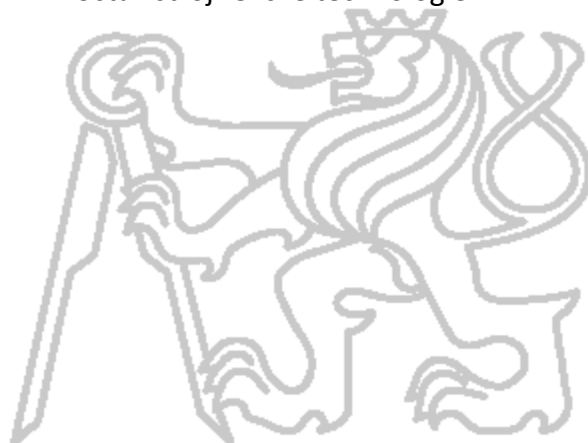


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie



Popisování korozivzdorných ocelí laserem

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Jan Vazač

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Konzultant: Ing. Petr Císařovský, Ph. D.

Praha 2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro **Jana VAZAČE**

Program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Název: Popisování korozivzdorných ocelí laserem

Název anglicky: Laser marking of stainless steels

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický úvod do problematiky technologického použití laserů, především pro modifikaci povrchu kovových materiálů - zejména popisování, gravírování
2. Technologie popisování korozivzdorných materiálů laserem - princip, použitelné základní materiály a laserové zdroje
3. Návrh experimentu - výběr korozivzdorného materiálu, zkoušky vlivu parametrů laserového popisu
4. Vyhodnocení experimentu - ostrost, barva, trvanlivost popisu, vztah mezi parametry a barvou popisu. Použitelnost pro praxi a opakovatelnost technologie.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Konzultant: Ing. Petr Císařovský, Ph.D.

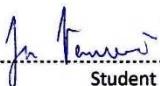
Datum zadání bakalářské práce: 4. 10. 2013

Termín odevzdání bakalářské práce: 18. 12. 2013

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

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

Zadání bakalářské práce převzal dne: 31.10.2014



Student



Vedoucí ústavu





Děkan

V Praze

dne 3. 10. 2013

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přirozeném seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne.....

.....

Podpis

Poděkování:

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Kolaříkovi Ph.D., IWE za pomoc a vedení při mé bakalářské práci, cenné rady a mnoho trpělivosti. Poděkovat chci také panu Ing. Císařovskému, Ph.D. za poskytnutí zázemí na provedení praktické části a rady při tvorbě práce. Poděkování patří také mé rodině za podporu během celého studia.

Anotace

Název práce: Popisování korozivzdorných ocelí laserem
Autor: Jan Vazač
Druh práce: Bakalářská
Vedoucí práce: Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE,
Ústav strojírenské technologie, ČVUT v Praze

Anotace:

Práce je zaměřena na popisování korozivzdorných ocelí pomocí laserového svazku a využití této technologie pro barevné grafické motivy. V teoretické části se zabývá vývojem a historií laserů, jejich rozdělením a bezpečností práce s nimi. Dále se zabývá korozivzdorností materiálů, druhy koroze, rozdělením korozivzdorných ocelí a jejich chemickým složením.

V praktické části jsou informace o laseru, na kterém byl pokus prováděn, o materiálu, vlivech laserového paprsku na materiál a výsledcích pokusu. Grafickým motivem bylo poznačeno několik různých vzorků s rozdílnými hodnotami nastavení laseru. Materiál použitý pro značení byla chrom niklová austenitická ocel. Následně byly vzorky foceny na denním světle pod určitým úhlem, vyhodnoceny a porovnány.

Klíčová slova: Popisování, laser, korozivzdorná ocel
Rozsah práce: 53 stran
Počet obrázků: 36 obrázků
Počet tabulek: 9 tabulek

Annotation

Thesis title: Laser marking of stainless steel

Author: Jan Vazač

Kind of work: Bachelor

Supervisor: Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE,
Ústav strojírenské technologie, ČVUT v Praze

Annotation:

The main focus of this Bachelor thesis is marking of stainless steel with a laser beam, and the practical use of this technology for color graphic motives. The theoretical part is concerned with development and history of lasers, their classification and safety at work with them. It is also concerned with corrosion resistive materials, types of corrosion, distribution of stainless steel and its chemical composition.

There are information about laser on which the experiment was performed in the practical part, about the specific material, about effects of laser beam on the material and results of test. A number of different samples were marked by a graphic motives with different values of laser settings. The material used for marking was a chromium nickel austenitic steel. After this photographs of samples were taken in the day light in a certain angle, evaluated and compared.

Key words: Marking, laser, stainless steel

Scope of work: 53 pages

Number of pictures: 36 images

Number of tables: 9 tables

OBSAH

| | |
|---|----|
| Seznam použitých zkratek, jednotek a symbolů..... | 11 |
| Úvod..... | 12 |
| TEORETICKÁ ČÁST..... | 13 |
| 1. Laser..... | 13 |
| 1.1 Objev laseru, historie..... | 13 |
| 1.1.1 Vývoj laserů v historii:..... | 13 |
| 1.1.2 První laser..... | 13 |
| 1.2 Základní princip laseru..... | 14 |
| 1.2.1 Světlo..... | 14 |
| 1.2.2 Laserový paprsek..... | 15 |
| 1.3 Dělení laserů..... | 16 |
| 1.3.1 Dělení podle aktivního prostředí..... | 16 |
| 1.3.1.1 Plynové lasery..... | 17 |
| 1.3.1.2 Pevnolátkové lasery..... | 18 |
| 1.3.1.3 Kapalínové lasery..... | 18 |
| 1.3.1.4 Polovodičové lasery..... | 19 |
| 1.3.1.5 Vláknové lasery..... | 19 |
| 1.4 Bezpečnost práce s laserem..... | 21 |
| 1.4.1 Vliv laserového světla na exponované objekty..... | 21 |
| 1.4.2 Zařazení laserů do tříd: | 22 |
| 1.5 Laserové popisování ocelí..... | 24 |
| 1.5.1 Lasery pro značení materiálu..... | 24 |
| 1.5.2 Popisování korozivzdorných ocelí laserem..... | 27 |
| 2. Korozivzdorné materiály..... | 27 |
| 2.1 Koroze..... | 27 |
| 2.1.1 Dělení koroze podle probíhajících dějů..... | 28 |
| 2.1.2 Dělení koroze podle druhu napadení..... | 28 |
| 2.2 Korozivzdorné oceli..... | 30 |
| 2.2.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí..... | 31 |
| 2.2.1.1 Feritická ocel..... | 32 |
| 2.2.1.2 Martenzitická ocel..... | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.1.3 Austenitická ocel..... | 34 |
| 2.2.1.4 Austeniticko-feritická ocel..... | 34 |
| 2.3 Materiál pro experimentální část..... | 35 |
| PRAKTICKÁ ČÁST..... | 36 |
| 3. Vybavení pro experiment..... | 36 |
| 3.1 Vlákenný pulsní laser – vlastnosti..... | 38 |
| 3.2 Galvoscaner RL-14 D2 firmy RAYLASE..... | 38 |
| 3.3 Zkušební materiál | 39 |
| 4. Průběh experimentu..... | 40 |
| 4.1 Vzorek č. 1..... | 42 |
| 4.1.1 Vyhodnocení vzorku č. 1 | 43 |
| 4.2 Vzorek č. 2..... | 43 |
| 4.2.1 Vyhodnocení vzorku č. 2 | 44 |
| 4.3 Vzorek č. 3..... | 44 |
| 4.3.1 Vyhodnocení vzorku č. 3..... | 45 |
| 4.4 Vzorek č. 4..... | 45 |
| 4.4.1 Vyhodnocení vzorku č. 4..... | 46 |
| 4.5 Vzorek č. 5..... | 47 |
| 4.5.1 Vyhodnocení vzorku č. 5..... | 48 |
| 4.6 Vzorek č. 6..... | 48 |
| 4.6.1 Vyhodnocení vzorku č. 6..... | 49 |
| 4.7 Výsledky experimentu..... | 50 |
| Závěr..... | 51 |
| Seznam použité literatury..... | 52 |

Seznam použitých zkratek, jednotek a symbolů

| | |
|--------------------------------|--|
| A | Tažnost |
| Ac ₃ | přeměna Fe α (β) na Fe γ |
| AEL | Accesible Emision Limit |
| AP | Aktivní prostředí laseru |
| Ar | Argon |
| Br | Brom |
| C | Uhlík |
| Cd | Kadmium |
| CO ₂ | Oxid uhličitý |
| Cr _E | Chromový ekvivalent |
| E | kvantová energie |
| E _i | i-tá kvantová energie |
| El | Elektricky (výbojem, proudem) |
| Er:YAG | Erbium: Yttrium-aluminium garnat |
| H | Vodík |
| He | Helium |
| H ₂ SO ₄ | Kyselina sírová |
| HNO ₃ | Kyselina dusičná |
| IČ | Infračervené záření |
| LD | LED Dioda |
| MPE | Maximum Permissible Exposure |
| Mn | Mangan |
| Mo | Molybden |
| N | Dusík |
| Nd:YAG | Neodym: Yttrium-aluminium garnat |
| Ne | Neon |
| Ni _E | Niklový ekvivalent |
| Rm | Pevnost v tahu |
| RF | Radio-frekvenčně |
| UV | Ultrafialové záření |
| Xe | Xenon |
| Yb:YAG | Ytterbium: Yttrium-aluminium garnat |

Úvod

Popisování a značení kovových povrchů se obvykle provádí tiskem, anodizací nebo různými povlaky. Vlastnosti takových povrchů jsou ale velmi omezené svou otěruvzdorností a chemickou nestálostí a u eloxovaných povrchů jednobarevným provedením. Tyto technologie jsou drahé a neekonomické. Lasery mohou být používány pro trvalé barevné popisování kovových materiálů.

Určité druhy laserů jsou vhodnější na popisování materiálu než jiné a to převážně z důvodu většího množství nastavení parametrů a vhodnější vlnovou délkou vznikajícího laserového svazku. Výkon a délka pulsu laseru jsou také velmi rozhodující prvky při určování vhodnosti laseru pro popisování.

Ve většině případů je použití laseru pro značení a popisování nejrychlejší a nejefektivnější způsob značení. Laserový svazek interaguje s povrchem popisovaného materiálu a vytváří oxidickou vrstvu, která na rozdíl od jiných popisovacích technologií odolává chemikáliím a je otěruvzdorná.

Některé kovové povrchy mohou při tepelném ovlivnění měnit svojí barvu. Oxidická vrstva vzniklá na povrchu vytváří tenký film, který pak pohlcuje část elektromagnetického záření o určité vlnové délce a tím vzniká barevný vzor. Účel této technologie je takový, aby určitá část měla stejnou barvu a odstín. Vytvoření jednotného a jednobarevného motivu tak vyžaduje přesné nastavení a vysokou stabilitu vyzařovaného laserového svazku.

Pro tuto metodu jsou v dnešní době nejvhodnější variantou vláknové lasery. Barevné značení laserem je snadné, rychlé a efektivní a činí povrch vizuálně atraktivnější. Barvy se mění pouhým nastavením parametrů laserového paprsku. Značení laserem lze jednoduše zakomponovat i do automatické výroby, kdy lze značit objekt nebo součást i za pohybu.

Cílem této práce je zmapovat problematiku laserového popisování a experimentálně ověřit možnosti barevného popisu pomocí konkrétního typu laseru na korozivzdorné austenitické oceli.

TEORETICKÁ ČÁST

1. LASER

1.1 Objev laseru, historie

Slovo LASER je zkratka pro kvantový generátor světla, která vznikla z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Laser je tedy obecné označení pro optický zesilovač, který generuje elektromagnetické záření (viditelné – světlo nebo neviditelné – ultrafialové, infračervené) pomocí procesu stimulované emise fotonů. Princip vychází ze zákonů kvantové fyziky a termodynamiky.

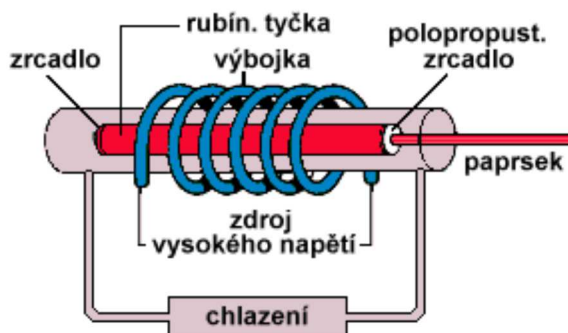
[1, 2]

1.1.1 Vývoj laserů v historii:

- **1916** – předpovězení jevu stimulované emise - A. Einstein (Německo)
- **1954** – sestrojen první maser (mikrovlnné záření) - C. H. Townes (USA), Basov, Prochorov (Rusko)
- **1960** – První pevnolátkový laser (rubínový laser) - Theodor Maiman (USA)
- **1961** – První plynový laser (CO₂) – Ali Javan (USA)
- **1962** – První polovodičový laser – Robert N. Hall (USA)
- **1964** – První laser na bázi směsi plynů (CO₂ + N₂)
- **1966** – První kapalinový laser – Peter Sorokin
- **1968** – Laser CO₂ o výkonu 8,8 kW
- **Počátek 60. let** – První YAG laser
- **Počátek 70. let** – Průmyslové využití laseru CO₂ pro řezání papíru
- **70. léta** – využití asistenčního plynu (O₂) pro řezání
- **Počátek 80. let** – Využití vysokotlakého dusíku (N₂)
- **Konec 20. století** – Vývoj laserových systémů jako standartního výrobního prostředku

1.1.2 První laser

V roce 1960 byl vytvořen první laser Theodorem Maimanem a dodnes je tento prototyp (obrázek č. 1) předlohou pro nynější výkonné stroje. Aktivním prostředím byl krystal rubínu Al₂O₃ a buzení probíhalo pomocí vysokonapěťové výbojky, čímž nedovolovalo plynulý chod a pracoval pouze pulsně.



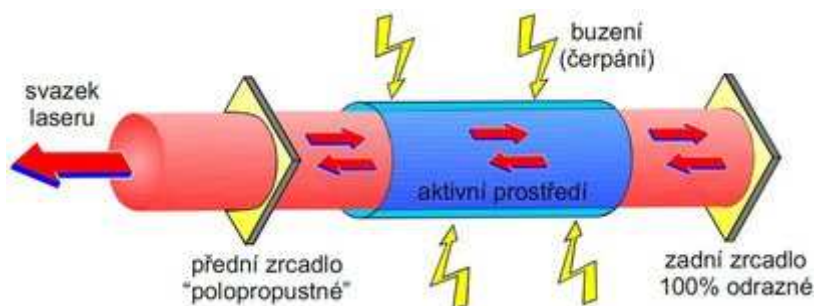
Obrázek č. 1 - Schematické zobrazení prvního laseru

První využití našel tento laser v medicíně v roce 1961, do strojírenství se dostal až po roce 1962 při sestrojení prvního YAG laseru pro zpracování materiálu. Dále od roku 1964 laser pronikl do všech možných odvětví lidské činnosti a tak nalézá využití v průmyslu, medicíně, vědě a výzkumu, elektronice, zábavním průmyslu jakožto i ve zcela „běžných“ věcech jako jsou laserová ukazovátka, počítačové CD-ROM mechaniky, délková měřidla apod.

[2, 3, 4]

1.2 Základní princip laseru

Základní schéma funkce laseru je vyobrazeno na obrázku č. 2. Základem laseru je aktivní prostředí, které je nějakým způsobem buzeno (opticky, elektricky apod.). Buzením dodáváme do laseru energii, která je potom právě pomocí procesu stimulované emise vyzářena v podobě fotonů (částic světla). K vytvoření laserového paprsku je potřeba ještě soustava zrcadel tzv. optický rezonátor, který zesiluje záření. Na obrázku č. 2 je znázorněn základní typ rezonátoru, který tvoří dvě zrcadla, jedno nepropustné (100% odrazné pro generované záření) a druhé částečně propustné, mezi kterými je umístěno aktivní prostředí.



Obrázek č. 2 - Základní schéma laserového rezonátoru

1.2.1 Světlo

Světlo je elektromagnetické záření o určité vlnové délce (obrázek č. 3). Vlnové délky záření laseru závisí na typu aktivního prostředí, běžně se pohybují v rozmezí 190 – 1600nm (pro pevnolátkové lasery), ale například pro plynový CO₂ až 10600nm. Světlo má duální charakter a tak ho lze pomocí fyzikálních pojmů popsat buď jako vlnu nebo jako částici, v závislosti na

uspořádání experimentu a způsobu pozorování. Například jevy v oblasti optiky a lámání světla lze vysvětlit pouze pomocí vlnového charakteru, oproti tomu fotoelektrický jev lze vysvětlit pouze pomocí fotonů.

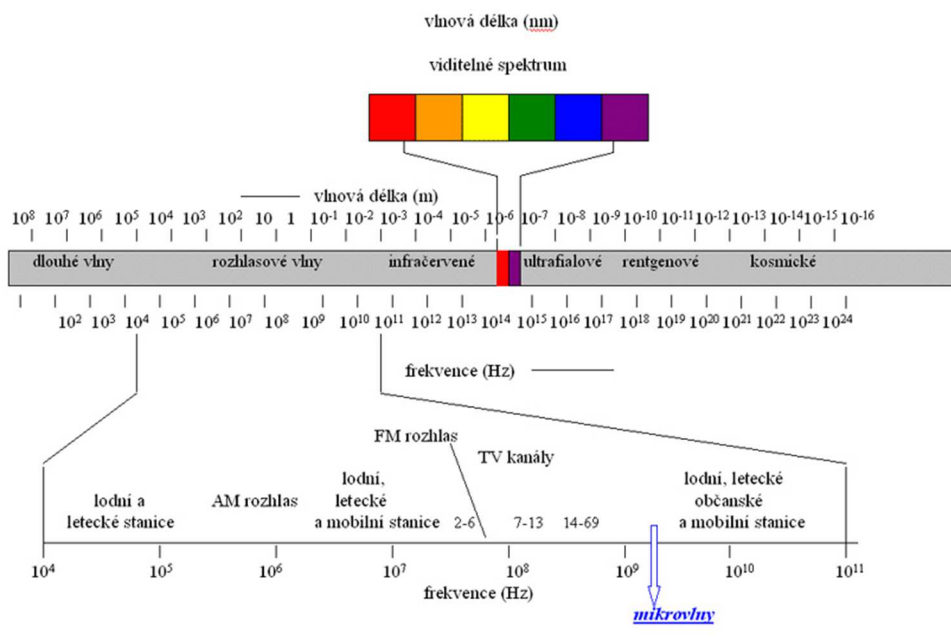
Světlo laseru má několik vlastností, jimiž se liší od běžného záření:

Směrovost (tzv. divergence): záření vychází jedním směrem a velmi úzkým paprskem (průměr závisí na využití laseru)

Monochromaticnost: všechny generované fotony mají pouze jednu vlnovou délku - světlo je jednobarevné

Koherence: spojitá a konzistentní frekvence, amplituda a fáze vlnění

Výkonnost: nejvyšší hustota dopadu energie na velmi malou plochu (záření je optickou soustavou fokusováno na plochu cca 50 – 250 μm)



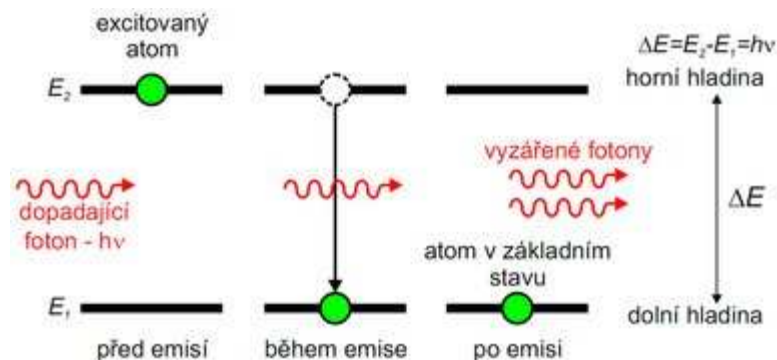
Obrázek č. 3 - Vlnové délky elektromagnetického záření a viditelného světla

[1, 3]

1.2.2 Laserový paprsek

Laserový paprsek vzniká stimulovanou emisí záření (obrázek č. 4), která potřebuje dodat do aktivního prostředí externí energii, kterým může být například jiné elektromagnetické záření. Elektrony aktivního prostředí, které se nacházejí v základní energetické hladině tak přecházejí do vyšší energetické hladiny (buzení). Toto je však jejich „nepřirozený stav“, takže se na vyšší energetické hladině udrží pouze určitou dobu (tzv. doba života), poté dojde k samovolnému poklesu zpět na nižší energetickou hladinu (přirozená emise – spontánní), tím dojde k vyzáření fotonu – vznik elektromagnetického záření.

Aby však mohlo dojít ke stimulované emisi, musí být vytvořen stav tzv. inverzní populace. Inverzní populace je fyzikální stav, při kterém dochází k obsazení energetických hladin v nerovnovážném rozdělení. Tento stav nastává, když převažuje počet elektronů na vyšší energetické hladině nad počtem elektronů na nižší energetické hladině. Tato kvantová soustava potom zesiluje procházející (dopadající) záření. To lze dosáhnout v tříhladinovém nebo lépe ve čtyřhladinovém energetickém systému. Díky těmto vícehladinovým systémům lze dosáhnout plynulého chodu generátoru záření, což u dvouhladinového systému nelze.



Obrázek č. 4 - Princip stimulované emise fotonu

Další částí laseru je zesilovač záření - optický rezonátor, je osazen dvěma zrcadly, kde se stimulovanou emisí vzniklé fotony odráží mezi zrcadly a stimulují další vybuzené atomy. Tím se navyšuje energie a síla záření až do chvíle, kdy mají fotony dostatek energie k prostoupení polopropustným zrcadlem, čímž vznikne laserový paprsek. Po skončení buzení a po vyzáření fotonů se atomy vrátí zpět do základní energetické hladiny a cyklus se pak může opakovat.

[3, 4]

1.3 Dělení laserů

Lasery se dělí podle několika různých kritérií, jimiž jsou například: způsob buzení aktivního prostředí, vlnová délka generovaného záření (tabulka č. 1), počet energetických hladin nebo režim provozu. Nejčastější dělení je však podle druhu aktivního prostředí v rezonátoru. Typ aktivního prostředí dále určuje i vlnovou délku elektromagnetického záření.

1.3.1 Dělení podle aktivního prostředí

- Lasery se dělí na:
- plynové
 - pevnolátkové
 - kapalinové
 - polovodičové
 - vláknové

Tabulka č. 1 - Vlnové délky v závislosti na typu aktivního prostředí

| Aktivní prostředí | Vlnová délka [nm] | Záření |
|--------------------|----------------------|---------------|
| argon - fluor | 193 | UV |
| krypton - fluor | 248 | UV |
| xenon - chlor | 308 | UV |
| helium - kadmium | 325, 442 | UV, viditelné |
| argon | 488, 514 | viditelné |
| rubín | 694 | viditelné |
| Nd:YAG | 532, 1064 | viditelné, IČ |
| helium - neon | 543, 633, 1150, 3390 | viditelné, IČ |
| polovodičové diody | 630 - 1600 | viditelné, IČ |
| oxid uhličitý | 9600, 10600 | IČ |

Tabulka č. 2 ukazuje současné možné výkony a parametry základních nejpoužívanějších laserů.

Tabulka č. 2 – Základní parametry současných používaných laserů

| Laser | Buzení AP | Vlnová délka | Efektivita | Výkon | Životnost |
|-----------------|-----------|--------------|------------|---------|-----------|
| Nd:YAG | LD, lampy | 1064 nm | 3 – 7 % | ~6 kW | 10000 h |
| CO ₂ | RF, EI | 10600 nm | 10 až 25 % | ~20 kW | 20000 h |
| Diodový | EI. | 808 – 980 nm | Až 60 % | ~10kW | 15000 h |
| Vláknový | LD | 1070 nm | Až 30 % | ~1,5 kW | 100000 h |

1.3.1.1 Plynové lasery

Aktivní prostředím je plyn nebo plynná směs, obsažena ve skleněné trubici, tzn. látka, která je v plynné fázi a je buzena několika možnými způsoby – opticky, elektricky, chemicky, frekvenčním vlněním, doutnavým výbojem, atd. Plynové lasery mohou pracovat v pulsním i kontinuálním režimu.

Plynové lasery se mohou dále dělit podle skupenství plynu:

- atomární: He-Ne, He-Cd, Cu, I
- iontové: Ar, Kr
- molekulární: CO₂, N₂, H₂
- excimerové: XeBr, KrO, ArO

Nejčastější využití v průmyslu mají lasery CO₂, He-Ne a excimerové lasery. CO₂ laser mají největší využití pro aplikace s potřebou vyššího výkonu, jako je řezání nebo svařování. U plynových CO₂ laserů je aktivní prostředí tvořeno směsí CO₂ a dalším plynem, např.: N₂ nebo He, kde každá směs má určité využití. He-Ne lasery se používají především pro měřicí techniku. Excimerové lasery jsou pak převážně pro práci s využitím menších výkonů jako například popisování, mikroobrábění a čištění povrchů.

1.3.1.2 Pevnolátkové lasery

Jedná se o velmi rozšířenou skupinu laserů. Aktivním prostředím je pevná krystalická, ale opticky propustná látka – oxidy, keramika, sklo, krystaly. Výkony těchto laserů se pohybují až okolo 10kW.

Pevnolátkové lasery se dále dělí do základních skupin:

Nd: YAG

Nd: YLF

Er: YAG

Yb: YAG

Ti: safír, rubín

Vláknové lasery (vhodné pro popisování a gravírování)

A další

[5, 6, 7]

Nejpoužívanějším typem je Nd: YAG laser, pracuje v pulsním i kontinuálním režimu. Je vhodný pro všechny základní technologické práce s materiálem od řezání a vrtání přes svařování až po popisování. Zkratka Nd: YAG je zkratka krystalu aktivního prostředí – yttriu hliníkový granát (yttrium-aluminium garnet) dopovaného ionty neodymu. Jeho největší výhodou je možnost vést záření flexibilním optickým vláknem a to díky své vlnové délce záření (optická vlákna jsou určena pro viditelné, infračervené a ultrafialové optické záření)

[7, 9]

1.3.1.3 Kapalinové lasery

Aktivní prostředí je v tomto případě nejčastěji roztok organického barviva. Pomocí těchto barviv a nelineární optiky je u těchto laserů možné dosáhnout všech vlnových délek ve viditelném i ultrafialovém spektru elektromagnetického záření – od 300nm do 1500nm.

Kapalinové lasery se používají převážně ve vědě např.: spektroskopii. Velkou nevýhodou laserů s barvivem je krátká životnost, aktivní prostředí se vlivem záření tepla a světla rozkládá a ztrácí tak svůj výkon.

1.3.1.4 Polovodičové lasery

Jedná se o moderní typy průmyslových laseru. Aktivní prostředí je polovodičový materiál. Výkony těchto laserů jsou menší, pohybují se od 1mW až do 1kW. Nejčastějším zdrojem záření jsou polovodičová laserová dioda a polovodičový injekční laser.

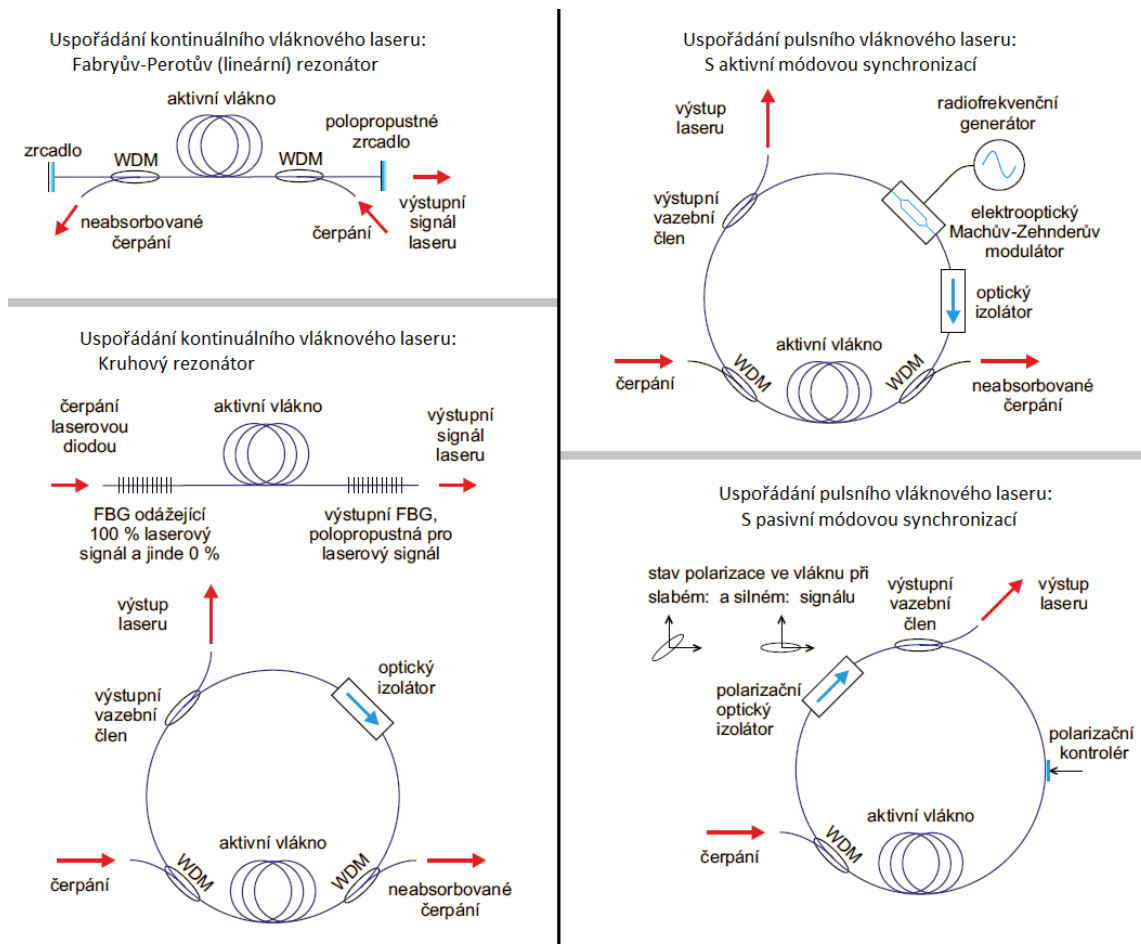
Velkou výhodou polovodičových laserů jsou malé rozměry a vysoká účinnost (až 50%) a možná změna výkonu změnou dodávaného elektrického proudu. Díky těmto výhodám mají nejčastější využití u běžných domácích spotřebičů (CD mechaniky, tiskárny, audiosystémy, atd.) nebo telekomunikační technice. Nevýhodou je špatná kvalita a směrovost výstupního svazku laserového paprsku a používá se především tam, kde není potřeba svazek s výrazným centrálním maximem intenzity a není tak nutné svazek fokusovat na malou plochu. Lasery s velkým výkonem jsou používány především tam, kde je žádoucí větší plocha dopadové stopy svazku, například v průmyslu pro kalení, tepelné zpracování a nanášení povlaků, kde se používá čtvercový nebo obdélníkový paprsek světla, dále se používají pro svařování plastů nebo v dermatologii.

[4, 5]

1.3.1.5 Vláknové lasery

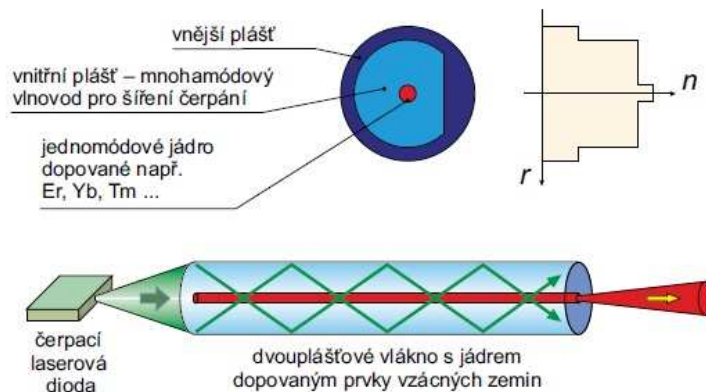
Vláknový laser je jedním z nejnovějších typů laseru, ačkoliv se tento laser objevil již v roce 1961, ale byl brán jen jako kuriozita. Aktivním prostředím je optické vlákno dopované různými prvky vzácných zemin, které je buzeno jiným laserem (nejčastěji polovodičovým). Vláknové lasery ve svých začátcích nacházely využití převážně v telekomunikaci, kde byli používány jako zesilovače optického signálu a tak výrazně pomohli rozvoji například internetu.

Vláknové lasery mohou být kontinuální nebo pulsní, rozdíl je viditelný na obrázku č. 5. Na místo zrcadel rezonátoru se ve vláknovém laseru využívá Bragovských mřížek, které jsou vytvořené přímo na koncích vlákna. Optické vlákno je vyrobené z křemenného skla dopovaného prvky vzácných zemin (erbium, thulium, germanium, neodým, yterbium, atd.) a má délku až několik metrů. Díky své délce a tím velké ploše není potřeba vodního chlazení laseru a dostačuje chlazení vzduchem.



Obrázek č. 5 – Uspořádání laserů, nalevo kontinuálních a napravo pulsních.

Velkou výhodou vláknových laserů je jejich jednoduchost a díky tomu spolehlivost a minimální nároky na údržbu, vysoká účinnost (až 40%), velmi vysoká životnost (řádově stovky tisíc hodin), a malé prostorové nároky. Výkony vláknových laserů se pohybují až okolo 3kW. Vyšších výkonů těchto laserů se dosahuje pomocí vícevrstvých optických vláken, kde se provádí čerpání z aktivního vlákna přes plášť (obázek č. 6). Paprsek vláknového laseru je přesný a kvalitní. Vláknový laser se používá převážně na značení, gravírování a mikro-obrábění nebo řezání menších předmětů.



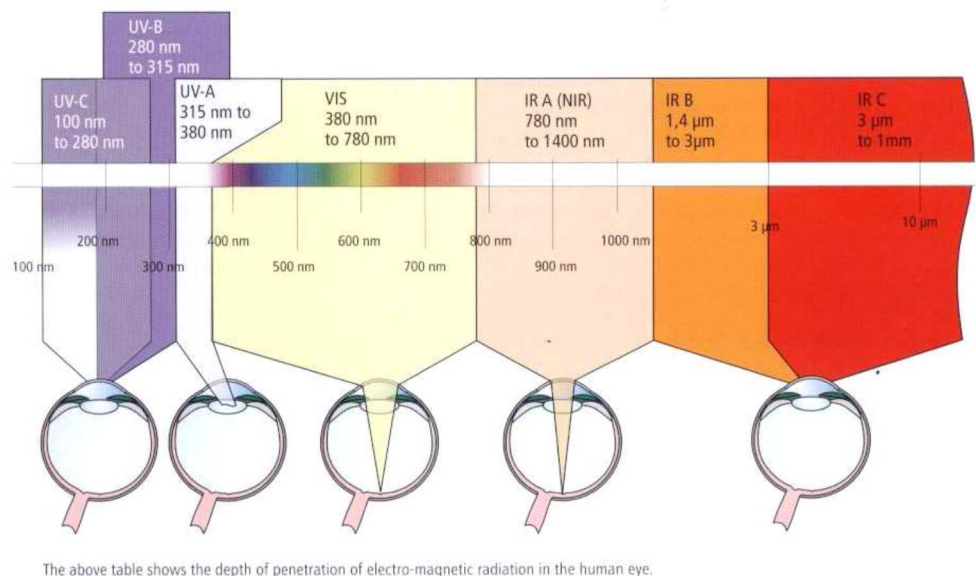
Obrázek č. 6 – Čerpání z aktivního vlákna přes plášť

1.4 Bezpečnost práce s laserem

1.4.1 Vliv laserového světla na exponované objekty

Dle nařízení vlády č. 1 /2008 Sb., o ochraně zdraví, se laserem rozumí jakékoliv zařízení, které je vytvořeno za účelem zesilování elektromagnetického záření kontrolovanou stimulovanou emisí.

Je-li člověk vystaven silnému laserovému záření, mohou se objevit jistá rizika. Nejčastěji poškozenými orgány jsou oči a kůže. Laserové záření se svou vlnovou délkou od 180 nm do 1 mm zahrnuje viditelné ale i okem neviditelné záření. Ve většině případů se před laserovým světlem nelze chránit pouhým zavřením oka, laserové světlo je příliš silné a tak dochází k poškození oka dříve, než se stihne oko zakrýt očním víčkem, jako je tomu u běžných světelných zdrojů (slunce, světlomety automobilu, atd.). Na obrázku č. 7 je znázorněn průnik magnetického záření do lidského oka. Pokud není optická cesta plně zakrytována (laserová třída zařízení č. I) je nutné používat speciální ochranné pomůcky (brýle, které nepropouští záření pro danou vlnovou délku).



Obrázek č. 7 – Průnik elektromagnetického záření do lidského oka a jeho ohrožení

Veškeré důležité informace o nebezpečnosti laserového paprsku musí být uvedeny v technické dokumentaci, který musí být připojena ke každému laserovému zařízení. Tyto informace musí obsahovat například údaje o: vlnové délce záření, druhu aktivního prostředí, zařazení laseru do třídy bezpečnosti, správnou montáž a instalaci zařízení, návod k obsluze, důležitá upozornění, atd.

[10]



Obrázek č. 8 - Symbol laseru třídy 2 a vyšší

1.4.2 Zařazení laserů do tříd:

Úroveň laserového záření je dána maximální přípustnou dávkou ozáření (MPE – Maximum Permissible Exposure), která určuje, za jakých okolností může být člověk vystaven danému záření bez zanechání vážných následků. Laserová zařízení se zařazují do tříd podle ČSN EN 60825-1:2007. Limit přípustné emise (AEL) je určený v rámci každé třídy.

[11]

Laserové zařízení třídy I.:

Zařízení jsou bezpečná i během dlouhodobého přímého sledování svazku i v případě použití optických pomůcek (lupa, dalekohled). Vztahuje se na celý rozsah vlnových délek.

Laserové zařízení třídy I.M.:

Emituje záření v rozsahu vlnových délek od 302,5 nm do 4000 nm, které neumožní přístup osoby k záření přesahujícímu limit emise třídy 1. K poškození zraku může dojít při sledování svazku pomocí optických pomůcek.

Laserové zařízení třídy II.:

Rozsah vlnových délek viditelného záření od 400 nm do 700 nm, které neumožní přístup osoby k záření přesahujícímu limit emise třídy 2. Záření je bezpečné pro chvilková ozáření, ale mohou být nebezpečná při záměrném pohledu do svazku. Ochranné reakce, jako zavření očí nebo otočení hlavy, jsou v tomto případě dostačující. Uživatelé jsou informováni výstražnými tabulkami a štítky na zařízení. Na obrázku č. 8 je zobrazený symbol laseru třídy 2 a vyšší, čímž by měl být opatřen každý příslušný spotřebič s laserem těchto tříd.

Laserové zařízení třídy II.M:

Rozsah vlnových délek viditelného záření od 400 nm do 700 nm, které neumožní přístup osoby k záření přesahujícímu limit emise třídy 2. Záření je bezpečné pro krátkodobé ozáření, ale chvilkové ozáření může způsobit oslnění nebo dočasné narušení vidění, to může mít vliv na bezpečnost práce.

Laserové zařízení třídy III.R:

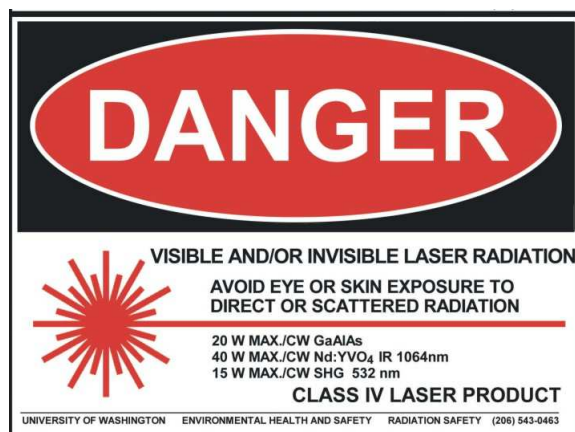
Záření, které může překročit MPE při přímém sledování uvnitř svazku. Nebezpečí je zvýšené při delším ozáření a je více nebezpečné pro úmyslné ozáření. Zařízení mohou být použita pouze tam, kde je pohled do svazku nepravděpodobný nebo omezený ochrannými prvky. Krátkodobé ozáření může způsobit oslnění nebo dočasné narušení vidění, to může mít vliv na bezpečnost práce.

Laserové zařízení třídy III.B:

Nebezpečné při pohledu do svaku včetně náhodných krátkodobých ozáření. Sledování difúzních odrazů není nijak závažně nebezpečné. Lasery této třídy, kdy je svazek zaostřen nebo má malou plochu dopadu, mohou způsobovat poškození pokožky člověka, poškození různých materiálů nebo představovat riziko vzplanutí hořlavých materiálů.

Laserové zařízení třídy IV.:

Umožňuje přístup osoby k zařízení přesahujícímu limity přípustné emise pro třídu 3B. Pohled do svazku i ozáření kůže je velmi nebezpečné, pozorování odrazů i rozptýlených může být nebezpečné a je zde zvýšené riziko vzplanutí hořlavých materiálů a vzniku požáru. Na obrázku č. 9 je zobrazen štítek označující zařízení s laserem třídy IV.



Obrázek č. 9 - Symbol nebezpečí laseru třídy 3b a 4 včetně výkonu a typu aktivního prostředí

[10, 11]

1.5 Laserové popisování ocelí

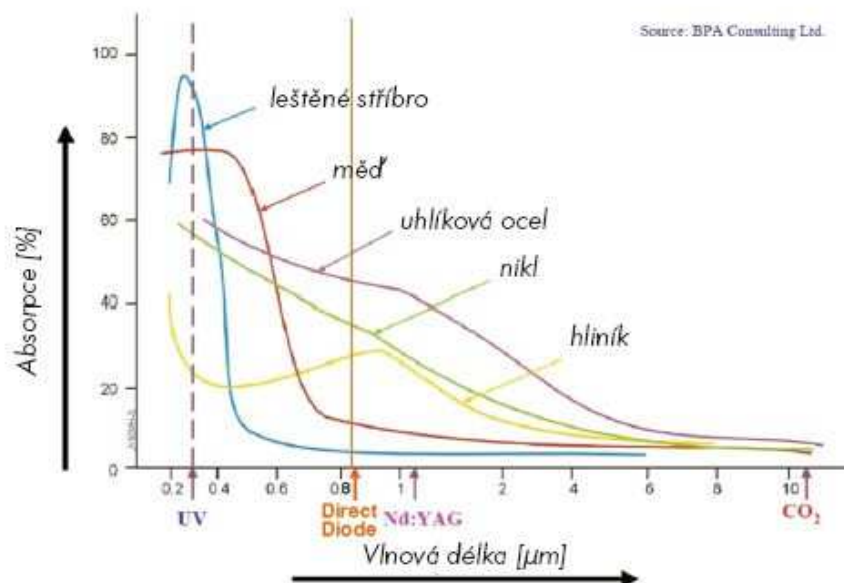
Popisování a značení ocelí (obrázek č. 10) a jiných materiálů laserem se za poslední desetiletí stává velmi rozšířeným využitím laserů. Laserové značení má velkou výhodu ve stálosti vytvořeného motivu (nelze smazat nebo odstranit běžným způsobem – tzn. otěrem nebo chemikáliemi), rychlosti popisu a velmi nízkými náklady. Jedná se též o ekologický způsob popisu, není za potřebí různých barviv a chemikálií, popis probíhá pouze tepelným ovlivněním označovaného materiálu. Pro různé speciální aplikace se můžou do základního materiálu (nejčastěji plast) přidávat pigmenty, které při vystavení laserovému paprsku výrazně mění svoji barvu a popis tak získává větší kontrast. U kovových (zejména ocelových) materiálů je dosažení barevného kontrastu u popisu obtížnější, nicméně je to dosažitelné různým tepelným ovlivněním materiálu, což je právě hlavním předmětem zájmu této bakalářské práce. Díky těmto výhodám se laserový popis rozšířil nejen v průmyslovém odvětví ke značení výrobků, ale také do oblasti reklamy a umění. Mimo klasického popisování se též používá technologie gravírování – rytí (popis do větších hloubek základního materiálu).



Obrázek č. 10 – Příklad barevného popisování oceli

1.5.1 Lasery pro značení materiálu

Pro značení a popis materiálu se používají lasery s nižšími výkony (10 až 50W) než vysocevýkonné lasery pro svařování nebo řezání. Každý materiál má jinou hodnotu absorpce různých vlnových délek a tak jsou některé typy laserů výhodnější pro určitý materiál – vyobrazeno na obrázku č. 11. Obecně platí, že pro kovové materiály jsou vhodnější nižší vlnové délky (např. Nd:YAG laser) a pro organické materiály (kůže, dřevo, některé plasty) vyšší vlnové délky (CO₂ laser).



Obrázek č. 11 – Graf absorpce magnetického záření různých materiálů

Nejčastěji používané typy laserů pro popis kovů jsou Nd:YAG, diodové a vláknové.

Popisování kovů lasery typu CO₂ je velmi nevýhodné z důvodů velké odrazivosti kovů, tento laser je vhodný pro popis organických a nekovových materiálů (dřevo, skla, kůže, různé plasty, atd.).

Grafický motiv nebo text vzniká pohybem soustředěného laserového svazku po materiálu. Pohyb paprsku je zajištěn obvykle jedním z dvou základních způsobů:

- Plotr XY
- Galvoscaner

Plotr XY

Optická hlava laseru je upnutá na kolejnicích (support), které umožňují hlavě příčný a podélný pohyb nad popisovaným materiálem. V rozích tohoto systému jsou umístěná zrcadla a paprsek je jimi směřovaný od laseru až do optické hlavy.

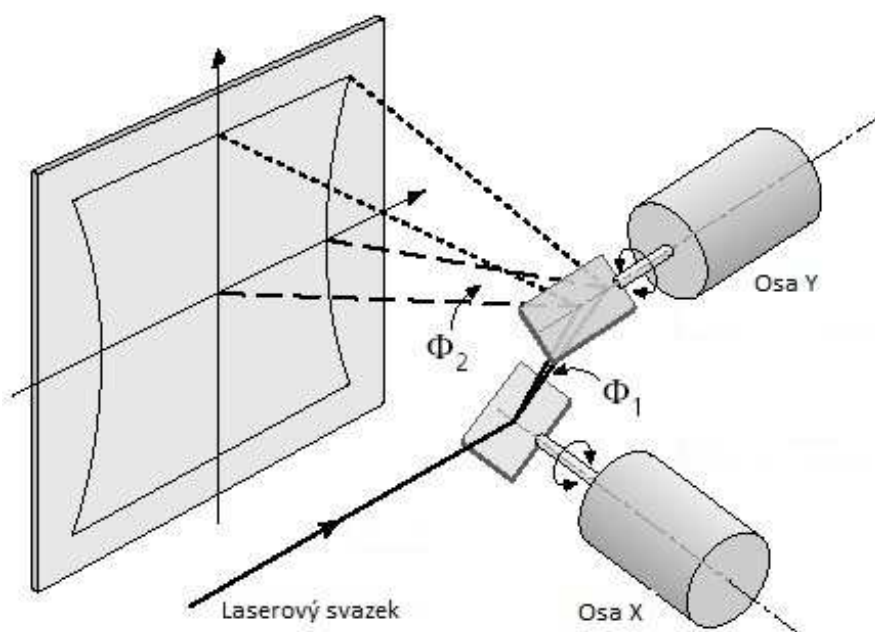
Systém plotru umožňuje značení a řezání rozměrných plošných materiálů, až 1500 x 3000 mm. Takto vybavené stroje jsou většinou osazeny CO₂ laserem o výkonech do 300W, silnější a větší plotrové systémy (obrázek č. 12) jsou obvykle určeny k opravování resp. řezání materiálu. Nevýhodou je nižší rychlost popisu a menší přesnost.



Obrázek č. 12 – Řezací laser KASRY KR-PLG1530 3,0kW

Galvoscanner

Laserový paprsek je přiveden do Galvo-hlavy, která je pevně uchycena na rám stroje. Pohyb paprsku je zajištěn dvěma zrcadly, každé ze zrcadel zajišťuje pohyb v jedné ose. Tato zrcadla jsou upevněna na výstupní ose na sebe kolmých elementů (nejčastěji servomotory nebo elektromagnety), jak je zobrazeno na obrázku č. 13. Oproti plotru je tento systém značení velmi rychlý, jeho nevýhodou je ale malá plocha značení, obvykle 200 x 200 mm. Pohyb v ose Z je zajištěný pohybem celé hlavy. Systém je nejčastěji ve spojení s vláknovými a diodovými lasery, ale výjimečně se používá i u Nd:YAG nebo CO₂ laserů.



Obrázek č. 13 – Uspořádání zrcadel v galvoscanneru.

Kombinace plotru a galvoscanneru

Oba tyto systémy lze kombinovat, čímž lze získat velkou plochu pro popisování a vyšší rychlost popisu. Plotr je využíván například k řezání materiálu nebo přesunu galvoscanneru na větší vzdálenost a galvoscanner zprostředkovává popisování součástí.

1.5.2 Popisování korozivzdorných ocelí laserem

U korozivzdorných materiálů při tepelném ovlivnění vzniká na povrchu přirozená transparentní oxidická vrstva. Tato vrstva má určitou tloušťku a může tvořit náběhovou barvu.

Náběhové barvy vznikají působením tepla na materiál, převážně pak v teplem ovlivněných oblastech po svařování (tento vznik barev je eliminován použitím ochranné atmosféry). Při tvorbě náběhových barev na ocelích se chrom dostává na povrchovou plochu, kde oxiduje rychleji než železo. Na chrom chudá povrchová vrstva snižuje antikorozi odolnost povrchu.

Úkolem této bakalářské práce je zjistit, při jakých teplotách (resp. výkonech a parametrech laseru) dojde k tepelnému ovlivnění a následnému barevnému zabarvení základního materiálu.

[16, 17, 18]

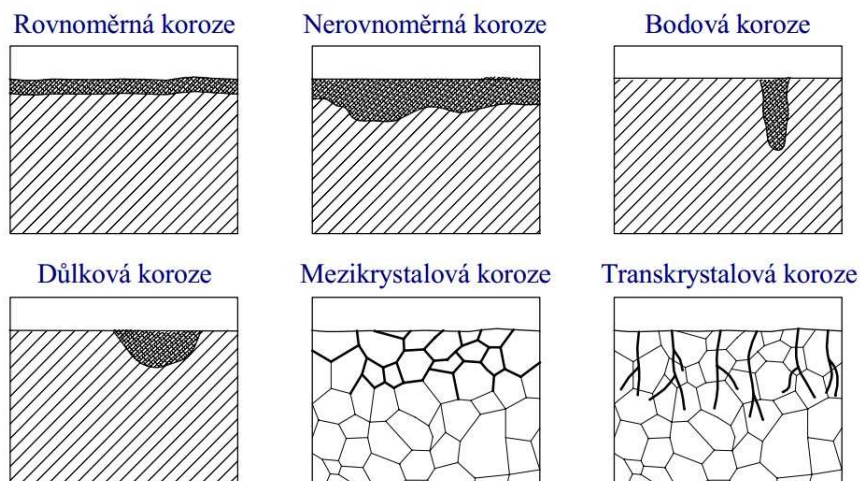
2. Korozivzdorné materiály

Tato práce se primárně zabývá barevným laserovým popisem korozivzdorných vysokolegovaných ocelí, proto je nutné se zde zmínit o vlastnostech popisovaného materiálu – tzn. korozivzdorných ocelí a druzích korozního napadení.

2.1 Koroze

Koroze - z latinského *corode* = nahlodávat. Jedná se o samovolné znehodnocování a degradaci materiálu, které vzniká fyzikálně-chemickou interakcí dvou různých, navzájem reagujících materiálů. Vyvolává změny struktury materiálu, vzhledu, pevnosti a úbytky hmotnosti a rozměrů. Korozí nepodléhá jen kov, ale i materiály nekovové (polymery, plasty, sklo, keramika, atd.).

Koroze se může dělit podle charakteru probíhajících dějů a to na korozi chemickou a elektrochemickou nebo se dělí podle druhu napadení materiálu a to na korozi rovnoměrnou, nerovnoměrnou, bodovou, důlkovou, mezikrystalovou a transkrystalovou. Na obrázku č. 14 je schématické znázornění koroze podle druhu napadení.



Obrázek č. 14 – Dělení koroze dle druhu napadení materiálu

2.1.1 Dělení koroze podle probíhajících dějů:

Chemická koroze

Jedná se o chemickou reakci, která probíhá mezi povrchem součásti a elektricky nevodivým prostředím (nejčastěji se jedná o plyn). Probíhá nejčastěji a rychleji za vysokých teplot. Oxidace může probíhat i u neželezných kovů, ale tam je průnik koroze do materiálu zamezeno tenkou vrstvou oxidů (například zelená patina u mědi, Al_2O_3 u hliníku a jeho slitin). Nejčastějším příkladem chemické koroze je tvoření okujů při ohřevu oceli (například při tváření za tepla).

Elektrochemická koroze:

Součást nebo materiál je ve vodivém prostředí. Tento děj probíhá rychleji i za nižších teplot než koroze chemická. Mezi materiálem a reakčním prostředím (elektrolytem) se tvoří galvanický člunek. Reakce může probíhat jak oxidací, tak redukcí materiálu.

[12, 13, 14]

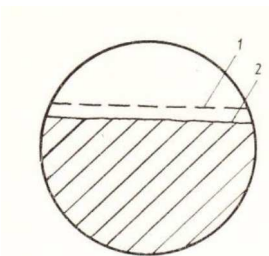
2.1.2 Dělení koroze podle druhu napadení:

Koroze rovnoměrná

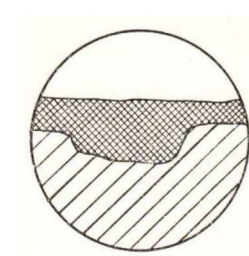
Rovnoměrná koroze vzniká při vysoké reaktivitě mezi prostředím a kovem za určitých podmínek, které umožňují přístup reaktivnímu prostředí k celému povrchu součásti. Dochází k úbytku materiálu po celém povrchu součásti stejnou měrou (obrázek č. 15). Lze snadno stanovit rychlost úbytku. Jedná se o nejpříznivější typ koroze, je možné ji lehce brát v úvahu a je snadno viditelná.

Koroze nerovnoměrná

Koroze začíná vznikat v místech s největší korozní aktivitou a počet korozních míst se zvyšuje, se zvyšující se reaktivitou prostředí. Příčin vzniků této koroze může být více a tak může vznikat např.: při bodovém dotyku s jiným reaktivním materiálem v místě dotyku, různorodostí složení vlastního kovu nebo jiné složení okolního prostředí. Nerovnoměrná koroze se může rozšířit plošně až v korozi rovnoměrnou (obrázek č. 16) nebo vyvolat jiný druh nerovnoměrné koroze – bodovou, důlkovou, atd.



Obrázek č. 15 – Rovnoměrné napadení koroze: 1 – koroze, 2 – základní materiál



Obrázek č. 16 – Nerovnoměrná

Koroze důlková

Vzniká v místech nestejnorodosti základního materiálu nebo ve strukturní rozdílnosti ochranných vrstev, nejčastěji v místech, kde byla narušena pasivní vrstva materiálu. Projevuje se formou větších nebo menších důlků na povrchu součásti, často je hloubka napadení stejná, jako je jejich šířka.

Koroze bodová

Vznik je zapříčiněný stejnými důsledky jako koroze důlková a to nestejnorodostí základního materiálu, strukturní rozdílností ochranných vrstev a objevuje se nejčastěji v místech narušení pasivní vrstvy. Jedná se o ojedinělé korozní body, kdy zbytek materiálu nemá další zřejmé napadení korozí. Oproti korozi důlkové je koroze bodová hlubší a proniká dále do materiálu, to je může vést až k proděravění materiálu.

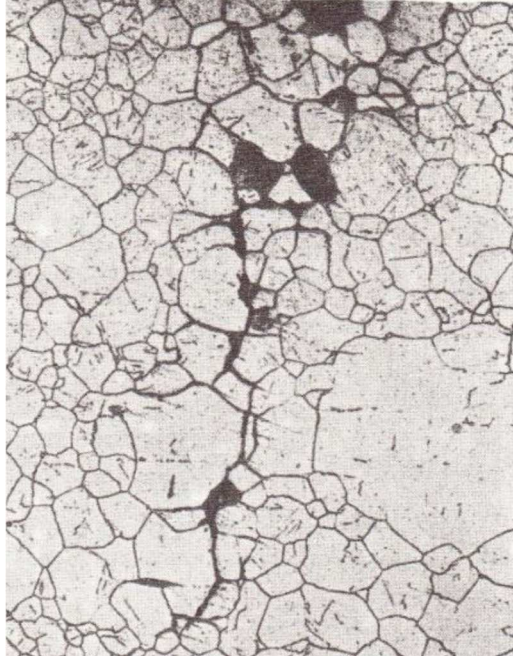
[14, 15]

Koroze mezikrystalová a transkrystalová

Koroze mezikrystalová, zobrazena na obrázku č. 17, napadá hranice mezi krystaly materiálu, zatím co koroze transkrystalová probíhá současně i v zrnech samotných. Jedná se o nebezpečnou formu koroze, protože nemusí být vidět z povrchu součásti. Nejčastěji této korozi podléhají slitiny různých materiálů, kde dochází ke změnám struktury na hranicích zrn, nejčastěji následkem stárnutí nebo tepelného zpracování materiálu.

U korozivzdorných ocelí může této korozi podléhat materiál v blízkosti svarů a jejich okolí, kde je tato reakce způsobena ohřevem v kritické oblasti a následnému ochuzení o chrom, který je nezbytný pro zachování korozivzdornosti.

[15, 16]



Obrázek č. 17 – Mezikrystalová koroze

2.2 Korozivzdorné oceli

Korozivzdorná ocel je ocel vysoce legovaná (tzn. více jak 10% legujících prvků), která má schopnost odolávat chemické a elektrochemické korozi. Oceli i s touto vlastností korodují, ale mají zvýšenou životnost a vznikají jen některé typy koroze a případně vzniklá koroze postupuje pomaleji.

Korozní odolnost je zajištěna pasivní vrstvou materiálu. Při mechanickém poškození se tato vrstva v místě opotřebení znovu vytvoří a tím je zajištěna dlouhotrvající ochrana. Lze ale i tak objevit různé druhy koroze u těchto materiálů – štěrbinová, bodová, mezikrystalická koroze, korozní praskání, atd.

Pasivační vrstva, která je pro materiál zároveň vrstvou ochranou, se na oceli tvoří, pokud je v ní obsaženo alespoň 11,7 hm% Cr. Se zvyšujícím se procentem obsahu Cr se stálost ocelí zvyšuje. Dalšími nejčastějšími legujícími prvky jsou nikl (Ni), který podporuje pasivační vrstvu a zvyšuje odolnost proti redukčním kyselinám a molybden (Mo), který zvyšuje odolnost proti bodové korozi.

[12, 13]

2.2.1 Rozdělení korozivzdorných ocelí

Korozivzdorné oceli se dělí do 4 základních skupin dle tabulky č. 3.

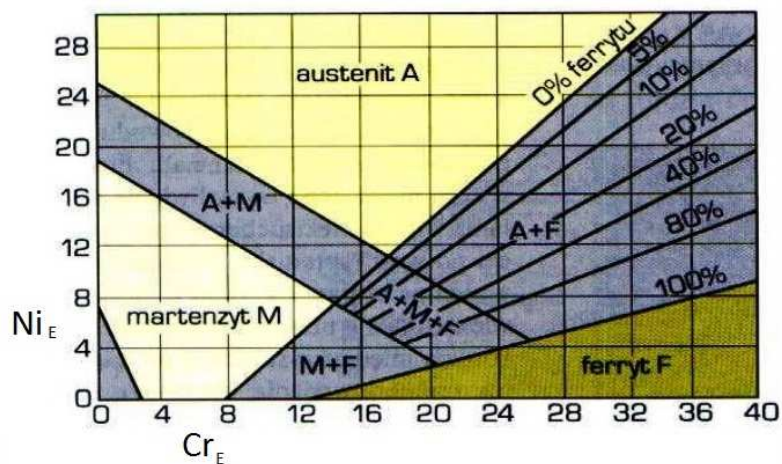
Tabulka č. 3 – Rozdělení korozivzdorných ocelí

| Struktura | Hlavní legující složky |
|------------------------|---|
| feritická | Cr |
| martenzitická | Cr, C nebo Ni |
| austenitická | Cr, Ni, Mo |
| austeniticko-feritická | Cr, Ni, Mo (vyšší obsahy chromu a nižší obsahy Ni než u austenitických ocelí) |

Z tohoto rozdělení vyplývá, že na vlastnosti korozivzdorných ocelí má největší vliv chemické složení – množství a typ legujících prvků. Tyto legující prvky se dělí na dvě hlavní skupiny: prvky austenitotvorné (např. Ni) a feritotvorné (např. Cr). Celkový vliv legujících prvků lze vyjádřit niklovým resp. chromovým ekvivalentem a pomocí konstitučních diagramů (např. Schaefflerův diagram – obrázek č.).

Niklový ekvivalent: $Ni_E = \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn + 30 \times \%N$

Chromový ekvivalent: $Cr_E = \%Cr + 1,4 \times \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb + 2 \times \%Ti$



Obrázek č. 18 – Schaefflerův diagram

Vliv základních legujících prvků korozivzdorných ocelí:

- Chrom: zajišťuje pasivovatelnost ocelí (obsah minimálně 11,5%) a odolnost proti oxidaci, s rostoucím obsahem Cr se zvyšuje korozivzdornost v oxidačním prostředí
- Nikl: stabilizuje austenit za normální teploty a zvyšuje korozní odolnost v redukčních kyselinách, druhý nejdůležitější prvek korozivzdorných ocelí, bývá nahrazován manganem
- Mangan: austenitotvorný prvek, při vyšším obsahu nad 3% snižuje náchylnost k praskání svarů, zhoršuje obrobitelnost

- Dusík: silně austenitotvorný jako uhlík, zvyšuje pevnostní hodnoty, s Mo snižuje riziko bodové a štěrbinové koroze
- Křemík: vyvolává praskavost svarů, při koncentraci 3 až 4 % snižuje riziko mezikrystalické korozi a zvyšuje odolnost ve vroucí HNO₃
- Molybden: zvyšuje odolnost ve všech korozivních prostředích, zvyšuje žárupevnost, feritotvorný prvek,
- Měď: austenitotvorný prvek, zvyšuje korozní odolnost v prostředích s H₂SO₄, zlepšuje obrobiteľnosť, přidává se do vytvrditelných ocelí
- Titan a Niob: karbidotvorné prvky, stabilizace ocelí díky afinitě k uhlíku, přidávají se do vytvrditelných ocelí

2.2.1.1 Feritická ocel

Feritické korozivzdorné oceli se dosahuje příslušným tepelným zpracováním v rozmezí od 750 do 900°C při obsahu chromu od 13 do 30% a uhlíku pod 0,1%. I při těchto teplotách tyto oceli nedosáhnou přeměny na austenit, proto zde vzniká struktura feritu α (obrázek č. 19). Tyto oceli nemají objemové změny oproti kalitelným ocelím.

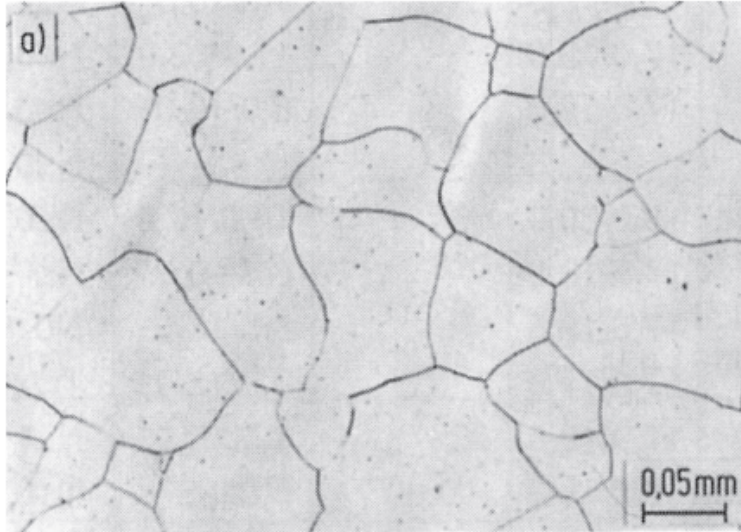
Mezi hlavní nevýhody feritických ocelí patří křehnutí při teplotách nad 800°C, které se projevuje nejčastěji při svařování bez dalšího doplňkového tepelného zpracování. V takových případech se využívá ocel s vyšším obsahem Cr (od 17%) s dolegováním titanem nebo niobem, což jsou karbidotvorné prvky, které vytváří ocel stálejší i po svařování, tzv. stabilizace oceli.

Největší výhodou feritických ocelí je, že mají vysokou odolnost proti transkrystalové korozi i při vyšším mechanickém napětí.

Feritické oceli se dělí do tří podskupin:

- Oceli s obsahem Cr 11,5-13,5%, C<0,08% a Ti, No<1%.
- Oceli s obsahem Cr 13,6-18%, C<0,1%, Ti, No<1%, Mo<2%.
- Oceli s obsahem Cr 18-30%, C<0,2%, Mo<4%.

Při ohřevu feritických ocelí nad 900°C a obsahu Cr od 13 do 16% lze dosáhnout austenitu a následným ochlazením částečnou martenzitickou strukturu, tyto oceli se potom nazývají poloferitické.



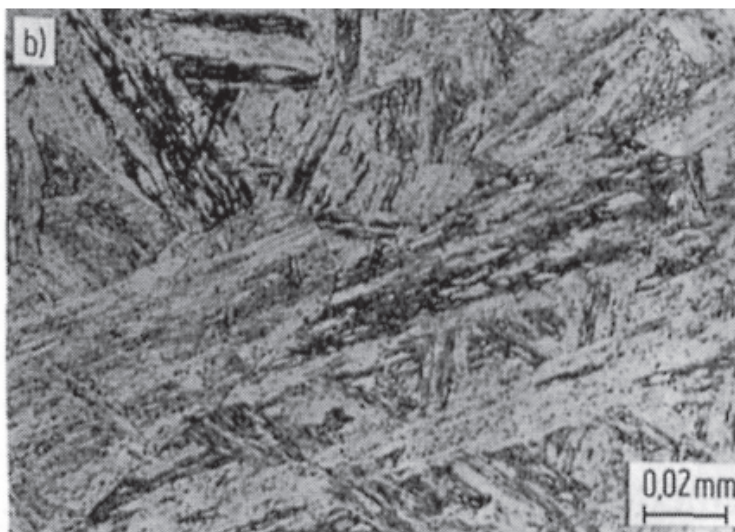
Obrázek č. 19 – Struktura feritické oceli

2.2.1.2 Martenzitická ocel

Martenzitické oceli mají obsah chromu do 18% a uhlíku od 0,15 do 1,5%. Díky vyššímu obsahu Cr se dosahuje přeměny austenitu na martenzitickou strukturu (obrázek č. 20) i za chladnutí oceli volně na vzduchu z teploty kalení (A_{c3}).

Martenzitické oceli se používají převážně v běžných korozivních podmínkách, jako jsou atmosféra, voda, pára. Využití najdou jako lopatky parních turbín nebo součásti vodních čerpadel. Martenzitické oceli s vyšším obsahem uhlíku jsou pevnější a používají se na výrobu řezných nástrojů převážně v potravinářském, farmaceutickém a kosmetickém průmyslu.

Chromové oceli legované niklem ($Ni < 6\%$) se používají převážně pro kontakt se slanou vodou, např.: lopatky lodních šroubů. Tyto oceli mají vyšší pevnost a podmíněnou svařitelnost.



Obrázek č. 20 – Martenzitická struktura oceli

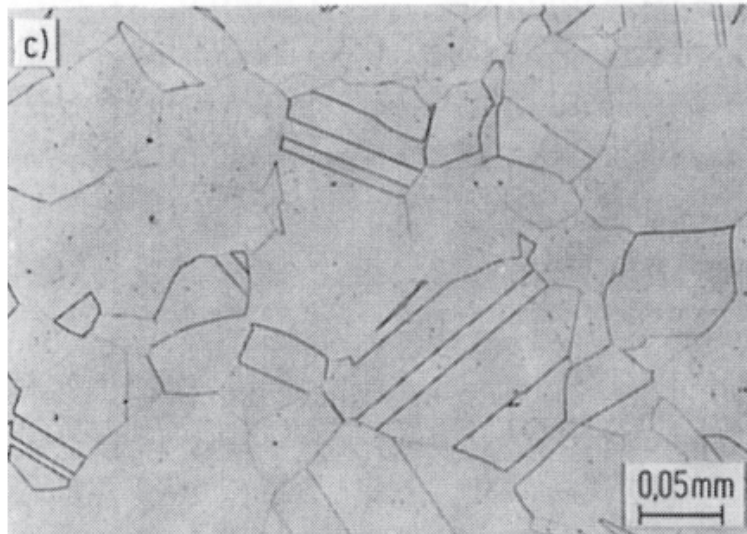
2.2.1.3 Austenitická ocel

Běžné složení austenitických ocelí tvoří 16 až 22% chromu, 0,1% uhlíku a méně, 8 až 40% niklu, méně než 5% molybdenu a další legující prvky jako titan, niob, měď, křemík a dusík. Austenitické oceli jsou tvárné, mají vysokou tažnost a vrubovou houževnatost i při nízkých teplotách. Austenitické struktury (obrázek č. 21) lze dosáhnout za normálních teplot, ale i pod bodem mrazu.

Může se dělit do dvou základních skupin a to:

- Chromniklové
- Chrommanganové

Austenitické oceli jsou nemagnetické, používají se nejčastěji v chemickém a potravinářském průmyslu. Austenitická ocel je vhodná i pro transport zkapalněných plynů (mohou být použitelné až do -170°C s dobrou vrubovou houževnatostí). Tyto oceli tvářením za studena získávají vyšší pevnost. Velkou výhodou těchto ocelí je, díky dobré tvárnosti, možnost dodávání ve všech formách hutních materiálů (plechy, tyče, trubky, dráty, atd.).

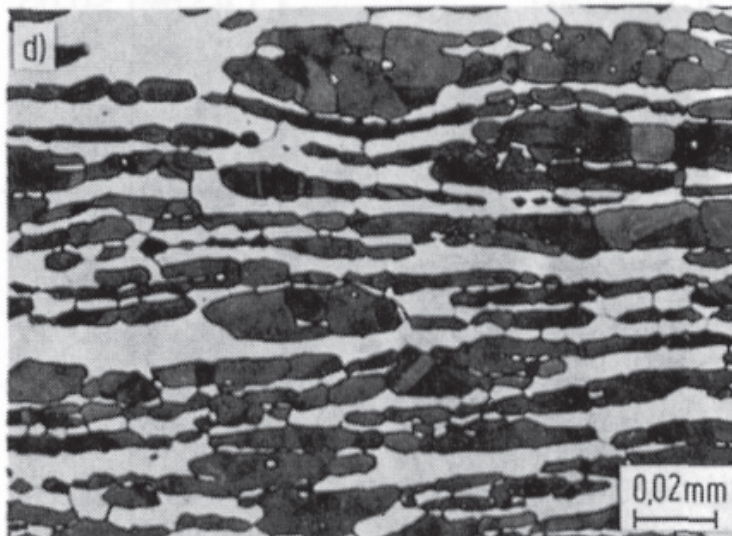


Obrázek č. 21 – Struktura austenitické oceli

2.2.1.4 Austeniticko-feritická ocel

Díky svým dvěma složkám se tyto oceli často označují jako oceli duplexní. Strukturu tak tvoří jak austenit i ferit δ (obrázek č. 22). Feritu je v oceli obsaženo 30 až 50%, ačkoliv optimální poměr složek je 1:1. Podíl těchto složek je závislý na přítomnosti legujících prvků. Toto určité složení propůjčuje oceli kladné vlastnosti obou složek, ocel je houževnatá při zachování vysoké pevnosti.

Velkou nevýhodou duplexních ocelí je stárnutí a křehnutí. Vysoká křehkost nastává při dlouhodobému vystavení teplotám nad 750°C a rychlé stárnutí při cyklickém ohřevu v intervalu teplot $350 - 550^{\circ}\text{C}$.



Obrázek č. 22 – Struktura austeniticko-feritické oceli

[13,14,16]

2.3 Materiál pro experimentální část

Pro experimentální část byla vybrána austenitická korozivzdorná ocel – typ 1.4301.

Nerezová ocel 1.4301 (X5CrNi 18/10):

Jedná se o chrom-niklovou austenitickou ocel s následujícím obsahem hlavních prvků:

| | |
|----|----------|
| Cr | 17-19,5% |
| Ni | 8-10,5% |
| C | <0,07% |

Mechanické vlastnosti:

R_m: 520 – 720 N/mm²

Tažnost A₈₀: minimálně 45%

Žíhací teplota 1000 – 1100 °C

Ocel je nemagnetická, nekalitelná. Odolná proti korozi v prostředí běžného typu (voda, slabé alkálie, slabé kyseliny, průmyslové a velkoměstské atmosféry). Vhodná pro obecné používání – potravinářský průmysl, vnější konstrukce, externí architektura, vodárny, atd.

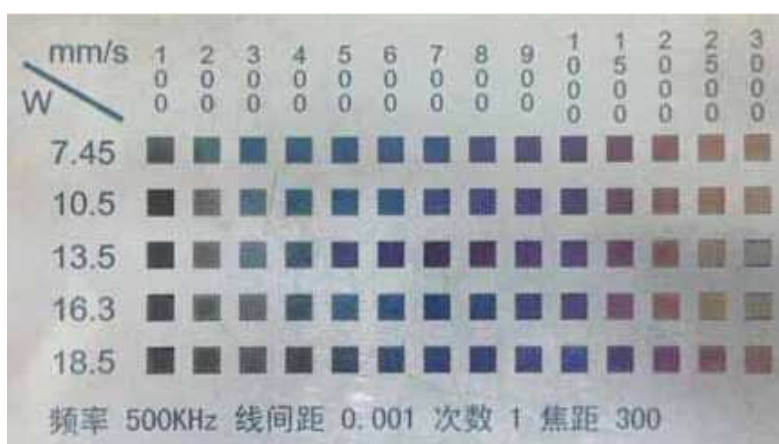
Materiál je ve formě plechu o tloušťce 0,5 a 1,5 mm. Plech je leštěný.

PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem experimentu bylo zjištění a vyhodnocení vhodných parametrů pro nastavení vláknového laseru pro barevné popisování a značení austenitických korozivzdorných ocelí. Úkolem bylo pozorovat vliv laserového paprsku na zkoušený materiál a zajištění optimálních podmínek pro vytvoření čistého grafického motivu s dosažením rozdílných barev. Zkušební materiál byl vyroben z chrom niklové austenitické oceli.

Experiment byl uskutečněný ve firmě **LCV Praha s.r.o** - Na Jarově 2/2424, 130 00, Praha 3.

Obrázek č. 23 ukazuje možnost barevného značení na oceli AISI 304L = EN 1.4307 pomocí vláknového laseru.



Obrázek č. 23 – Možnosti barevného značení vláknovým laserem [21]

3. Vybavení pro experiment

Popis probíhal na vláknovém laseru **redENERGY G4** firmy **SPI Laser** (obrázek č. 24).

Laserový paprsek je veden optickým vláknem do galvoscaneru **RL-14 D2** firmy **RAYLASE** (obrázek č. 25 a č. 26) s objektivem **F-Theta 163 mm**.

Z-tová souřadnice galvoscaneru je ovládána elektronicky v boxu, kde je umístěný pracovní stůl společně s laserem.

System je řízený počítačovým programem **RAYLASE AG weldMARK 2.0** (obrázek č. 27), kde je možné vytvářet vlastní grafické motivy popisu nebo transformovat soubory vytvořené v jiných programech. Lze používat soubory typu: .jpg, .bmp, .dxf., .plt, .hpg, .stl, .txt, atd.



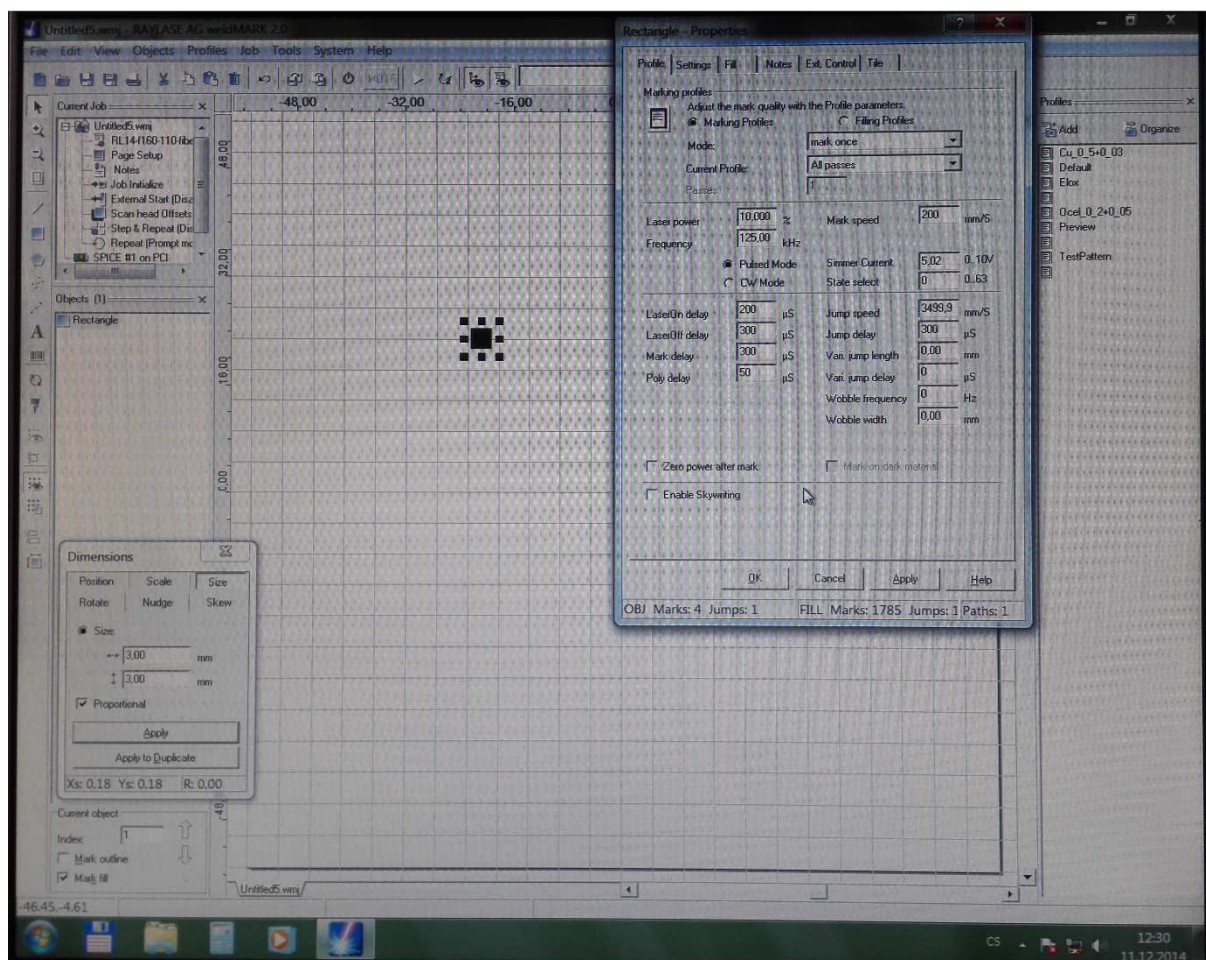
Obrázek č. 24 – Laser redENERGY G4 - SPI Lasers



Obrázek č. 25 – Galvoscanter RL-14 D2 – RAYLASE



Obrázek č. 26 – Galvoscanter RL-14 D2 – RAYLASE umístěný v boxu



Obrázek č. 27 – Čtverec a nastavování jeho parametrů popisu v programu RAYLASE AG weldMARK 2.0

3.1 Vlákňový pulsní laser – vlastnosti

Vlastnosti laserového zdroje jsou v tabulce č. 4.

Tabulka č. 4 – Vlastnosti laserového zdroje

| RedENERGY G4 – SPI Lasers | | | | | |
|---------------------------|--------------------------------|--------------|-------------------------|---------------|---------------------------------|
| Maximální výkon | Maximální špičkový výkon pulsu | Vlnová délka | Minimální energie pulsu | Napájení | Frekvenční rozsah pulsního módu |
| 40 W | 20 kW | 1064 nm | 1,25 mJ | 24 V 300 W | 1-1000 kHz |

3.2 Galvoscanner RL-14 D2 firmy RAYLASE, objektiv F-Theta 163 mm

Velikost stopy dopadu fokusovaného laserového svazku – 50 μ m.

Velikost pracovní plochy 100 x 100 mm.

Ohnisková vzdálenost 227 mm.

3.3 Zkušební materiál

Zkušební materiál byl dodán firmou LCV Praha s.r.o. Pro první část experimentu byl použit ocelový plech o rozměrech 85 x 55 mm a tloušťce 0,5 mm a pro druhou část plech o rozměrech 110 x 80 mm a tloušťce 1,5 mm (obrázek č. 28) Plech byl na rozměry nařezaný laserem.

Materiál:

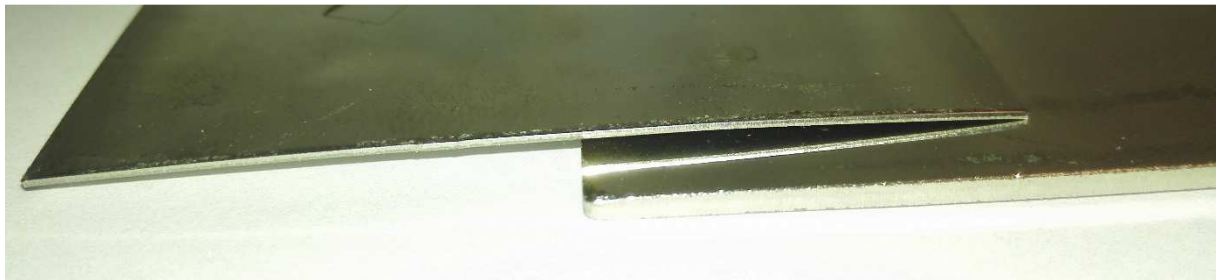
Nerezová ocel 1. 4301 (X5CrNi 18/10)

Jedná se o chrom-niklovou austenitickou ocel s následujícím obsahem hl. prvků:

| | |
|----|----------|
| Cr | 17-19,5% |
| Ni | 8-10,5% |
| C | <0,07% |

Ocel je nemagnetická.

Vhodná pro obecné používání – potravinářský průmysl, vnější konstrukce, externí architektura, vodárny, atd.



Obrázek č. 28 – Zkušební vzorky: plech 85 x 55 mm, tloušťka 0,5 mm a 110 x 80 mm, tloušťka 1,5 mm

4. Průběh experimentu

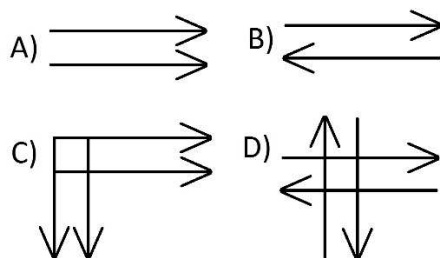
Všechny vzorky byli očištěny technickým lihem od otisků a mastnoty, tyto nečistoty mohou mít vliv na tloušťku oxidické vrstvy a tím na zabarvení povrchu. Výsledky byly hodnoceny na základě vizuální kontroly.

Pomocí PC v programu RAYLASE AG weldMARK 2.0 byla navržena tabulka čtverců o určitých rozměrech na plochu zkoušeného vzorku. Každému čtverci v této soustavě byly uděleny rozdílné parametry, které zajistí rozdílnost výsledku a možnost pozorování vlivu měnících se parametrů na barvu popisu.

Pro lepší orientaci se parametry mění postupně v každém řádku nebo formou matice po osách X a Y.

Možnosti nastavení parametrů pro změnu barevného rozlišení oxidické vrstvy jsou následující:

- Výkon laseru [%]
- Popisovací rychlost [mm/s]
- Frekvence [kHz]
- Směr řádkování výplně – jednosměrné linkování, jednosměrné linkování křížem, obousměrné linkování, obousměrné linkování křížem (obrázek č. 29)
- Rozestup řádkování výplně [mm]



Obrázek č. 29 – Směr výplně grafických motivů: A) jednosměrné linkování, B) obousměrné linkování, C) jednosměrné linkování křížem, D) obousměrné linkování křížem

Na pracovní stůl stroje se pomocí programu RAYLASE AG weldMARK 2.0 promítne červeným nízkovýkonným laserem (dioda) místo, kam bude laser směřovat při popisování. Dle zkušební vzorku a promítnutého čtyřúhelníku se nastaví úhelník položený na pracovním stole (viditelné na obrázku č. 25).

Zkušební vzorek se umístí do rohu přednastaveného úhelníku. Pro správnou funkci laseru se nastaví výška objektivu galvoscaneru – ohnisková vzdálenost laseru od popisovaného materiálu. Po zapnutí laseru se spustí nastavený program a laser začne pracovat.

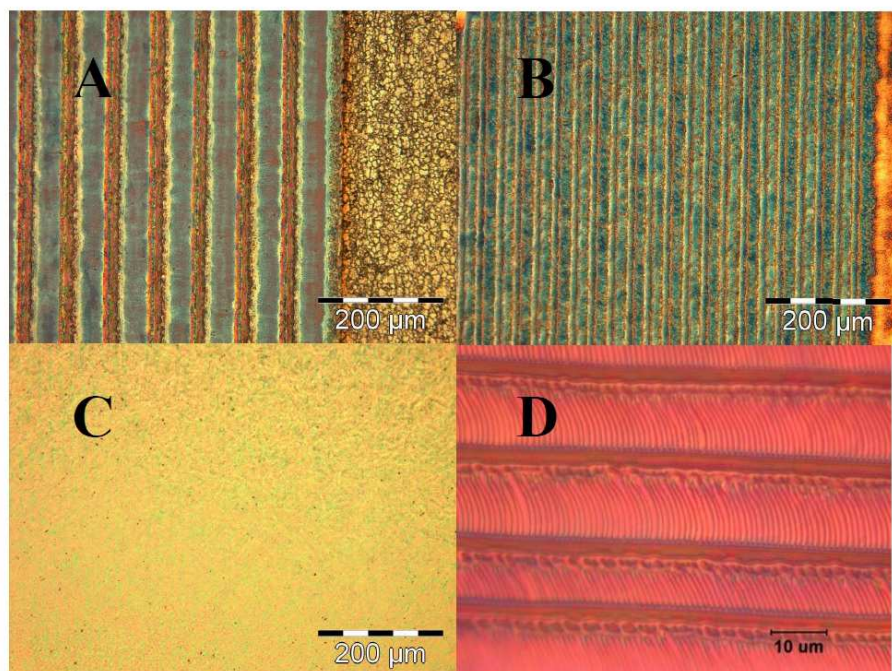
Pro barevný popis existuje více technik překrytí jednotlivých dopadových stop fokusovaného laserového svazku. Na obrázku č. 30 jsou čtyři různé techniky značení.

A) V této části je znázorněné popisování oceli po řádcích (sloupcích) těsně vedle sebe nebo navzájem vzdálených o minimální rozměr, ale vyznačené stopy se nepřekrývají – barva na obrázku se lidskému oku jeví jako modrá.

B) V této části se řádky (sloupce) tepelně ovlivněných oblastí částečně překrývají. Oproti části a) se zde volí nižší výkon laseru nebo vyšší rychlost popisu, aby se dosáhlo podobných výsledků. Barva v této části se lidskému oku jeví jako zelená.

C) Zde se řádky opět překrývají, ale velmi těsně, že ani na snímku z mikroskopu nelze vidět řádkování. U takto těsného řádkování je nutné zajistit velmi nízký výkon nebo vysokou rychlost popisu, hrozí natavení a spálení materiálu. Barva je viditelná jako žlutá.

D) Oproti předchozím částem se na této části nevytvořila běžná vrstva oxidu po řádkování, ale díky vyššímu výkonu každého pulsu se zde vytvořili natavené body, které ihned tuhnou a při tuhnutí vytváří malé hrany okolo těchto natavených bodů. Takto vytvořený povrch láme světlo v určitých úhlech a tím vytváří duhové barvy.



Obrázek č. 30 – Možnosti barevného značení oceli

[19]

4.1 Vzorek č. 1

Materiál použitý pro tento pokus byl plech 85 x 55 mm, tloušťka 0,5 mm.

V programu RAYLASE AG weldMARK 2.0 byla sestavena tabulka čtvercových bodů o rozměrech 5 x 5 mm v rozmezí velikosti zkušební vzorku o rozměrech 85 x 55 mm = 13 x 8 čtverců s mezerou 1 mm.

Ohnisková vzdálenost laseru byla nastavena na výchozích 227 mm.

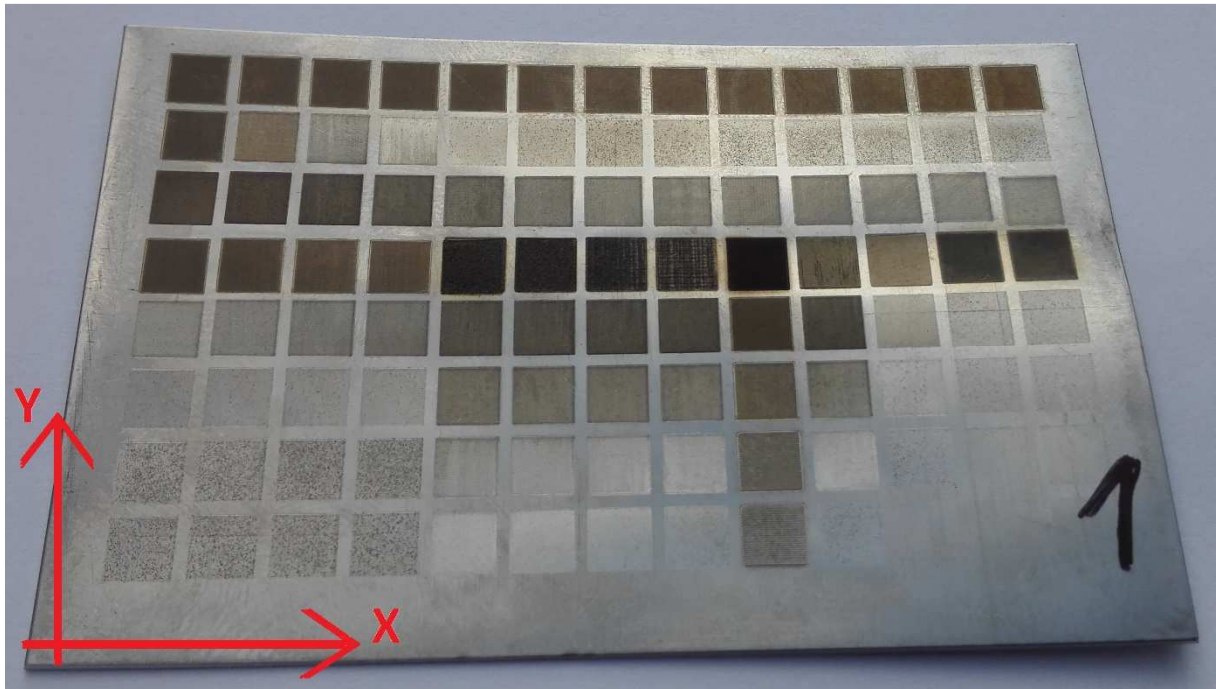
V tabulce č. 5 je rozpis konstantních hodnot a proměnných hodnot pro vzorek č. 1. V tabulce č. 6 jsou rozepsané proměnné hodnoty k vzorku č. 1 přesně v pořadí, jak byl vzorek vytvořen.

Tabulka č. 5 – Nastavení hodnot pro 1. vzorek

| | |
|-----------------|---|
| Řádek č.1 | Konstantní hodnoty: rychlost popisu = 3000 mm/s, rozestup řádkování = 0,005 mm, pulsní frekvence = 45 kHz, směr řádkování = jednosměrné Proměnná hodnota: % výkon laseru |
| Řádek č.2 | Konstantní hodnoty: rychlost popisu = 3000 mm/s, rozestup řádkování = 0,005 mm, výkonu laseru = 25%, směr řádkování = jednosměrné Proměnná hodnota: pulsí frekvence kHz |
| Řádek č.3 | Konstantní hodnoty: pulsí frekvence = 120 kHz, rozestup řádkování = 0,005 mm, výkonu laseru = 25%, směr řádkování = jednosměrné Proměnná hodnota: rychlost popisu mm/s |
| Tabulka část 1. | Konstantní hodnoty: rychlost popisu = 3000 mm/s, rozestup řádkování = 0,005 mm, směr řádkování = jednosměrné Proměnná hodnota: Osa X: výkonu laseru -%, Osa Y: pulsí frekvence - kHz |
| Tabulka část 2. | Konstantní hodnoty: pulsí frekvence = 120 kHz, rozestup řádkování = 0,005 mm, směr řádkování = jednosměrné Proměnná hodnota: Osa X: výkonu laseru -%, Osa Y: rychlost popisu – mm/s |
| Tabulka část 3. | Konstantní hodnoty: rozestup řádkování = 0,005 mm, výkonu laseru = 25%, směr řádkování = jednosměrné Proměnná hodnota: Osa X: pulsí frekvence kHz, Osa Y: rychlost popisu – mm/s |

Tabulka č. 6 – Rozvržení proměnných hodnot pro vzorek č. 1 příslušných k tabulce č.

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|--------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| 10 | 15 | 20 | 28 | 36 | 44 | 52 | 60 | 68 | 76 | 84 | 92 | 100 |
| 45 | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 | 460 | 500 | 540 |
| 800 | 1400 | 2000 | 2600 | 3200 | 3800 | 4400 | 5000 | 5600 | 6200 | 6800 | 7400 | 8000 |
| 45\10 | 40 | 70 | 100 | 200\10 | 40 | 70 | 100 | 200\45 | 120 | 220 | 370 | 520 |
| 120 | | | | 2000 | | | | 2000 | | | | |
| 220 | | | | 4000 | | | | 4000 | | | | |
| 370 | | | | 6000 | | | | 6000 | | | | |
| 520 | | | | 8000 | | | | 8000 | | | | |



Obrázek č. 31 – Vzorek č. 1

4.1.1 Vyhodnocení vzorku č. 1 – obrázek č. 31

Body byly označeny číselnými souřadnicemi podle souřadného systému vyobrazeného na obrázku č. 31, ve smyslu [X;Y]

Pozorovatelná barva byla pouze bílá ve čtyřech bodech [1-4;4]. Na vzorku nebylo žádné další barevné rozlišení.

V bodech [5;5] a [9;5] lze vidět, že byl materiál příliš tepelně namáhán. Tyto dva body byly v dalších pokusech vynechány, aby se zamezilo vysokému tepelnému namáhání či propálení materiálu.

Vzorek byl značně deformovaný.

Toto nastavení parametrů není vhodné pro barevný popis materiálu.

4.2 Vzorek č. 2

Pro vzorek č. 2 byly zvoleny v programu RAYLASE AG weldMARK 2.0 stejné parametry jako pro vzorek č. 1.

Ohnisková vzdálenost laseru byla změněna na 225 mm.



Obrázek č. 32 – Vzorek č. 2

4.2.1 Vyhodnocení vzorku č. 2 – obrázek č. 32

Body byly označeny číselnými souřadnicemi podle souřadného systému vyobrazeného na obrázku č. 32, ve smyslu [X;Y]

Na tomto vzorku nebylo pozorovatelné žádné barevné rozlišení. Bylo zde zřejmé vysoké tepelné namáhání v bodech [6-10;4].

Vzorek nebyl deformovaný jako předchozí v předchozím případě.

Toto nastavení parametrů není vhodné pro barevný popis materiálu.

4.3 Vzorek č. 3

Pro vzorek č. 3 byly zvoleny v programu RAYLASE AG weldMARK 2.0 stejné parametry jako pro vzorek č. 1 a č. 2.

Ohnisková vzdálenost laseru byla změněna na 230 mm.



Obrázek č. 33 – Vzorek č. 3

4.3.1 Vyhodnocení vzorku č. 3 – obrázek č. 33

Body byly označeny číselnými souřadnicemi podle souřadného systému vyobrazeného na obrázku č. 33, ve smyslu [X;Y]

Na vzorku č. 3 byla viditelná barva zelená v bodě [7;5] a zelenožlutá v bodě [10;5]. Tyto body nejsou jednobarevné – materiál nebyl dostatečně odmaštěn. Body [11-13;5] byli příliš tepelně namáhané.

Vzorek byl značně deformovaný.

Ohnisková vzdálenost byla příliš vysoká, laserový paprsek tak nebyl fokusovaný a ztratil tak část svého výkonu, což vedlo ke ztrátě tepelného výkonu a ve většině bodů tak na materiálu nevznikla oxidická vrstva a je jen vyleštěný. V bodech [11-13;5], kde byla nastavena vysoká pulsní frekvence měla tato ohnisková vzdálenost opačný efekt než u ostatních bodů.

Z těchto tří pokusů bylo zřejmé, že největší vliv na barvu grafických motivů má ohnisková vzdálenost laseru.

4.4 Vzorek č. 4

Vzhledem k velkým deformacím vzorků, byl rozměr zkušební vzorku změněn. Materiál použitý pro tento pokus byl plech 110 x 80 mm, tloušťka 1,5 mm.

V programu RAYLASE AG weldMARK 2.0 byla vytvořena tabulka čtvercových bodů o rozměrech 3 x 3 mm v rozmezí velikosti zkušební vzorku o rozměrech 110 x 80 mm.

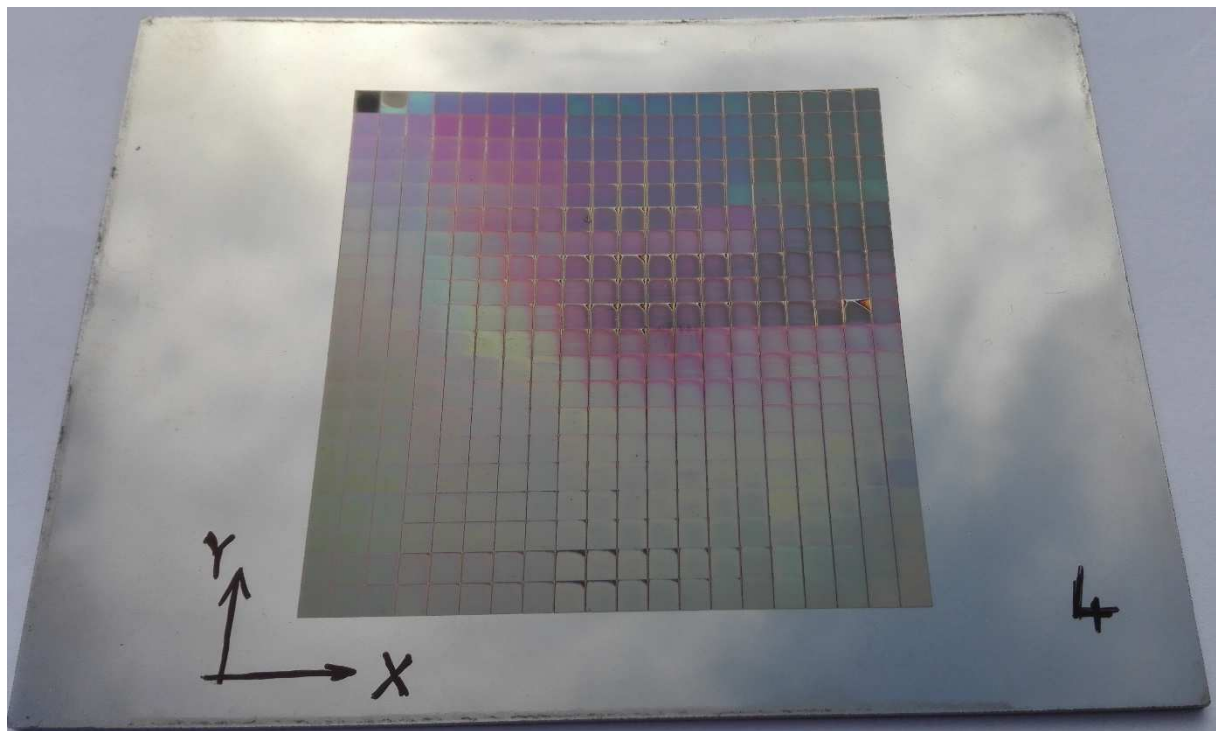
Tabulka byla vytvořena čtvercová, počet malých čtvercových bodů je $20 \times 20 = 400$. Mezery mezi body jsou 0 mm.

Ohnisková vzdálenost laseru je nastavena na 229 mm.

V tabulce č. 7 je rozpis hodnot a proměnných hodnot pro vzorek č. 4. Tyto parametry byly zvoleny podle předchozích vzorků tak, aby co nejlépe odpovídali doposud vzniklým barvám. Proměnné hodnoty se mění po osách X a Y souřadného systému. Ostatní hodnoty jsou konstantní. Na obrázku č. 34 je na vzorku naznačeno, jak je zaveden souřadný systém.

Tabulka č. 7 – Nastavení hodnot pro vzorek č. 4

| | |
|-------------------------|--|
| Konstantní hodnoty | Výkon laseru = 50%, rozestup řádkování = 0,002 mm, Směr řádkování - jednosměrné |
| Proměnné hodnoty: Osa X | Pulsní frekvence [kHz]: 116 až 154; krok = +2 |
| Proměnné hodnoty: Osa Y | Rychlost popisu [mm/s]: 740 až 340; krok = -20 |



Obrázek č. 34 – Vzorek č. 4

4.4.1 Vyhodnocení vzorku č. 4 – obrázek č. 34

Body byly označeny číselnými souřadnicemi podle souřadného systému vyobrazeného na obrázku č. 34, ve smyslu [X;Y]

Na tomto vzorku bylo pozorovatelných více barev:

- Modrá – první řádek, body 4 až 8.
- Tyrkysová – první řádek, body 9 až 16.
- Fialová – druhý a třetí řádek, body 4 až 8.

V dalších bodech se barvy plynule mění do světle zelené (směrem doprava) a do okrové (směrem dolů).

4.5 Vzorek č. 5

Použitý materiál a rozměr vzorku použitý pro tento pokus byl zachován z předchozího případu, tj. plech 110 x 80 mm, tloušťka 1,5 mm.

V programu RAYLASE AG weldMARK 2.0 byla vytvořena tabulka čtvercových bodů o rozměrech 2 x 2 mm v rozmezí velikosti zkušební vzorku o rozměrech 110 x 80 mm.

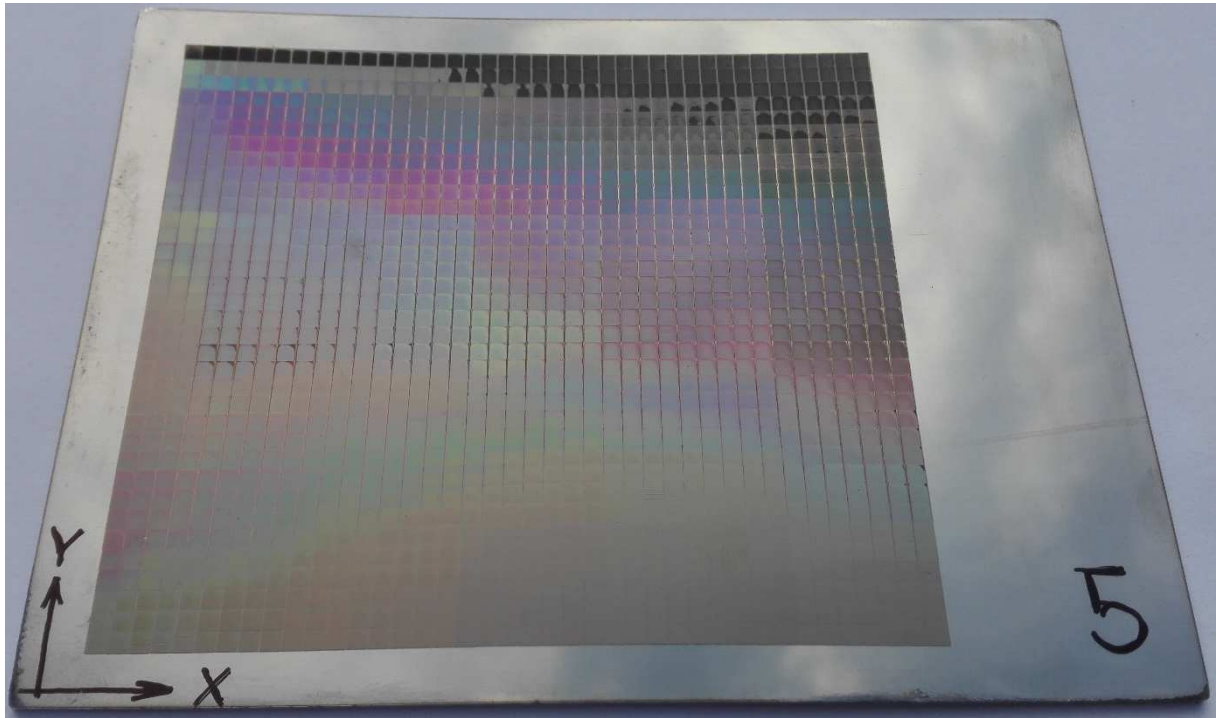
Tabulka byla vytvořena obdélníková, oproti předchozím experimentům je počet malých čtvercových bodů zvýšený na $40 \times 35 = 1400$. Mezery mezi body jsou 0 mm.

Ohnisková vzdálenost laseru byla nastavena na 228 mm.

V tabulce č. 8 je rozpis konstantních a proměnných hodnot pro vzorek č. 5. Tyto parametry byly zvoleny podle předchozích vzorků tak, aby co nejlíže odpovídali doposud vzniklým barvám. Proměnné hodnoty se mění po osách X a Y souřadného systému. Ostatní hodnoty jsou konstantní. Na obrázku č. 35 je na vzorku naznačeno, jak je zaveden souřadný systém.

Tabulka č. 8 – Nastavení hodnot pro vzorek č. 5

| | |
|-------------------------|--|
| Konstantní hodnoty | Výkon laseru = 50%, rozestup řádkování = 0,002 mm, Směr řádkování - jednosměrné |
| Proměnné hodnoty: Osa X | Pulsní frekvence [kHz]: 98 až 174; krok = +2 |
| Proměnné hodnoty: Osa Y | Rychlost popisu [mm/s]: 920 až 240; krok = -20 |



Obrázek č. 35 – Vzorek č. 5

4.5.1 Vyhodnocení vzorku č. 5 – obrázek č. 35

Body byly označeny číselnými souřadnicemi podle souřadného systému vyobrazeného na obrázku č. 35, ve smyslu [X;Y]

Během tohoto experimentu se materiál částečně deformoval. Pro zamezení této deformace lze popis rozdělit do více segmentů a mezi určitými segmenty nechat materiál vychladnout.

V horní části vzorku lze pozorovat vysoké tepelné namáhání materiálu a jeho spálení, tyto hodnoty budou v další části experimentu vynechány. V spodní části vzorku se barva dále nemění a zůstává konstantní a také bude tato část vynechána.

4.6 Vzorek č. 6

Použitý materiál a rozměr vzorku použitý pro tento pokus byl zachován z předchozího případu tj. plech 110 x 80 mm, tloušťka 1,5 mm.

V programu RAYLASE AG weldMARK 2.0 byly vytvořeny dvě tabulky čtvercových bodů o rozměrech 2 x 2 mm v rozmezí velikosti zkušebního vzorku o rozměrech 110 x 80 mm.

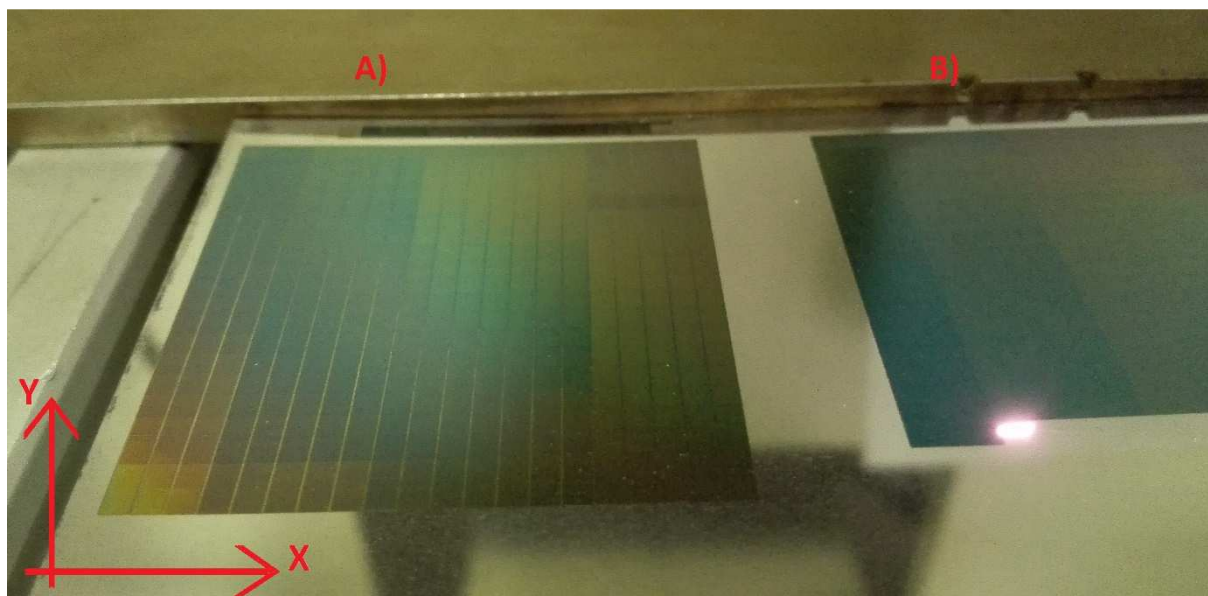
Tabulky byly vytvořeny čtvercové, počet malých čtvercových bodů je $20 \times 20 = 400$ (v každé tabulce). Mezery mezi body jsou 0 mm.

Ohnisková vzdálenost laseru byla nastavena na 228,5 mm.

V tabulce č. 9 je rozpis hodnot a proměnných hodnot pro vzorek č. 5. Tyto parametry jsou zvoleny podle předchozích vzorků tak, aby co nejlépe odpovídali doposud vzniklým barvám. Proměnné hodnoty se mění po osách X a Y souřadného systému. Ostatní hodnoty jsou konstantní. Na obrázku č. 36 je na vzorku naznačeno, jak je zaveden souřadný systém. Tabulky jsou označeny písmeny A a B.

Tabulka č. 9 – Nastavení hodnot pro vzorek č. 6

| | |
|-------------------------|--|
| Konstantní hodnoty | Výkon laseru = 50%, rozestup řádkování = 0,002 mm, Směr řádkování: - jednosměrné pro tabulku A) - jednosměrné křížem pro tabulku B) |
| Proměnné hodnoty: Osa X | Pulsní frekvence [kHz]: 116 až 154; krok = +2 |
| Proměnné hodnoty: Osa Y | Rychlost popisu [mm/s]: 740 až 340; krok = -20 |



Obrázek č. 36 – Vzorek č. 6

4.6.1 Vyhodnocení vzorku č. 6 – obrázek č. 36

Body byly označeny číselnými souřadnicemi podle souřadného systému vyobrazeného na obrázku č. 36, ve smyslu [X;Y]

Na tomto vzorku lze pozorovat velké barevné rozlišení.

V horní části vzorku č. 6 v tabulce A) se barvy zleva mění plynule z modré do zelené a shora přes fialovou a červenou do žluté. V tabulce A) bylo širší spektrum barev.

V tabulce B) byly barvy sytější, změna nastavení parametrů je pouze ve směru řádkování dopadové stopy laserového svazku.

4.7 Vyhodnocení celkového experimentu:

Vzorek č. 6 vykazuje nejkvalitnější barvy a nejširší spektrum barevného rozlišení.

Nastavení konstantních parametrů laseru bylo následující:

- Výkon laseru: 50 %
- Rozestup řádkování: 0,002 mm
- Směr řádkování: jednosměrné

Nastavení proměnných hodnot laseru pro určité barvy bylo následující:

| | |
|-----------|--|
| Modrá | - pulsní frekvence: 120 kHz, rychlost popisu: 340 mm/s |
| Fialová | - pulsní frekvence: 132 kHz, rychlost popisu: 340 mm/s |
| Červená | - pulsní frekvence: 154 kHz, rychlost popisu: 340 mm/s |
| Tyrkysová | - pulsní frekvence: 130 kHz, rychlost popisu: 420 mm/s |
| Zelená | - pulsní frekvence: 150 kHz, rychlost popisu: 660 mm/s |
| Oranžová | - pulsní frekvence: 118 kHz, rychlost popisu: 700 mm/s |
| Žlutá | - pulsní frekvence: 116 kHz, rychlost popisu: 740 mm/s |

Závěr

Bakalářská práce se zabývá popisováním korozivzdorných ocelí laserem. V teoretické části byl popsán historický vývoj technologie laserů, jejich průnik do průmyslového odvětví, rozdělení do typových skupin, byla definována bezpečnost práce s lasery a rizika jejich neodborného používání. Dále se teorie zabývá korozi a jejím rozdělením a korozivzdornými oceli.

V praktické části bylo provedeno několik experimentů na plechách z chrom niklové austenitické oceli o různých tloušťkách a s nastavením rozdílných parametrů vláknového laseru redENERGY G4. Výsledky jednotlivých experimentů byli postupně zapisovány a navzájem se měnili nastavující parametry lasery pro další experimenty pro dosažení nejlepších výsledků.

Vzorků bylo vyrobeno více, nakonec byly hodnoceny pouze ty, na kterých byly znatelně rozdílné výsledky.

Během experimentů bylo zjištěno, že největší vliv na tepelné ovlivnění materiálu a vznik oxidické vrstvy má ohnisková vzdálenost laseru (vzdálenost mezi galvoscanerem a popisovaným materiálem). Dalšími parametry, které mají vliv na vznik barevného rozlišení při popisování, jsou rychlost popisu a pulsní frekvence laseru.

Materiál s menší tloušťkou (0,5 mm) byl příliš tepelně namáhán a značně se deformoval. Tenký materiál je pro tuto technologii popisování nevhodný. Materiál tloušťky 1,5 mm byl již bez větších deformací. K malé deformaci došlo u vzorku č. 4, kde byla pro popis zvolena velká plocha plechu a zamezení deformace je možné rozdělením plochy na více částí a mezi popisy těchto úseků nechat materiál ochladit.

Optimální nastavení parametrů laseru bylo v tomto rozmezí:

- Pulsní frekvence laseru: 116 až 154 kHz
- Rychlost popisu: 340 až 740 mm/s
- Výška galvoscaneru: 228,5 mm
- Výkon laseru: 50%
- Rozestup řádkování: 0,002 mm
- Směr řádkování: jednosměrné

Výsledkem experimentů je zjištění, že tato technologie je vhodná pro použití na barevný popis korozivzdorných materiálů (respektive oceli 1.4301) při dodržení určitých podmínek, jako jsou tloušťka popisovaného materiálu a ohnisková vzdálenost laseru.

Seznam použité literatury

- [1] NOVÁK, Miroslav. *Průmyslové lasery (1) – princip laseru*. 2012 [online]. [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>
- [2] GAVRILOV P., JELÍNKOVÁ H., VRBOVÁ M. *Úvod do laserové techniky*. Vydavatelství ČVUT. Praha. 1994. 228s. ISBN 80-01-01108-9
- [3] KOŘÁN, Pavel. *Seriál na Téma Lasery – Základní Princip Laseru a jejich dělení*. [online]. [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [4] KUSALA, Jaroslav. *Lasery kolem nás*. 2004 [online]. [cit. 2014-12-02] Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm>
- [5] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové Technologie v Praxi*. 2010 [online]. [cit. 2014-12-03] <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [6] ŘASA, Jaroslav, JINDROVÁ, Radka. *Lasery, laserové technologie a stroje s laserem*. MM Průmyslové spektrum. 2006 [online]. [cit. 2014-12-04] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
- [7] ŠMÍD, Jiří ing. *Lasery pro Průmysl*. MM Průmyslové spektrum. 2008 [online]. [cit. 2014-12-04] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
- [8] HONZÁTKO P., KARÁSEK M., PETERKA P. *Vláknové lasery – jasné světlo ze skleněných nitek*. Ústav fotoniky a elektroniky AVČR. Praha. 2010. [online]. [cit. 2014-12-06] Dostupné z: http://www.ufe.cz/sites/default/files/aktuality/10_peterka_cescasfyz_50_let_laseru-vlaknove_lasery.pdf
- [9] KOŘÁN, Pavel ing. *Seriál na Téma Lasery – Hlavní Typy Laserů Používaných v Průmyslu*. 2013 [online]. [cit. 2014-12-07] Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [10] Nařízení vlády č. 1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením, ve znění nařízení vlády č. 106/2010 Sb.
- [11] ČSN EN 600825-1:2007 Bezpečnost laserových zařízení – Část 1: Klasifikace zařízení a požadavky
- [12] ČÍHAL, V. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. 1 vydání, Praha: Academia AV. 1999. ISBN 80-200-0671-0
- [13] *Korozivzdorné oceli – vlastnosti*. StainlessSteelProperties_CZ.pdf. EURO INOX. 2002. [online]. [cit. 2014-12-08] Dostupné z: http://www.euro-inox.org/pdf/map/StainlessSteelProperties_CZ.pdf ISBN 2-87997-082-2

- [14] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I. a II.* BRNO: Akademické nakladatelství CERM. 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [15] BRENNER, Otakar ing. CSc. *Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály.* MM Průmyslové Spektrum. 2003 [online]. [cit. 2014-12-09] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy.html>
- [16] ČÍHAL, V. *Mezikrystalová koroze ocelí a slitin.* 3. přepracované vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury. 1984. 407s.
- [17] NOVOTNÝ J., DUBENSKÝ R., DUNOVSKÝ J. *Poradenská příručka /39 – progresivní metody svařování a tepelného dělení.* TVÚHP. Praha. 1986. 76s
- [18] ŘASA, J. *Značení a gravírování laserem.* MM Průmyslové spektrum. 2003. [online]. [cit. 2014-12-09] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/znaceni-a-gravirovani-laserem.html>
- [19] LAAKSO P., RUOTSALAINEN S., PANTSAR H., PENTTILÄ R. *Relation of laser parameters in color marking of stainless steel.* 2008. [online]. [cit. 2014-12-10] Dostupné z: http://www.vtt.fi/files/research/ism/manufacturingsystems/relation_of_laser_parameters_in_color_marking_of_stainless_steel.pdf
- [20] ŠVANTNER M., KUČERA M., HOUDKOVÁ Š. *Possibilities od stainless steel laser marking.* Brno. 2012. [online]. [cit. 2014-12-11] Dostupné z: <http://www.metal2014.com/files/proceedings/02/reports/168.pdf>
- [21] WENDY. *Color fiber laser marking machine engrave on metal.* 2014 [online]. [cit. 2014-12-12] Dostupné z: http://www.itechcnc.com/html/Services/CNC_Knowledge/46.html
- [22] Manuál k Laseru – redENERGY G4 40W – SPI Lasers. [online]. [cit. 2014-12-12] Dostupné z: http://www.spilasers.com/Datasheets/redENERGY_G4/H-Type_40W-70W.aspx?