.html>
36. *Šlechta s.r.o.: Laserové gravírování* [online]. 20012 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.slechtasro.cz/sluzby/laserove-gravirovani/>
37. ŠMÍD, J. Lasery pro průmysl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: Vogel Publishing, 09.07.2008, roč. 2008, č. 7 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
38. Vysekávací stroj TruPunch 5000. *Trumpf* [online]. © 2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/produkty/vysekavani/vysekavaci-stroje/trupunch-5000.html>
39. WASSERBAUER, J. *Není povrch jako povrch – EDS, WDS a EBSD* [online]. 12.12.2011 [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/neni-povrch-jako-povrch>

## Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka / Znak	Jednotka	Vysvětlení
<b>Al</b>	[-]	Hliník
<b>CNC</b>	[-]	Počítačem řízený (Computer numeric control)
<b>CO<sub>2</sub></b>	[-]	Oxid uhličitý
<b>DC</b>	[-]	Buzení elektickým výbojem
<b>E</b>	[J]	Energie
<b>EDX</b>	[-]	Energiově disperzní mikroanalýza
<b>F</b>	[-]	Fluor
<b>Fe</b>	[-]	Železo
<b>N</b>	[-]	Dusík
<b>Nd-YAG</b>	[-]	Yttrium-aluminiový granát dopovaný neodymem
<b>RF</b>	[-]	Radiofrekvenční buzení
<b>SEM</b>	[-]	Skenovací elektronová mikroskopie
<b>TEM</b>	[-]	Transmisní elektronová mikroskopie
<b>XRF</b>	[-]	Rentgenová fluorescenční analýza
<b>Zn</b>	[-]	Zinek

## Seznam obrázků a tabulek

### Seznam obrázků

Obr. 1.1 Příklad ohýbaného dílu .....	12
Obr. 1.2 Příklad taženého dílu .....	12
Obr. 2.1 Schématicky znázorněný optický rezonátor .....	14
Obr. 2.2 Proces stimulované emise .....	14
Obr. 2.3 Základní princip Laseru .....	15
Obr. 2.4 Schéma plynového CO <sub>2</sub> Laseru.....	16
Obr. 2.5 Schéma pevnolátkového Nd-YAG laseru .....	17
Obr. 2.6 Rezonátor s bočním buzením.....	18
Obr. 2.7 Rezonátor se zadním buzením .....	18
Obr. 2.8 Schéma vláknového laseru.....	18
Obr. 2.9 Princip řezání laserem.....	20
Obr. 2.10 Charakteristická řezná plocha při dělení laserem .....	21
Obr. 2.11 Kondukční laserové svařování.....	21
Obr. 2.12 Hluboké laserové svařování.....	22
Obr. 2.13 Vrtání laserem.....	22
Obr. 2.14 Příklad dekorování .....	23
Obr. 2.15 Příklad gravírování laserem .....	23
Obr. 2.16 Příklad značení laserem .....	23
Obr. 2.17 Princip laserového popisování .....	24
Obr. 2.18 Laserové soustružení.....	24
Obr. 2.19 Tepelné zpracování .....	25
Obr. 2.20 Nanášení povlaků a barev .....	25
Obr. 3.1 Příklad vysekávacího multitoolového nástroje .....	26
Obr. 3.2 Pásma stříhu .....	27
Obr. 3.3 Jednotlivé kroky při přesném vysekávání.....	27
Obr. 4.1 Princip galvanického pokovování.....	28
Obr. 4.2 Přejchod ocel-zinek při galvanickém pokovení .....	29
Obr. 4.3 Přejchod ocel zinek při žárovém zinkování .....	29
Obr. 4.4 Jednotlivé fáze suchého zinkování.....	30
Obr. 4.5 Jednotlivé fáze mokrého zinkování .....	30
Obr. 4.6 Schéma linky pro žárové zinkování plechů .....	31
Obr. 4.7 Přístroj k měření tloušťky povrchové vrstvy metodou magneticko induktivní .....	32
Obr. 5.1 Schématicky - velikost objektů a vhodnost použití mikroskopů .....	33
Obr. 5.2 Skenovací elektronový mikroskop.....	34
Obr. 5.4 Transmisní elektronový mikroskop .....	35
Obr. 5.3 Porovnání funkce jednotlivých mikroskopů .....	35
Obr. 5.5 Princip EDX analýzy .....	36
Obr. 6.1 Laserové dělicí zařízení AMADA FO 3015/4kW .....	37
Obr. 6.2 Vysekávací zařízení TruPunch-5000 .....	38
Obr. 7.1 SEM analýza laserového řezu – 1000x zvětšeno.....	40
Obr. 7.2 SEM analýza laserového řezu – 5000x zvětšeno.....	41
Obr. 7.3 SEM analýza přesného vysekávání – 1000x zvětšeno.....	42
Obr. 7.4 SEM analýza přesného vysekávání – 5000x zvětšeno.....	43
Obr. 7.5 Bodová EDX analýza řezu laserem .....	44
Obr. 7.6 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 1 - Laser.....	45
Obr. 7.7 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 2 - Laser.....	45

Obr. 7.8 EDX Linescan laserového řezu.....	46
Obr. 7.9 Graf EDX Linescan laserového řezu .....	47
Obr. 7.10 Bodová EDX analýza přesného vysekávání .....	47
Obr. 7.11 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 1 - Vysekávání.....	48
Obr. 7.12 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 2 – Vysekávání .....	48
Obr. 7.13 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 3 – Vysekávání .....	49
Obr. 7.14 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 4 - Vysekávání.....	50
Obr. 7.15 Graf zastoupení prvků – Bodová EDX – bod 5 – Vysekávání .....	50
Obr. 7.16 EDX Linescan přesného vysekávání .....	51
Obr. 7.17 Graf EDX Linescan přesného vysekávání .....	52
Obr. 7.18 Tloušťka vtažené zinkové vrstvy .....	53
Obr. 7.19 Detail tloušťky vtažené zinkové vrstvy .....	54
Obr. 8.1 Graf závislosti použitých plechů na ceně .....	56
Obr. 8.2 Graf závislosti použitých plechů na ceně - odpadní materiál .....	56

### **Seznam tabulek**

Tab. 6.1 Základní technické údaje dělicího laserového zařízení .....	37
Tab. 6.2 Základní technické údaje vysekávacího zařízení .....	38
Tab. 7.1 Bod 1 Analýza EDX - Laser .....	45
Tab. 7.2 Bod 2 Analýza EDX - Laser .....	45
Tab. 7.3 Bod 1 Analýza EDX - přesné vysekávání.....	48
Tab. 7.4 Bod 2 Analýza EDX - přesné vysekávání.....	49
Tab. 7.5 Bod 3 Analýza EDX - přesné vysekávání.....	49
Tab. 7.6 Bod 4 Analýza EDX - přesné vysekávání.....	50
Tab. 7.7 Bod 5 Analýza EDX - přesné vysekávání.....	50
Tab. 8.1 Cenové parametry plechů .....	55
Tab. 8.2 Ceny zinkování oceli.....	55

## **Seznam příloh**

**Příloha 1** - Technické parametry vysekávacího stroje

**Příloha 2** - Technické parametry laserového stroje

**Příloha 3** fotodokumentace EDX laser

**Příloha 4** fotodokumentace EDX vysekávání

## Příloha 1 Technické parametry vysekávačského stroje [18]

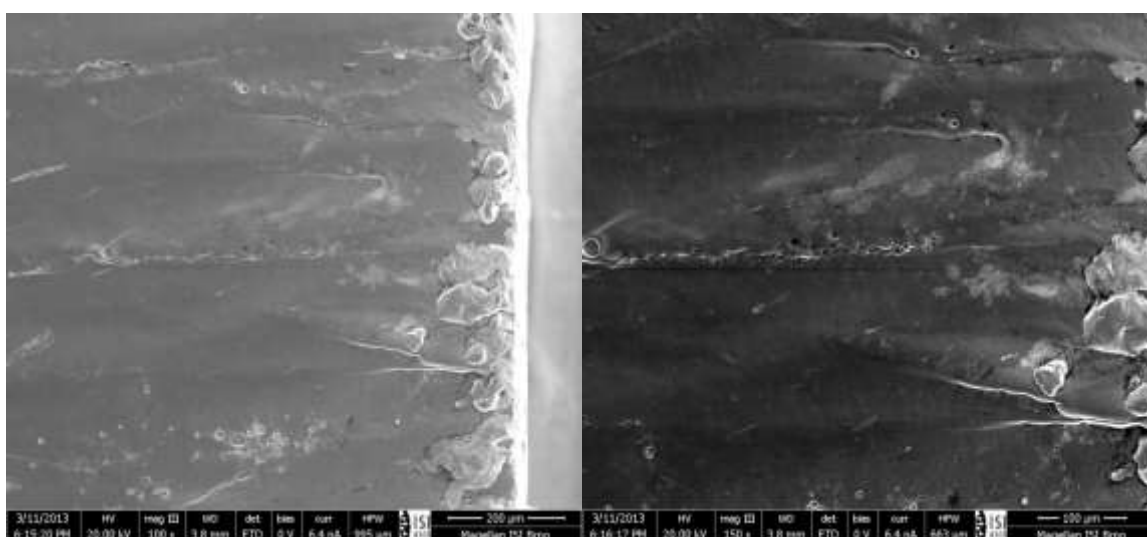
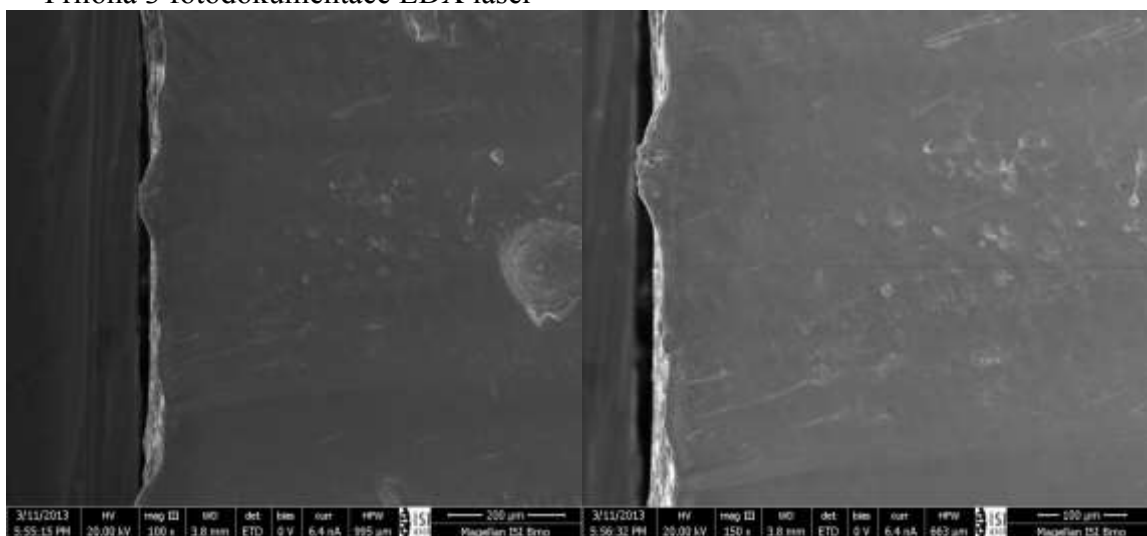
	TruPunch 5000 Medium format	TruPunch 5000 Large format		TruPunch 5000 Medium format	TruPunch 5000 Large format
<b>Working range (X x Y)<sup>1</sup></b>	2,550 x 1,280 mm	3,070 x 1,660 mm	<b>Max. accelerations<sup>2</sup></b>		
<b>Capacities</b>			X axis	20 m/s <sup>2</sup>	18 m/s <sup>2</sup>
Max. sheet thickness	8 mm	8 mm	Y axis	10 m/s <sup>2</sup>	9 m/s <sup>2</sup>
Max. punching force	220 kN	220 kN	C axis	350 1/s <sup>2</sup>	350 1/s <sup>2</sup>
Active presser foot (programmable in steps)	4.5 – 20 kN	4.5 – 20 kN	<b>Tools</b>		
Max. workpiece weight	200 kg	230 kg	Linear magazine	18 tools with 3 clamps	21 tools with 4 clamps
<b>Speeds</b>			No. with MultiTool	18 – 180	21 – 210
X axis	100 m/min	100 m/min	MultiTool	5/10	5/10
Y axis	60 m/min	60 m/min	<b>Tool change times</b>		
Simultaneous (X and Y)	116 m/min	116 m/min	Single tool	< 3 s	< 3 s
C axis	330 rpm	330 rpm	MultiTool	0.7 s	0.7 s
Max. stroke rate punching (E = 1 mm)	1,400 1/min	1,200 1/min			
Max. stroke rate marking approx.	ca. 2,800 1/min	ca. 2,800 1/min			

## Příloha 2 Technické parametry laserového stroje [27]

### ■ Machine Specifications

Type		FO-2412	FO-3015
Axial travel		X, Y- axis : optic transfer	
Axial control		X, Y, Z- axis control (3axes same time control)	
Max. processing size.	mm	2520×1270×200	3070×1550×200
Axis movement	X axis	mm	2870
	Y axis	mm	1270
	Z axis	mm	200
Cutting feed speed	X axis	m/min	0~20
	Y axis	m/min	0~20
Max. feed speed	X axis	m/min	80
	Y axis	m/min	80
	Z axis	m/min	60
Mass of sheet	kg	580	850
Least input increment	mm	0.001	
Assist gas control		Automatic change	
Pass line	mm	840	
Mass of machine (with oscillator)	ton	10	12
Power requirement 3phase AC200/220V (50Hz/60Hz)	AF2000	kVA	53 (without chiller) 75 (with chiller)
	C4000A	kVA	75 (without chiller) 111 (with chiller)
Standard Accessory		Area Sensor	

Příloha 3 fotodokumentace EDX laser



Příloha 4 fotodokumentace EDX vysekávání

