

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Značení kovových dílů 2D kódem technologií laserového žihání

Autor:	Vlastimil Jílek
Studijní program:	N0533A110002 Aplikovaná fyzika
Studijní obor:	Aplikovaná fyzika
Forma studia:	Navazující, prezenční
Vedoucí práce:	RNDr. Hana Chmelíčková
Termín odevzdání práce:	srpen 2021

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Hany Chmelíčkové a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci

.....

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora	Vlastimil Jílek
Název práce	Značení kovových dílů 2D kódem technologií laserového žihání
Typ práce	Diplomová
Pracoviště	Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR
Vedoucí práce	RNDr. Hana Chmelíčková
Rok obhajoby práce	2021
Abstrakt	Tato práce se věnuje metodám laserového značení a technologiím značení laserem. Dále zpracovává problematiku značení laserovým žiháním na ocel s důrazem na korozní odolnost. Součástí práce je ukázka značení 2D data matrix kódů technologií laserového žihání na ocelová ložiska a zhodnocení výsledků.
Klíčová slova	laserové značení, laserové značení žiháním oceli, laserové technologie značení, metody značení laserem, data matrix kód
Počet stran	80
Počet příloh	0
Jazyk	Český

Bibliographical identification:

Autor's first name and surname	Vlastimil Jílek
Title	Marking of metal parts with 2D code by laser annealing technology
Type of thesis	master
Department	Joint Laboratory of Optics
Supervisor	RNDr. Hana Chmelíčková
The year of presentation	2021
Abstract	This thesis is focused on laser marking methods and laser marking technologies. It is also dealt with the issue of laser annealing marking on steel with emphasis on corrosion resistance. The thesis includes a demonstration of marking 2D data matrix codes by laser annealing technology on steel bearings and an evaluation of the results.
Keywords	laser marking, laser annealing, laser marking technology, laser marking methods, data matrix code
Number of pages	80
Number of appendices	0
Language	Czech

Chtěl bych poděkovat své vedoucí RNDr. Haně Chmelíčkové za cenné rady při psaní diplomové práce.

Děkuji firmě KOYO Bearings za možnost pracovat na tématu, které může mít praktické využití ve výrobě.

Rád bych poděkoval Ing. Vítu Vodičkovi za pomoc s realizací experimentu a cenné rady při práci s laserem.

Děkuji také Mgr. Lukáši Václavkovi za pomoc s měřením mechanických vlastností vzorků.

Rád bych také poděkoval své rodině za podporu, a především bych chtěl poděkovat své přítelkyni Anně Dohnalové za pomoc s kontrolou diplomové práce.

Obsah

Úvod	8
1 Laserové technologie značení.....	9
1.1 Metody značení materiálu laserem	9
1.1.1 Laserové značení materiálů pomocí masky	9
1.1.2. Přímé značení materiálů laserovým svazkem	10
1.1.3 Značení materiálů laserovým skenováním	11
1.2 Technologie laserového značení	15
1.2.1 Gravírování.....	16
1.2.2 Lokální leštění povrchu	17
1.2.3 Ablace povlaku	18
1.2.4 Pěnění	19
1.2.5 Změna barvy	20
1.2.6 Značení karbonizací materiálů	21
1.2.7 Gravírování pod povrchem materiálu	22
1.2.8 Laserové značení anodizovaného hliníku	23
1.2.9 Značení žiháním	24
2 Značení korozi odolných ocelí laserovým žiháním	25
2.1 Optimalizace parametrů značení a jejich vliv na kvalitu	25
3 Experimentální část	30
3.1 Přístroje	30
3.1.1 Systém Electrox Scorpion Rapide G2	30
3.1.2 Digitální mikroskop KEYENCE VHX-7100	34
3.1.3 Konfokální mikroskop LEXT OLS 5000	36
3.1.4 Nanointendační přístroj NanoTest NTX.....	37
3.2 Materiál	38

3.3 Nastavení experimentu	39
3.3.1 Uchycení vzorků a kalibrace os laserového systému	40
3.3.2 Popis data matrix kódu	42
3.3.3 Software pro programování značení	43
3.3.4 Čtení vyznačených 2D data matrix kódů	44
3.3.5 Parametry procesu značení	45
3.3.6 Nastavení hodnot parametrů experimentu	46
3.4 Hodnocení kvality vyznačeného kódu	48
4 Výsledky experimentu	51
4.1 Optimalizace značení oceli v pracovní vzdálenosti 323 mm	51
4.1.1 Zmenšení velikosti buňky kódu pro pracovní vzdálenost 323 mm	56
4.2 Optimalizace značení oceli v pracovní vzdálenosti 319 mm	57
4.2.1 Zmenšení velikosti buňky kódu pro pracovní vzdálenost 319 mm	60
4.3 Možnosti značení na ložiska s různými rozměrem čel	61
4.4 Optimalizace značení oceli na neupravený povrch z výroby	62
4.5 Výsledky měření tvrdosti, modulu elasticity a korozní odolnosti	67
5 Diskuze	69
Závěr	72
Seznam použitých pramenů	74
Seznam použitých symbolů a zkratk	79

Úvod

Značení výrobků bylo od počátku vzniku obchodu důležitou součástí jejich výroby. Od ručně malovaných erbů rodů a cechů, ražených značek se proces značení vyvinul k moderním technologiím a automatizaci značení. Od objevení laseru a prvních pokusů o jeho využití se laser stal postupně nedílnou součástí portfolia technologií značení.

Velké využití získal laser díky své rychlosti a univerzálnosti. Různými technologiemi je možné značit na velké množství materiálů od kovů přes plasty a další organické materiály až po sklo. Proto je využíván ke značení v automobilovém průmyslu, při výrobě elektroniky, ale také v textilním průmyslu nebo při výrobě nástrojů pro lékařské využití apod. Jeho velkou výhodou je kvalita značení. Oproti barvení není materiál nanášen, dochází k jeho odebrání, nebo ke změně jeho vlastností. Ve srovnání s ražením je možné dosáhnout mnohem přesnějších a složitějších tvarů.

Teoretická část práce shrnuje metody a technologie laserového značení. Podrobněji se zabývá studii optimalizací procesu značení laserovým žíháním s důrazem na korozní odolnost.

V praktické části je realizováno značení 2D data matrix kódů laserovým žíháním na ocelová ložiska firmy KOYO Bearings pomocí vláknového pulzního laseru ElectroX Scorpion G2. Hlavním cílem práce je optimalizovat rychlost značení, frekvenci pulzů, odstup řádků a výkon pro pracovní vzdálenost laseru 323 mm a 319 mm s důrazem na kvalitu kódu z hlediska jeho čtení, hustoty dat a mechanických vlastností. U výsledků je zkoumána výška oxidové vrstvy vzniklé značením, její tvrdost a modul elasticity. Je také zkoumána korozní odolnost značení.

1 Laserové technologie značení

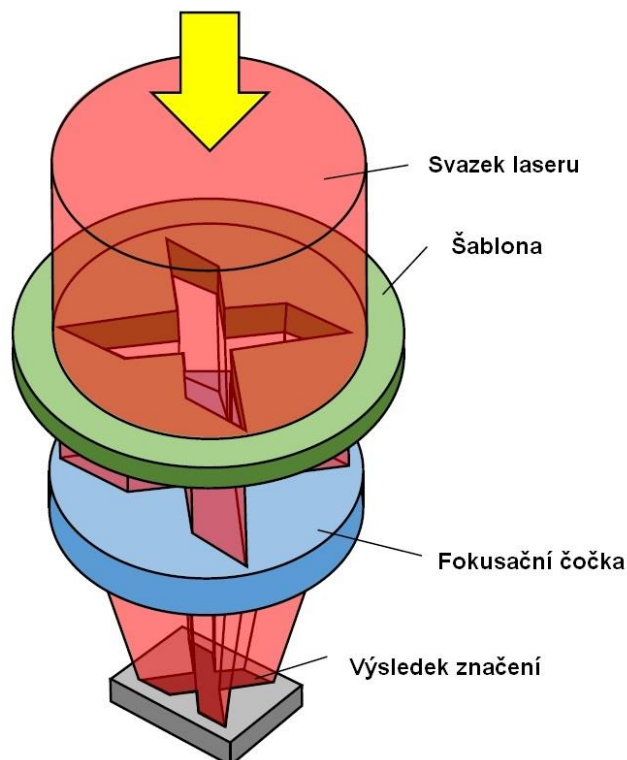
Laserové značení je v průmyslu velice rozšířené. Existuje velké množství technologií a několik metod značení. Použití některých technologií je podmíněné materiálem. Závisí také na vzoru (písmena, čísla, obrázky, kódy apod.), který je značen na materiál, a na metodě.

1.1 Metody značení materiálu laserem

Metody značení můžeme rozdělit na tři metody. Značení pomocí svazku omezeného maskou (šablonou), přímé značení svazkem, které lze dále rozdělit podle použitého laserového systému. Všechny metody mají jisté výhody i nevýhody a jsou popsány v následujících kapitolách.

1.1.1 Laserové značení materiálů pomocí masky

Značení pomocí masky je založeno na modifikaci tvaru svazku laseru. Modifikace je provedena pomocí masky, která je vložena do dráhy svazku, viz obrázek 1.



Obrázek 1: Schéma optiky laseru pro značení pomocí šablony. Upraveno z [1].

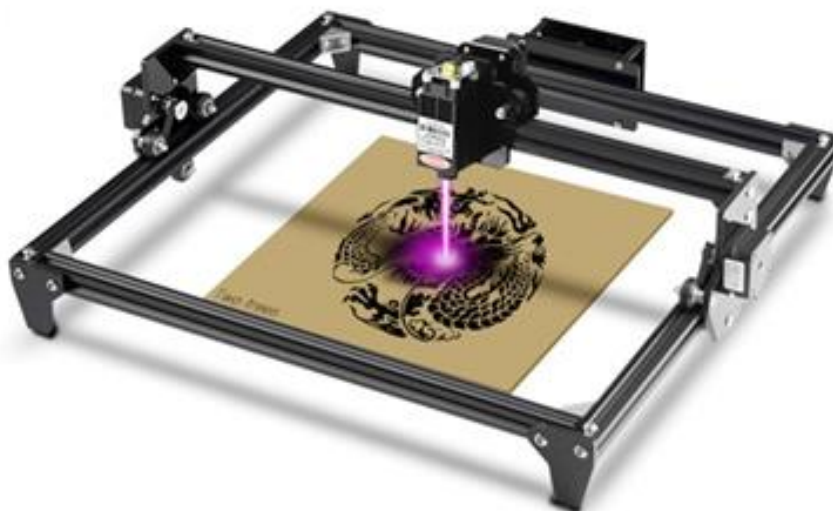
Maska je vytvořena tak, aby skrz ni prošla jen část svazku. Tvar již odpovídá požadovanému obrazci, který chceme vyznačit. Materiál masky je obvykle tenký plech nebo sklo pokryté dielektrickou vrstvou. Maska může být těsně nad povrchem materiálu. Používá se i pozice „uprostřed“ optické dráhy, kdy k fokusaci svazku dochází až za maskou, viz obrázek 1 [1], [2].

Tato metoda je velice výhodná pro značení v sériové výrobě, kdy je značen pouze jeden neměnný obrazec a použité materiály nemají příliš vysokou odrazivost a teplotní odolnost. Pro zvýšení flexibility mohou být jednotlivé masky vloženy do „revolveru“, kdy jeho otáčením jsou měněny. Nevýhodou je, že při použití velkých energií nebo vrcholových výkonů, může dojít k poškození masky. Díky masce je omezené pracovní pole laseru a energie pulzu [2], [3].

1.1.2. Přímé značení materiálů laserovým svazkem

Přímé značení laserem, tzv. direct marking, je metoda založena na ovlivňování materiálu přímo tvarem svazku po fokusaci. Značený obrazec vzniká postupným ovlivňováním materiálu v daných místech, tak aby vznikl požadovaný obrazec [4].

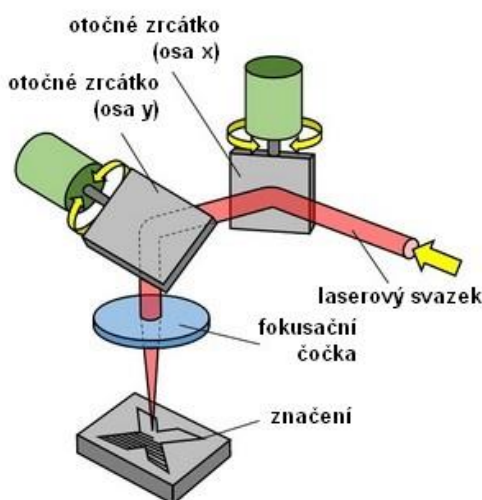
Pro direct marking se používá tzv. plotter systém. Svazek laseru je vyveden z rezonátoru do pracovní hlavy. Zde je fokusován na materiál. Pracovní hlava může být pevná, nebo posuvná. Optika vedoucí svazek je zpravidla složena z klasických zrcátek a čoček. Díky laserovým diodám, moderní výrobě aktivních prostředí a použití nelineárních krystalů může být systém plotter velice kompaktní, viz obrázek 2. Samotný rezonátor je již součástí pracovní hlavy, k napájení stačí jednofázová zásuvka na 220 V a celý systém je možné sestavit i v domácích podmínkách.



Obrázek 2: Značící laserový plotter pro domácí užití. Upraveno z [5].

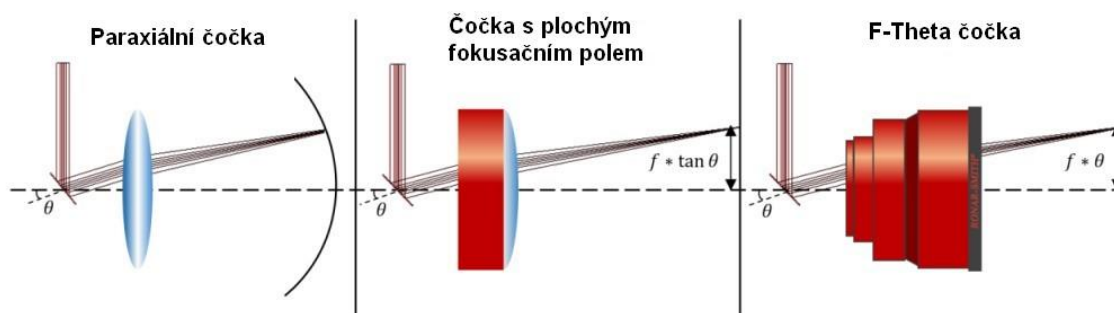
1.1.3 Značení materiálů laserovým skenováním

V průmyslové výrobě se velice často používá skenovací či rastrovací laserový systém, tzv. scan-writing. Vyznačený obraz vzniká opět přímým působením tvaru svazku na materiál. Skenovací systém používá složitější optické prvky. Laserový svazek je po výstupu z rezonátoru expandován pro redukci divergence. Následně je svazek vyveden na dvě galvanometrická zrcátka a poté fokusování F-theta čočkou na povrch materiálu, viz obrázek 3 [2].



Obrázek 3: Optika skenovacího laseru. Upraveno z [1].

F-theta čočka je pro laserový rastrovací systém zásadní optický člen. Jedná se o čočku, která bez ohledu na úhel, který svírá procházející svazek s optickou osou čočky, fokusuje svazek na bod rovinné plochy. To je velice výhodné oproti paraxiální čočce, jejíž fokusační pole má tvar sféry, viz obrázek 4.



Obrázek 4: Porovnání paraxiální čočky, čočky s plochým fokusačním polem a F-Theta čočky. Upraveno z [6].

F-theta čočka fokusuje svazek do určitého bodu fokusační plochy v závislosti na úhlu procházejícího svazku a ohniskové vzdálenosti. Pro normální čočky s rovinnou fokusační plochou platí pro vzdálenost svazku od optické osy d nelineární vztah

$$d = f_L \cdot \tan \theta, \quad (1)$$

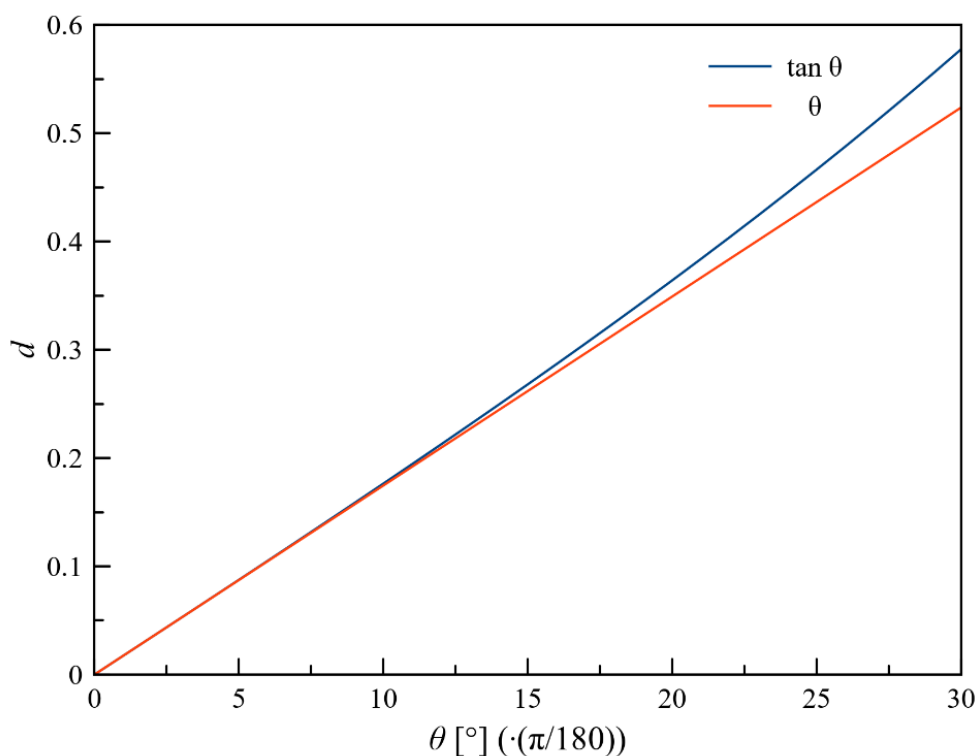
kde f_L je ohnisková vzdálenost a θ úhel, který svírá svazek s optickou osou. To je problematické pro použití v laserovém systému, protože rychlost otáčení galvanometrickými zrcátky by byla nelineárně závislá na úhlu θ , aby byla dosažena stálá rychlost značení na celé pracovní ploše. Tento problém by byl řešen velice složitě. Pro získání stejné rychlosti pohybu zrcátky v celém rozsahu je výhodnější použít lineární vztah

$$d = f_L \cdot \theta. \quad (2)$$

Tím se do obrazu zanáší zkreslení Δd . Vztah pro zkreslení získáme odečtením rovnice (1) a (2)

$$\Delta d = f_L \cdot (\theta - \tan \theta). \quad (3)$$

Pro malé úhly (v jednotkách rad) platí přibližně $\theta = \tan \theta$. Tedy lze zkreslení zanedbat, viz obrázek 5.



Obrázek 5: Průběhy rovnic (1) a (2) pro ohniskovou vzdálenost f_L rovnu jedné. Na ose x je vynesena úhel θ ve stupních, ale do funkcí je dosazován v radiánech. Upraveno z [7].

Je vidět, že pro větší úhly neplatí lineární závislost kvůli zkreslení. Podmínka pro zanedbání zkreslení čočky je dána hodnotou relativní deviace $q_{f\theta}$, která musí být menší než 0,5 % a je dána vztahem

$$q_{f\theta} = \frac{Y - f_L \cdot \theta}{f_L \cdot \theta} < 0,5\%, \quad (4)$$

kde Y je reálná vzdálenost fokusovaného svazku od optické osy. Tím je také určena velikost pracovní plochy laseru. Pro zvětšení pracovní plochy je nutné změnit čočku. Rozměr pracovní plochy je závislý na ohniskové vzdálenosti dle vztahu,

$$L = f_L \cdot 2\theta, \quad (5)$$

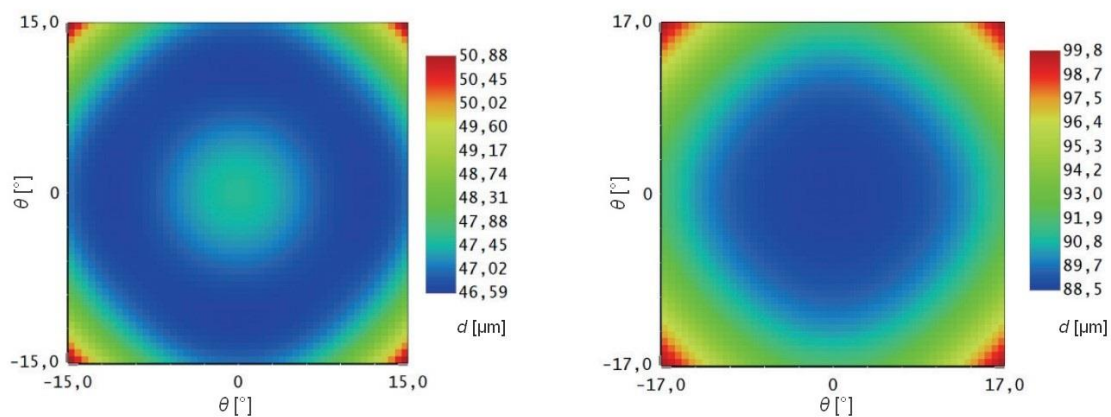
kde L je diagonální rozměr čtvercové pracovní plochy. Na ohniskové vzdálenosti je závislá plocha svazku a to vztahem

$$S = k \cdot \lambda_L \cdot \frac{f_L}{C}, \quad (6)$$

kde k je konstanta, λ_L je vlnová délka C je průměr apertury. Tato rovnice je platná pro apertury 1,8krát větší než $1/e^2$ průměru svazku [6], [7], [8].

Na okrajích pole ostrosti kromě zkreslení dochází i k jeho deformaci. Existují dva typy těchto deformací. Soudkovitost, která vzniká, když se reálný svazek ohýbá méně než paraxiální, a poduškovitost, která vzniká, když se reálný svazek ohýbá více než paraxiální. Hlavní cíl při konstrukci F-theta čoček je vnést do pole ostrosti takovou soudkovitost, aby kompenzovala zkreslení [7].

Pod většími úhly se kromě zkreslení pracovního pole projevují také optické aberace, které deformují tvar svazku. Protože f-theta čočka je optický systém s relativně malou aperturou, sférické aberace a koma nemají velký vliv. Díky tomu, že je většinou čočka použita u laserů s velice úzkým spektrem vlnových délek, nemají vliv na deformaci svazku ani chromatické aberace. Jediná vada, která má vliv, je astigmatismus. Ta se projevuje deformací symetrie tvaru svazku po průchodu čočkou. V závislosti na úhlu může mít tedy fokusovaný svazek různou velikost, viz obrázek 6 [7].



Obrázek 6: Porovnání polí ostrosti dvou reálných F-theta čoček. Průměr svazku je funkcí ortogonálních složek úhlu θ . Upraveno z [9].

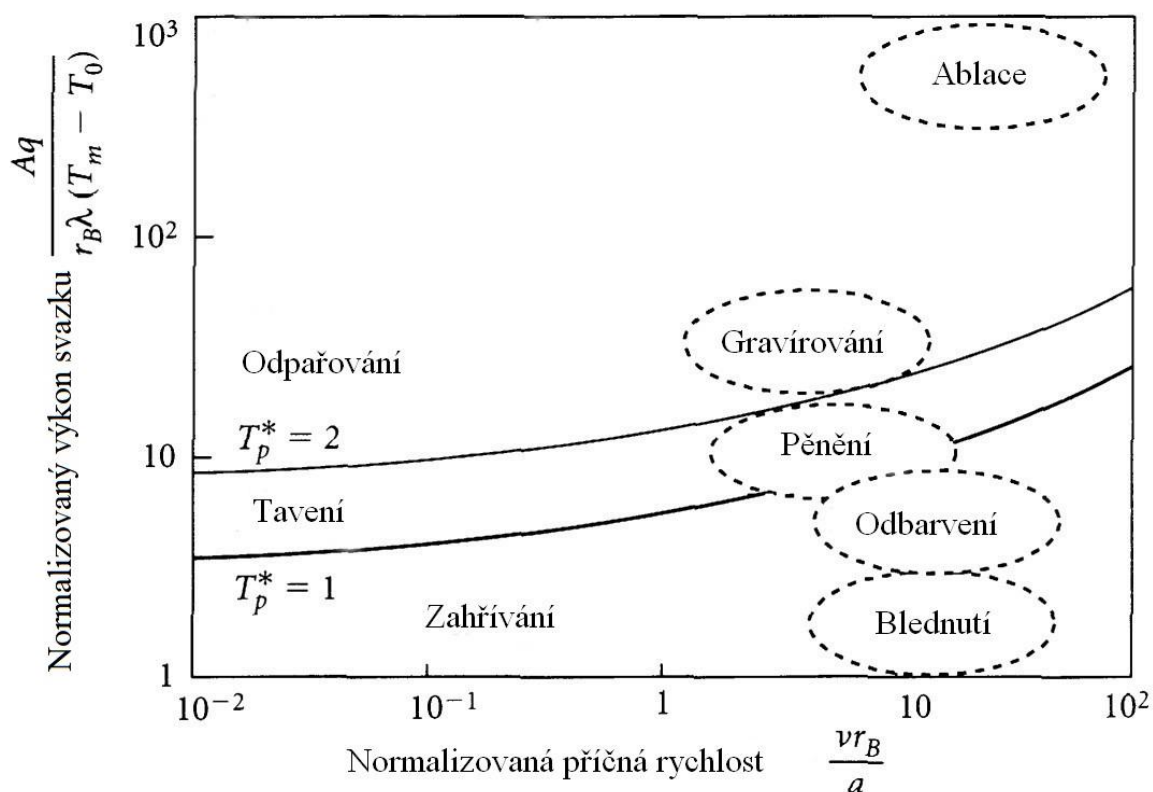
U značících laserů je obvykle pracovní stůl pevný a pracovní hlava laseru nastavitelná pouze v ose z (vertikálně). Pracovní plocha laseru je poté dána použitou F-theta čočkou. Díky galvanometrickým zrcátkům dosahuje laser velice velké rychlosti a přesnosti při značení. Například systém KEYENCE, viz obrázek 7, dosahuje maximální rychlosti značení $12\,000\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ při rozlišení $2\text{ }\mu\text{m}$. Nevýhodou může být, že při použití vysokých výkonů může docházet k poškození optiky. Může také docházet k zpětnému odrazu a poškození zrcátek, ke změnám charakteristik optických členů čočky kvůli zvýšení teploty [4], [10], [11].



Obrázek 7: Ukázka pracovní hlavy systému KEYENCE. Upraveno z [10].

1.2 Technologie laserového značení

Laserové technologie značení lze rozdělit různými způsoby. Příkladem je rozdělení technologií dle normalizovaného výkonu svazku a normalizované rychlosti značení, viz obrázek 8. Normalizovaný výkon je počítán z výkonu svazku q , absorpce materiálu A , průměru svazku r_b , teplotní vodivosti λ , počáteční teploty T_0 a teploty tavení T_m . Normalizovaná rychlost značení je počítána z příčné rychlosti v , průměru svazku a rozptylu tepla a . Vzorci jsou uvedeny na obrázku 8.

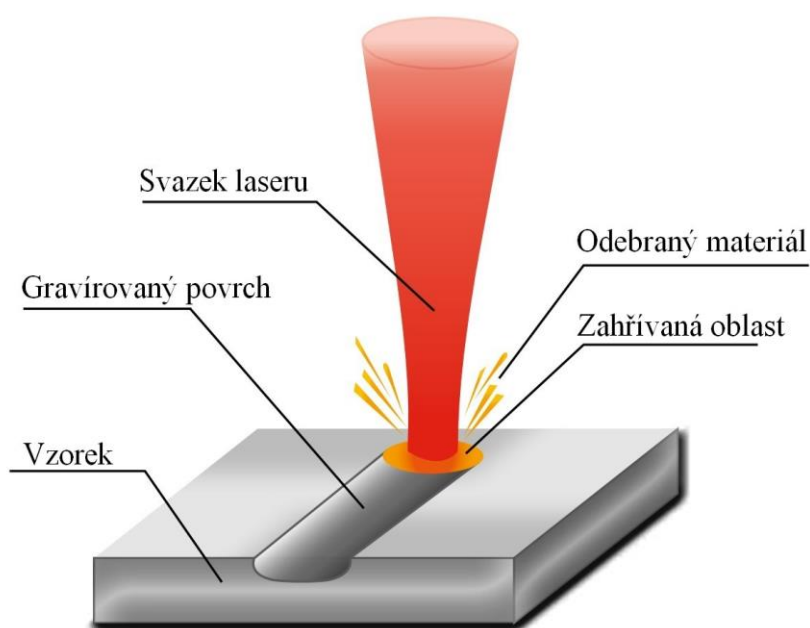


Obrázek 8: Diagram závislosti některých technologií značení na normalizovaném výkonu a rychlosti. Upraveno z [2].

Jak je vidět na obrázku 8, jednotlivé technologie fungují na různých principech ovlivňování materiálu. Použití jednotlivých technologií je závislé na vlnové délce laseru a také na fyzikálních vlastnostech materiálu. Některé technologie značení jsou specifické pro daný materiál. V následující kapitole jsou popsány vybrané technologie značení.

1.2.1 Gravírování

Gravírování je technologie značení laserem, při které dochází k lokálnímu zahřátí materiálu až na teplotu varu. Materiál je z části odpařen a z části nataven. Je vidět tepelně ovlivněná část materiálu. V místě ovlivnění laserem může docházet k vytvoření oxidových vrstev. Maximální hloubka odběru materiálu je až 0,1 mm. Ukázka procesu gravírování viz obrázek 9 [2], [12], [13].



Obrázek 9: Proces značení gravírováním. Upraveno z [13].

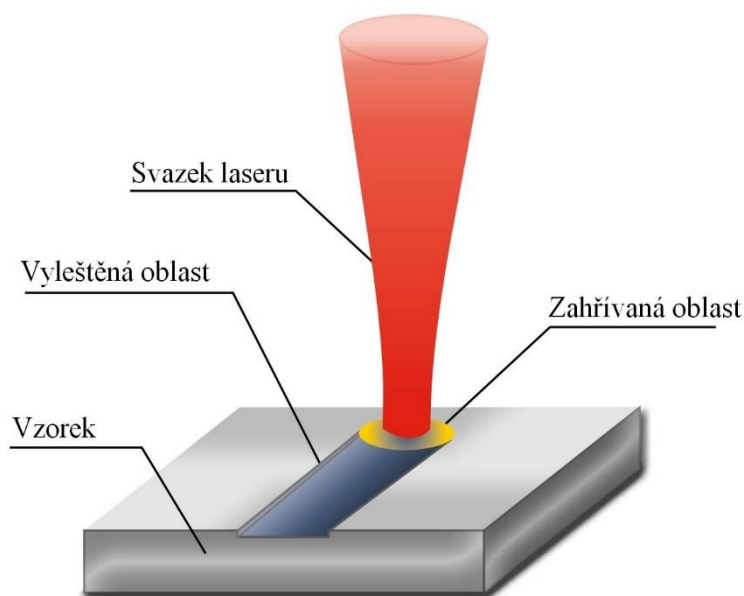
Gravírováním lze vytvářet přímo znaky, nebo rastrovat znak pomocí teček. Dá se použít pro mnoho materiálů. Výhodou je zachování značení i po natření výrobku barvou. Gravírování lze použít i při 3D značení, kde dochází k odebírání více vrstev, typicky v hloubce od 0,1 mm do 5 mm. Příklad značení gravírováním viz obrázek 10.



Obrázek 10: Ukázka gravírování do kovového výrobku. Převzato z [13].

1.2.2 Lokální leštění povrchu

Lokální leštění povrchu, anglicky tzv. surface etching, je jedna z nejrozšířenějších technologií značení. Po zahřátí povrchu materiálu svazkem laseru dochází k roztavení vrstvy materiálu. Materiál se začne roztahovat a změní odrazivost povrchu. Hloubka ovlivněné vrstvy obvykle nepřesáhne 0,01 mm. Ukázka procesu viz obrázek 11 [13], [14], [15].



Obrázek 11: Ukázka procesu rytí laserem na kovový povrch. Upraveno z [13].

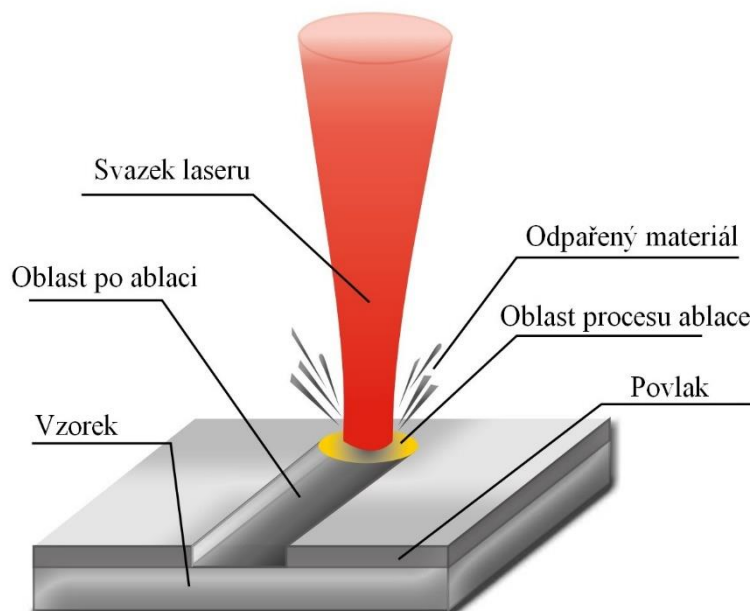
Leštění vytváří na povrchu různé barvy, bílou, černou, ale i jiné, viz obrázek 12. Oproti gravírování je leštění energeticky méně náročné a rychlejší. Jedná se pravděpodobně o nejrozšířenější technologii značení laserem [13], [14], [15].



Obrázek 12: Ukázka lokálního leštění povrchu laserem povrchu. Převzato z [16].

1.2.3 Ablace povlaku

Ablace nanesené vrstvy – barvy, nebo ochranného povrchu – je technologie rozšířená u výroby tlačítek v automotive průmyslu a výrobě elektroniky. Proces značení spočívá v odstranění nanesené vrstvy z vlastního materiálu výrobku. Vzorek je ozařován krátkými pulsy s vysokým vrcholovým výkonem. Díky tomu je odstraněn pouze materiál povlaku a je minimálně tepelně ovlivněn substrát, viz obrázek 13 [13], [16].



Obrázek 13: Proces ablace povlaku z vzorku. Upraveno z [13].

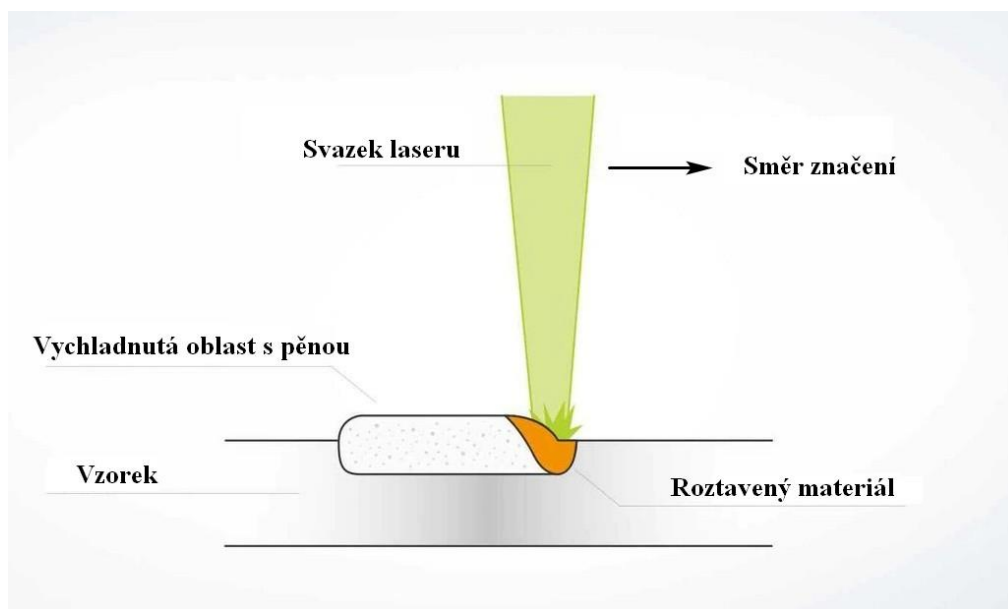
Značení ablací povlaku dosahuje vysokého kontrastu. Často se používá v případě, kdy podkladový materiál má bílou barvu, viz obrázek 14.



Obrázek 14: Ukázka značení ablací barvy z povrchu materiálu. Převzato z [20].

1.2.4 Pěnění

Pěnění je technologie značení, která lze použít pouze pro polymerní materiály. Kvůli malé tepelné vodivosti dochází po absorpci záření laseru lokálně k překonání teploty tavení. Díky tomu vznikají bublinky oxidu uhličitého v materiálu a následně plastová pěna, viz obrázek 15 [13], [18], [19].



Obrázek 15: Proces vytváření pěny v plastovém vzorku. Upraveno z [18].

Pro lepší kontrast značení se mohou používat také aditiva, která zabarvují zpěněný materiál. Značení pěněním je obvykle málo odolné proti poškrábání. Používá se pro značení černou nebo tmavou barvou, viz obrázek 16 [13], [18], [19].



Obrázek 16: Značení pěněním na plastové výrobky. Převzato z [19].

1.2.5 Změna barvy

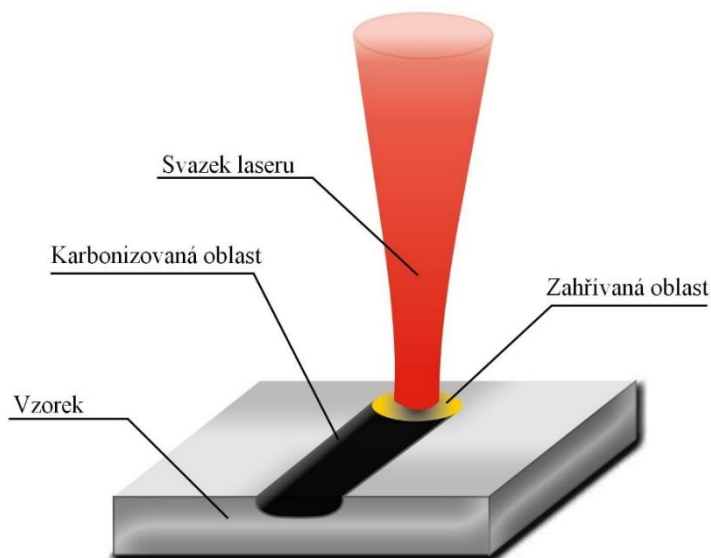
Technologie změna barvy, v angličtině „colour change“, „blackening“ nebo „bleaching“, je založená na ovlivňování plastů „zeleným laserem“, tedy laserem s vlnovou délkou okolo 530 nm, nebo UV laserem o vlnové délce okolo 350 nm. Často se jedná o pevnolátkové lasery, kdy je dané vlnové délky dosaženo generací druhé, respektive třetí harmonické frekvence. Efektu působení záření na materiál se někdy říká „cold marking“ protože nezanechává v základním materiálu téměř žádnou tepelnou stopu. Díky kratší vlnové délce ovlivňuje laser chemické vazby v materiálu. Dochází tak k bělení materiálu pro tmavé plasty, nebo naopak ke ztmavení bílých plastů, kde dochází ke karbonizaci materiálu. Během ovlivňování plastů laserem vzniká oxid uhličitý. Pro získání lepšího výsledku mohou být do plastu dodána aditiva citlivá na laser. Díky tomu výsledné značení dosahuje vyššího kontrastu a přesnosti. Navíc aditiva mohou měnit barvu, kterou získá materiál po ovlivnění laserem. Ukázka výsledku značení změnou barvy materiálu viz obrázek 17 [13], [20].



Obrázek 17: Značení změnou barvy na plastový výrobek. Převzato z [20].

1.2.6 Značení karbonizací materiálů

Značení karbonizací materiálů je technologie použitelná pouze pro organické materiály jako jsou plasty, dřevo nebo kůže. Po ozáření materiálu laserem dochází v ovlivněné oblasti k redukci na uhlík a je uvolněn kyslík a vodík. Část materiálu je odebrána a v rýze po laseru se mění barva materiálu na černou či šedou, viz obrázek 18 [13], [20], [21].



Obrázek 18: Ukázka procesu značení karbonizací. Upraveno z [13].

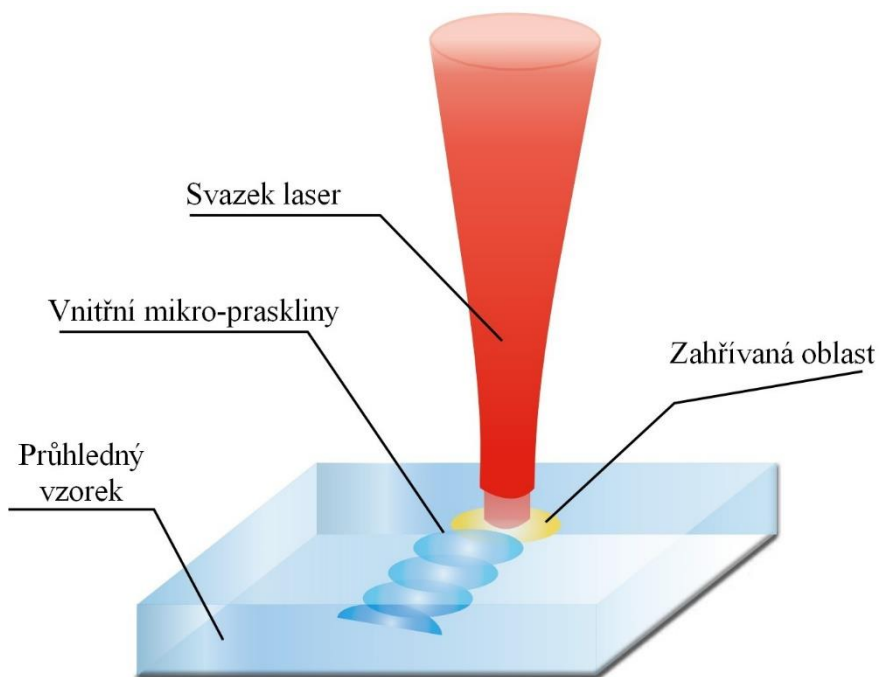
Typicky se pro dřevo, papír a karton používají CO₂ lasery a pevnolátkové lasery. Značení plastů je prováděno UV lasery a „zelenými“ lasery. Technologie karbonizace je vhodná převážně pro materiály světlejší barvy, kde je dosaženo lepšího kontrastu a ostrosti značení. Ukázka výsledku značení karbonizací viz obrázek 19 [13], [20], [21].



Obrázek 19: Ukázka značení karbonizací na dřevo. Převzatu z [20].

1.2.7 Gravírování pod povrchem materiálu

Technologie gravírování pod povrchem se používá pouze u průhledných materiálů, především pro sklo a plasty. Značení vzniká tepelným ovlivněním materiálu v daném místě. Laserový svazek je fokusován do určeného místa, tepelným šokem vznikají mikro-praskliny, které tvoří výsledný viditelný znak. Důležité je, že laser během značení neovlivňuje vyleštěný povrch materiálu, viz obrázek 20 [13], [22].



Obrázek 20: Proces značení gravírováním pod povrchem materiálu. Upraveno z [13].

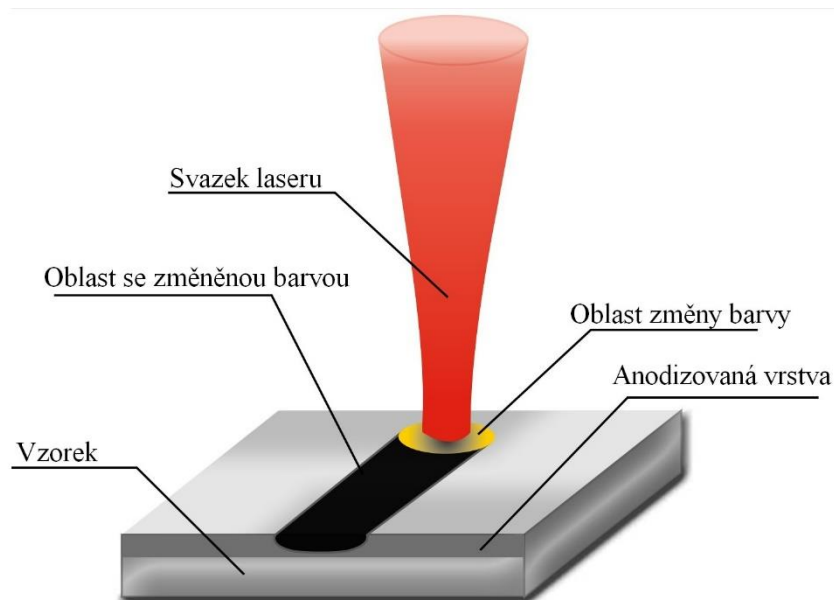
Svazek laseru je možné fokusovat do různé hloubky materiálu a vytvářet tak 3D obrazce, nazývané také „bubblegram“. Lze také značit zakřivené povrchy. Výsledné značení má bílou barvu. Využití má v automotive pro značení skel nebo pro dekorativní účely, viz obrázek 21.



Obrázek 21: Dekorativní využití podpovrchového gravírování od skla. Upraveno z [22].

1.2.8 Laserové značení anodizovaného hliníku

Hliník je velice používaným materiálem v průmyslové výrobě. Často dochází k ošetření povrchu anodizací, kdy je vytvořena vrstva oxidu. Dle procesu může být barva povrchu různá. Značení laserem na anodizovaný hliník spočívá ve změně barvy. Lze použít CO₂ laser i vláknový laser. Podle nastavení laseru je možné dosáhnout různé barvy značení od bílé přes šedou až po černou, viz obrázek 22 [23], [24].



Obrázek 22: Proces značení na anodizovaný hliník. Upraveno z [13].

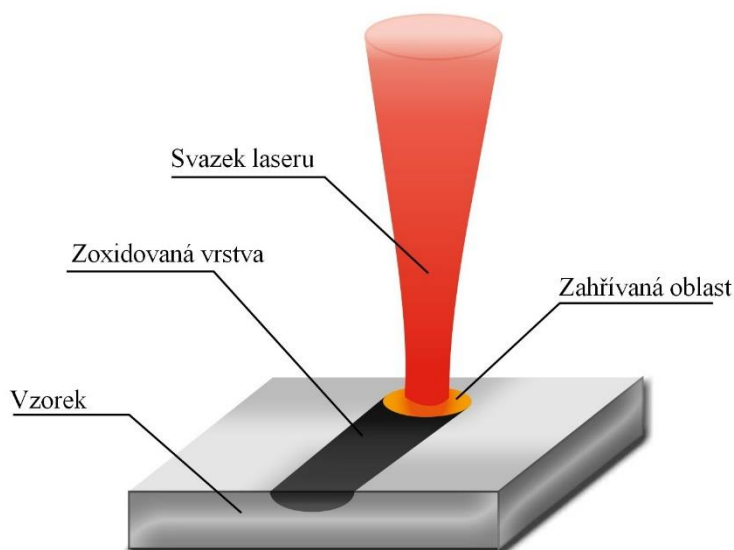
Černé barvy je dosaženo pomocí krátkých pulzů. Důležité je, že není poškozena ochranná vrstva hliníku, je pouze změněna její barva. Při značení pomocí CO₂ laseru naopak dochází k vyblednutí anodizované vrstvy a k vytvoření bílého značení. Světlejších barev značení lze dosáhnout i při správném nastavení pulzního laseru, viz obrázek 23 [24].



Obrázek 23: Ukázka černého a bílého značení na anodizovaný hliník. Převzato z [24].

1.2.9 Značení žiháním

Žihání je technologie značení založená na oxidaci povrchu materiálu indukovanou laserem. Je použitelná především pro železo a ocel, případně titan. Ozařování laserem vytváří nesmazatelnou vrstvu oxidu. Ideálně je vrstva oxidu bez prasklin prohlubní či otřepů. Povrch materiálu nenese známky po ablaci. Obvykle je ovlivněn materiál do hloubky (20 – 30) μm pod povrch. Ukázka procesu značení žiháním viz obrázek 24 [13], [25].



Obrázek 24: Proces značení žiháním materiálu. Upraveno z [13].

Barva vytvořené oxidové vrstvy nemusí být jen černá, ale podle nastavení laseru se může lišit. Barva oxidové vrstvy je stálá přibližně od teploty 200 °C. Lze vytvořit oxidové vrstvy od zelené přes žlutou až po červenou, viz obrázek 25 [19], [25].



Obrázek 25: Barevné oxidové vrstvy vytvořené žiháním laserem na ocel. Převzato z [26].

2 Značení korozi odolných ocelí laserovým žiháním

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, technologie žihání je založena na indukované oxidaci povrchu. Tato technologie se velice často používá pro značení výrobků z korozi odolné oceli. Pro získání kvalitního značení je třeba zkoumat vliv jednotlivých parametrů nastavení laseru na kvalitu značení a volit optimální kombinaci pro požadovaný výsledek. V následujícím textu je popsán vliv parametrů na kvalitu značení s důrazem na korozní odolnost a jejich optimalizace z několika studií.

2.1 Optimalizace parametrů značení a jejich vliv na kvalitu

Optimalizací parametrů značení se ve své práci zabývali M. Švantner a kolektiv. Jejich hlavní zájmem bylo zkoumání teplotního efektu značení na mikrostrukturu povrchu a korozní vlastnosti oceli. Jako hlavní parametr byl zkoumán vstup tepla E_s [$\text{J}\cdot\text{mm}^{-2}$]. Dále byla zkoumána frekvence f [kHz] a délka pulzu τ [ns] [27].

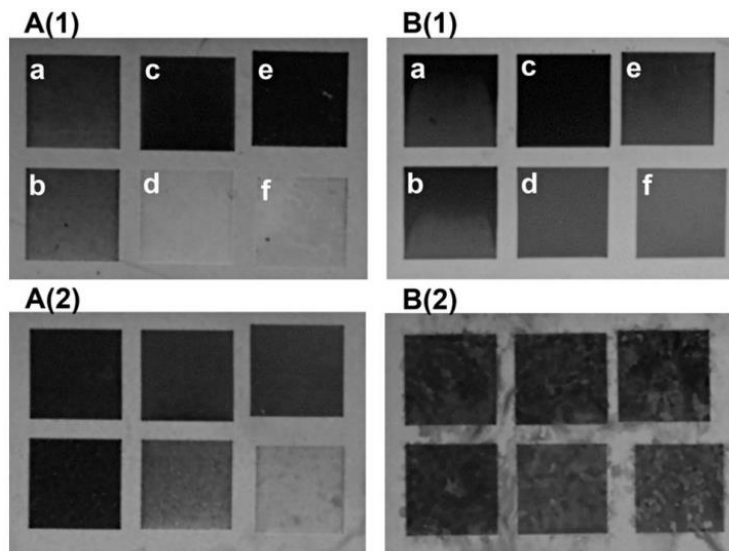
V experimentu bylo značeno na ocel AISI 304. Byl použit vláknový pulzní laser SPI G3 s průměrným výkonem 40 W a F-theta čočkou o ohniskové vzdálenosti 420 mm. Průměr svazku v ohnisku byl roven 248 μm . Vlnová délka laseru byla 1 062 nm [27].

V první části byl zkoumán vliv základních parametrů a jejich změny o 10 % na výsledek značení a korozní odolnost po expozici v korozní komoře. Byly vytvořeny dvě oblasti značení, které se v základních parametrech lišily skenovací rychlostí v , vstupem tepla E_s a odstupem řádků l_{off} , viz tabulka 1.

Tabulka 1: Rozdílné parametry značení při zkoumání korozní odolnosti [27].

<i>Oblast</i>	E_s [$\text{J}\cdot\text{mm}^{-2}$]	v [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	l_{off} [μm]
<i>A</i>	1,5	400	50,0
<i>B</i>	4,0	800	9,6

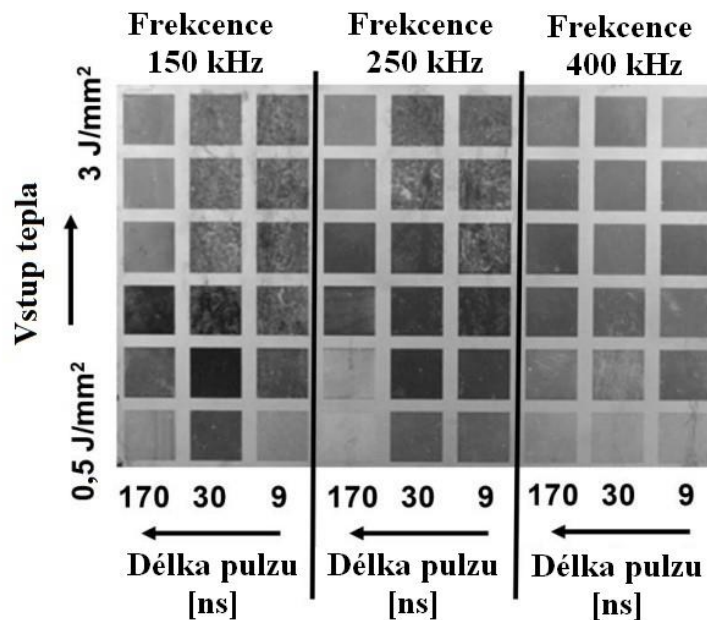
Základní parametry byly frekvence $f = 30$ kHz, průměrný výkon $P = 30,75$ W, délka pulzu $\tau = 250$ ns. Výsledek značení danými parametry je ukázán na obrázku 26.



Obrázek 26: Výsledek experimentu značení před vložením do korozní komory (1) a po (2) s dvěma variantami parametrů (A, B), s 5 modifikacemi parametrů (a-f). Převzato z [27].

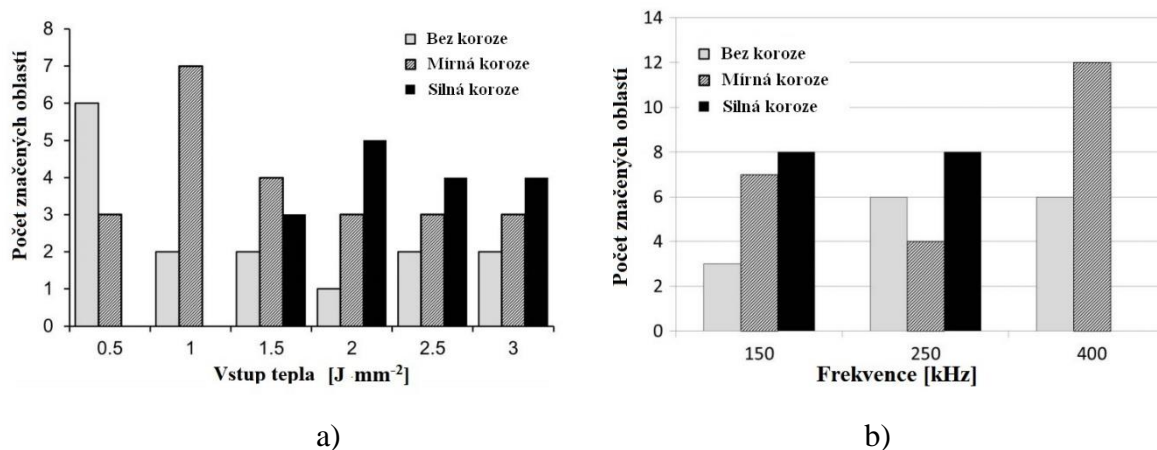
Čtverce *a* a *b* byly značeny základními parametry. Čtverec *c* byl značen výkonem o 10 % vyšším, čtverec *d* výkonem o 10 % nižším. Při značení čtverce *e* byla použita o 10 mm vyšší pracovní vzdálenost a při značení čtverce *f* o 10 mm nižší pracovní vzdálenost, [27].

Dále byl zkoumán vliv frekvence a délky pulzu na korozní odolnost, byly použity 3 délky pulzu a 3 hodnoty frekvence, viz obrázek 27, [27].



Obrázek 27: Vliv frekvence a délky pulzu na korozní odolnost oceli. Upraveno z [27].

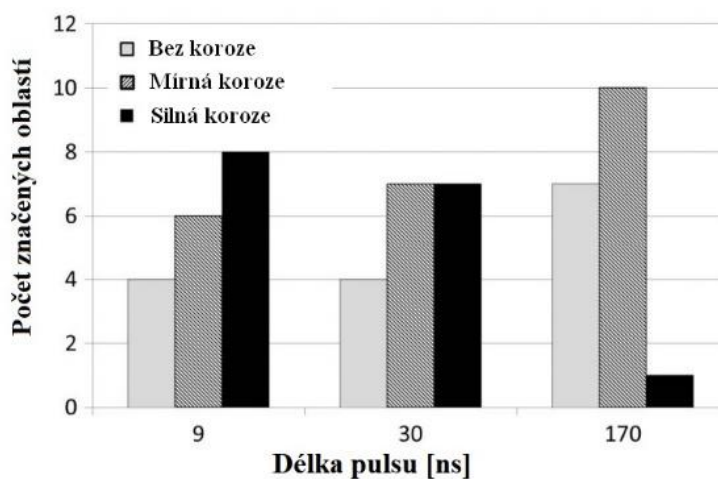
Výsledky experimentu jsou porovnávány v grafech na obrázcích 28a, 28b a obrázku 29.



Obrázek 28: Vliv a) vstupu tepla, b) frekvence na korozní odolnost značených oblastí.

Upraveno z [27].

Z grafů je vidět, že vstup tepla i frekvence má vliv na korozní odolnost. Pro vyšší hodnoty vstupu tepla dochází ke snížení korozní odolnosti materiálu. Vliv frekvence je obrácený, s vyšší frekvencí dochází ke zvyšování korozní odolnosti materiálu. Z obrázku 27 je ale patrné, že s vyšší korozní odolností dochází ke snížení kontrastu značení [27].

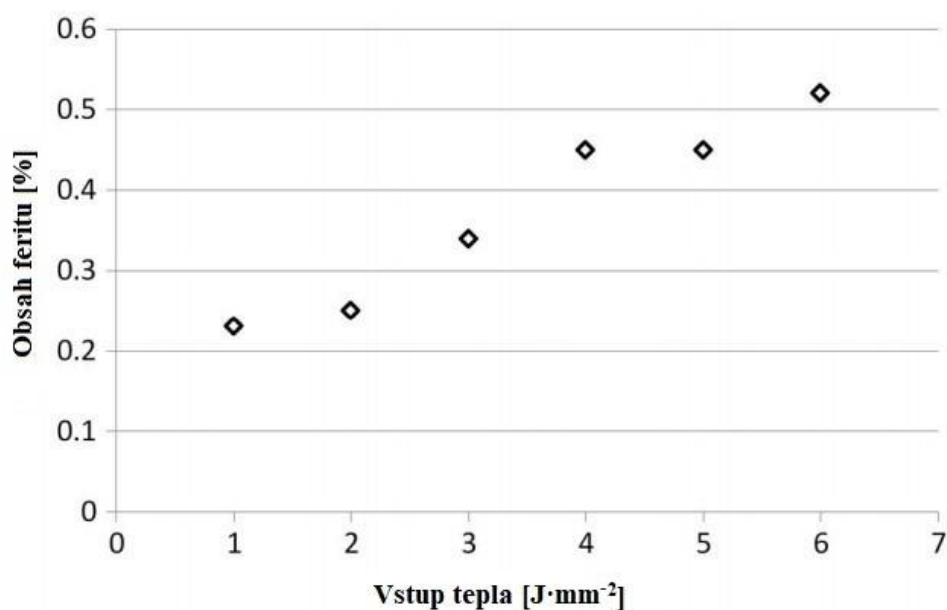


Obrázek 29. Vliv délky pulzu na korozní odolnost materiálu po značení. Upraveno z [27].

Podobný vliv jako frekvence má na korozní odolnost délka pulzu. Při značení delšími pulzy dochází ke zlepšení korozní odolnosti materiálu [27].

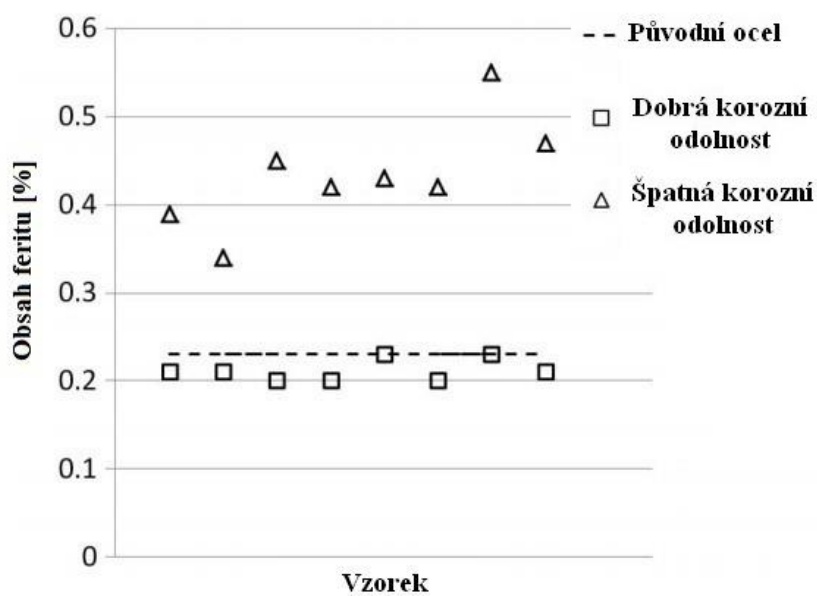
Na základě získaných výsledků určili M. Švantner a kolektiv jako optimální hodnotu vstupu tepla rovnu $E_s = 1 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ [27].

Byla také zkoumána souvislost složení povrchu se vstupem tepla. Z výsledků je patrné, že s vyšším vstupem tepla obsahuje vrstva více feritu, viz obrázek 30.



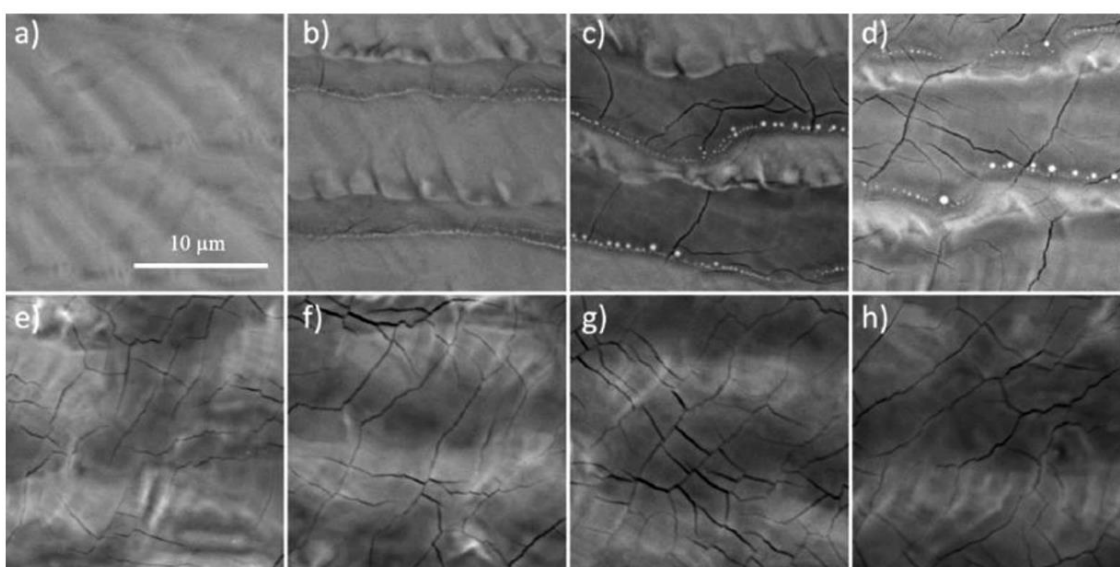
Obrázek 30: Závislost obsahu feritu ve vrstvě na vstupu tepla. Upraveno z [27].

Zároveň s vyšším obsahem feritu ve vrstvě se snižuje její korozní odolnost viz obrázek 31 [27].



Obrázek 31: Závislost korozní odolnosti na obsahu feritu ve vrstvě. Upraveno z [27].

Velice podobné výsledky jako M. Švantner a kolektiv uvádí ve své práci K. M. Łęcky a kolektiv. Pro popis parametrů značení byla použita veličina hustota energie F [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$] (v textu práce označeno jako fluence). Tato veličina odpovídá hustotě energie v celém řádku značení. Jako ideální hodnota pro značení byla určena hodnota $F = 100 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. Pro vyšší hodnoty se objevují ve vrstvě praskliny, které snižují korozní odolnost, viz obrázek 32. Podobné výsledky jsou ukázány také v práci B. Szubzdy a kolektivu, kteří ve své práci zkoumali korozní odolnosti ocelí AISI 304, 316 a 321 po vytvoření oxidové vrstvy laserem. Strukturu vrstvy M. Švantner a kolektiv uvádějí také jako faktor korozní odolnosti [27], [28], [29].



Obrázek 32: Ukázka vlivu výkonu na strukturu vrstvy vytvořené laserem pro hodnoty F a) $50 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, b) $100 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, c) $150 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, d) $200 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, e) $250 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, f) $300 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, g) $350 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, h) $400 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$. Převzato z [28].

3 Experimentální část

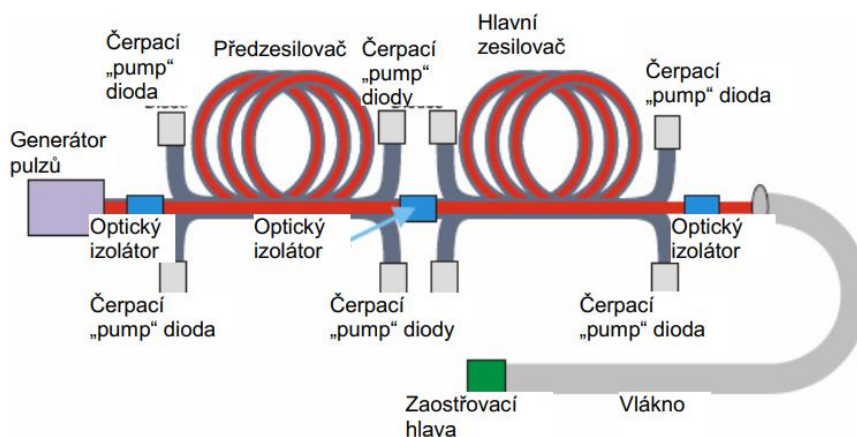
V následujících kapitolách je popsáno přístrojové vybavení pro realizaci a vyhodnocení experimentu, dále software na vytváření programů pro značení a 2D data matrix kód. Poslední část se věnuje popisu postupu zjišťování ideálních parametrů a čtení matrix kódu.

3.1 Přístroje

V této kapitole je popsán laserový systém Electrox Scorpion Rapide G2, na kterém byly vytvořeny veškeré vzorky. Dále je popsán digitální mikroskop KEYENCE VHX 7100, konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS 5000 a nanointendační přístroj Micromaterials Nanotest NTX, které byly použity pro zkoumání a měření vytvořených vzorků.

3.1.1 Systém Electrox Scorpion Rapide G2

Laser od firmy Electrox s označením Scorpion Rapide G2 byl použit pro realizaci experimentu. Jedná se o pulzní pevnolátkový laser. Aktivním prostředím jsou vlákna dopovaná Ytterbiem (dále Yb). Proces generace světla má několik stupňů. První začíná generovat pulzní generátor (někdy nazýván „seed laser“). Prvotní pulz je nízkoenergetický, má průměrný výkon asi $P = 40$ mW. Pulzní generátor se skládá z rezonátoru, zadního odrazového skla, výstupního odrazového skla a Q-switchu. Pulz dále prochází přes optický izolátor do předzesilovače. Optický izolátor zabraňuje zpětnému projití zesíleného pulzu do pulzního generátoru. Zde je pulz zesílen na výkon 1 W. Pulz projde dalším optickým izolátorem do hlavního zesilovače, kde je zesílen na maximální výkon. Předzesilovač a zesilovač jsou aktivní vlákna o délce 25 m. Generátor pulzů, předzesilovač i hlavní zesilovač jsou čerpány diodami. Jednotlivá aktivní vlákna jsou obalena čerpacími vlákny, na která je připojeno více čerpacích diod. Návrh laseru viz obrázek 33, [30].



Obrázek 33: Nákres systému generování pulzů laseru Scorpion Rapide G2.

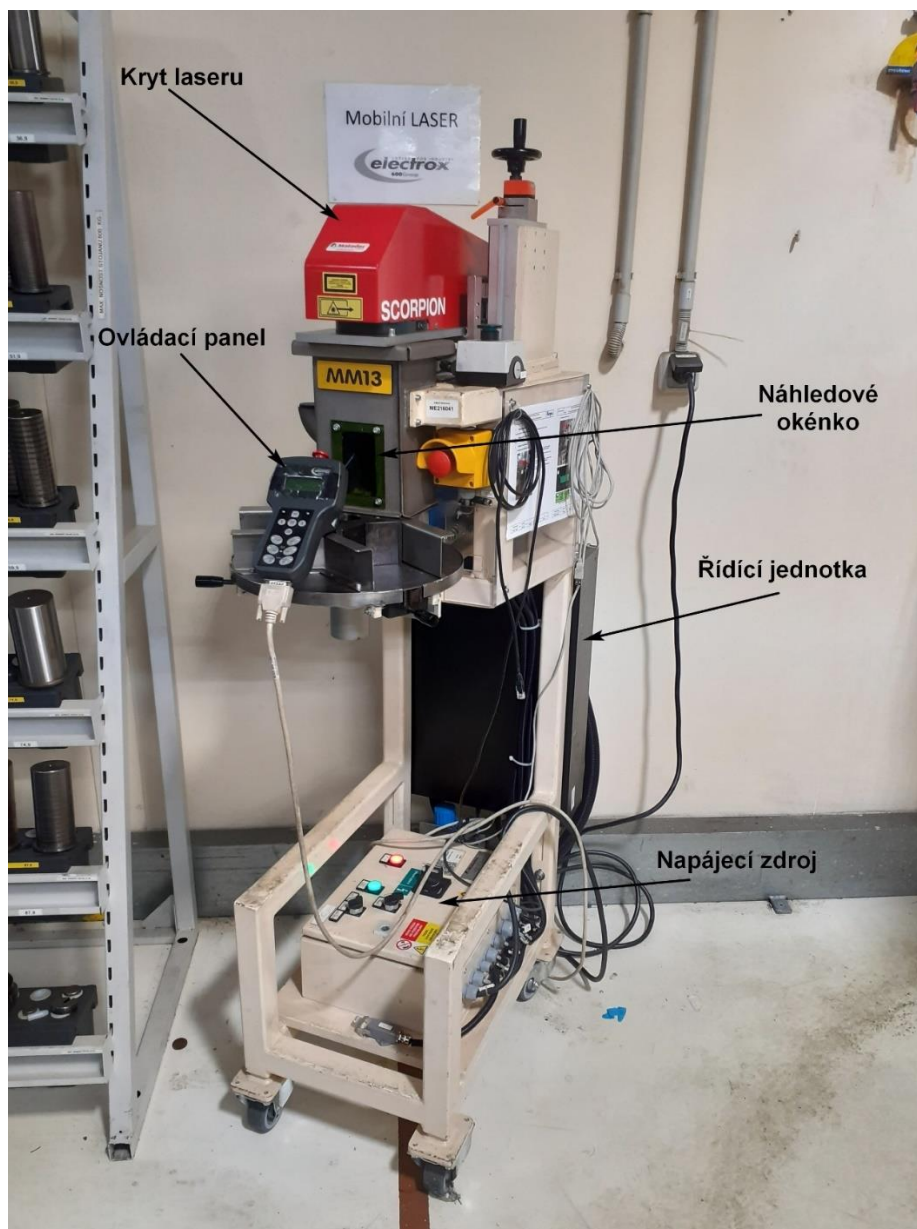
Převzato z [30].

Výsledný pulz s maximálním výkonem projde přes poslední optický izolátor do vodícího vlákna a následně je fokusován na materiál. Laserový systém je chlazen vzduchem. Je tedy nutné mít kolem laseru dostatečný prostor pro obtékání vzduchu okolo laserového krytu.

Svazek laseru je fokusován na materiál fokusační optikou. Ta se skládá z expandéru, galvanometrických zrcátek a F-theta čočky. Svazek laseru prochází expandérem, který snižuje rozbíhavost fokusovaného svazku. Poté prochází přes galvanometrická zrcátka na F-theta čočku a je fokusován na materiál [30]. Princip práce galvanometrických zrcátek a F-theta čočky je popsán v předešlém textu v kapitole 1.1.2.

Laserový systém obsahuje také bezpečnostní a pomocné prvky. Bezpečnostním tlačítkem v případě nebezpečí personál nouzově vypne laser. Pomocným prvkem je viditelná dioda, která ukazuje místo, kde by mohl být materiál laserem ovlivněn [30].

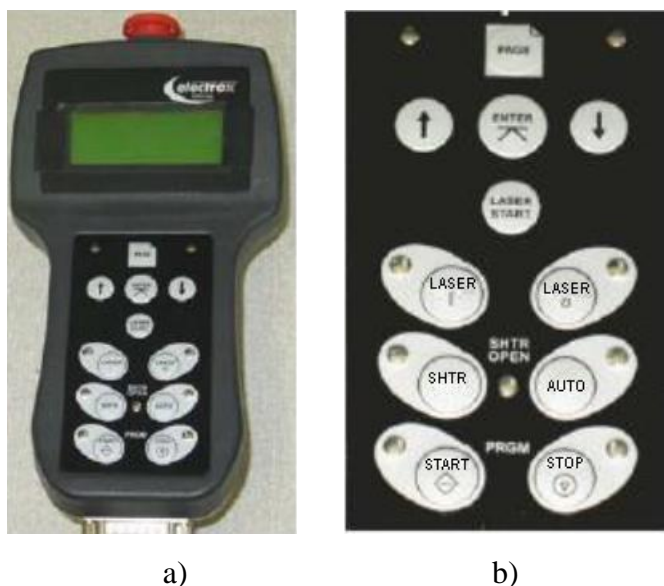
Skříň laseru s napájecím zdrojem je připevněna na konstrukci s otočným pracovním stolem. Celá dráha svazku je uzavřena ve skříni laseru a za náhledovým okénkem, viz obrázek 34, tzn. jedná se o laser bezpečnostní třídy 1.



Obrázek 34: Laserový systém firmy ElectroX Scorpion Rapide 2.

Laser je ovládán pomocí ovladače s tlačítky a displejem se základními informacemi, viz obrázek 35a, a PC připojeného k laseru pomocí USB, LAN, nebo COM portu. Z PC se do laseru nahrávají programy pro značení vytvořené v softwaru Scriba.

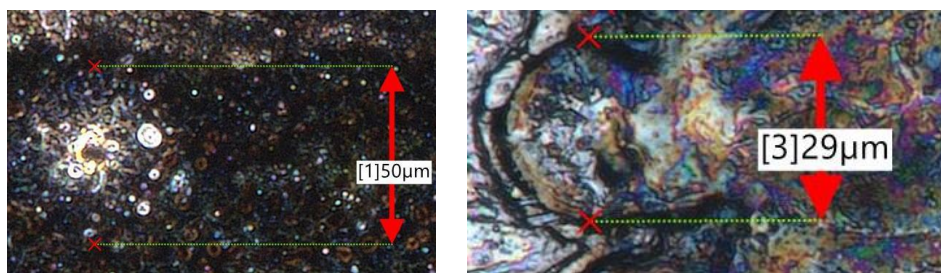
Na ovládacím panelu jsou tlačítka pro inicializaci po spuštění laseru a ovládání vnitřního softwaru. Dále zde jsou tlačítka pro spuštění generace záření (LASER I, LASER O), tlačítka start a stop programu, tlačítko pro otevření uzávěrky laseru a tlačítko auto. Viz obrázek 35 b. Červený ovladač nahoře je bezpečnostní vypnutí laseru [30].



Obrázek 35: a) Ovládací panel laseru ElectroX Scorpion Rapide G2, b) tlačítka na ovládacím panelu. Upraveno z [30].

Laser je napájen z klasické zásuvky na 220 V. Zapnutí laseru probíhá zapnutím zdroje elektřiny a poté otočením klíčkem pro spuštění emise.

Laser Scorpion Rapide G2 má maximální průměrný výkon 20 W, frekvence pulzů může být v rozsahu (0,1 – 500) kHz a délka pulzu 250 ns. Vlnová délka záření je (1 060 – 1 080) nm. Pro praktické účely jsou důležité možnosti značení: rychlost zápisu (0,5 – 10 000) mm · s⁻¹, velikost znaků (0,5 – 100) mm, rychlost značení až 1 000 znaků o výšce 1 mm za 1 s a polohové rozlišení 0,005 mm – tato hodnota je závislá na použité F-theta čočce, dané hodnoty odpovídají čočce s rozměry pole 163 mm x 144 mm. F-theta čočka použitá v daném laseru má ohniskovou vzdálenost $f_L = 254$ mm a doporučená pracovní vzdálenost $F_w = 323$ mm. Teoretický průměr svazku při pracovní vzdálenosti $F_w = 323$ mm je roven $w = 50$ μm, udávaná kvalita svazku je $M^2 < 2$. Experimentálně změřená hodnota pro pracovní vzdálenost $F_w = 323$ mm je $w = 50 \pm 2$ μm a pro pracovní vzdálenost $F_w = 319$ mm je $w = (29 \pm 2)$ μm, viz ukázkové snímky měření průměru svazků na obrázcích 36a a 36b, [30], [31].



a)

b)

Obrázek 36: Průměry svazků laseru v pracovní vzdálenosti a) 323 mm, b) 319 mm.

Průměry svazku byly měřeny na 4 místech a výsledná hodnota je průměrem měření. Hodnota nejistoty je určena a je větší než vypočtená hodnota z důvodu možnosti špatného určení okrajů stopy svazku.

3.1.2 Digitální mikroskop KEYENCE VHX-7100

Pro pozorování a vyhodnocování kvality vyznačeného 2D kódu bylo nutné použít mikroskop s dostatečným přiblížením, kvalitou snímků a následného přesného měření 3D dat. Digitální mikroskop KEYENCE VHX 7100 má velikost pořízeného snímku až 4k (4 000 px x 3 000 px) a maximální zvětšení 6 000x. Má také možnost 3D skenování vzorku a měření vlastností povrchu na 3D datech. Typická hodnota rozlišení ostříčího motoru v ose z je 0,1 μm . Princip digitálního mikroskopu je stejný jako u klasického optického, jen místo okuláru je snímací čip, viz obrázek 37 [32], [33].



Obrázek 37: Schéma snímací hlava mikroskopu Keyence VHX-7100. Převzato z [32].

Samotný digitální mikroskop se skládá z PC s integrovaným 4K monitorem, ovládacího panelu připojeného k PC, posuvného pracovního stolku s držákem a posuvy na integrovanou hlavu, hlava má otočný revolver se 4 bajonety na objektivy, viz obrázek 38.



Obrázek 38: Sestava digitálního mikroskopu Keyence VHX-7100. Převzato z [34].

Jednotlivé objektivy mají rozsah přiblížení čtyřnásobek až pětinasobek základního rozlišení, viz obrázek 39.

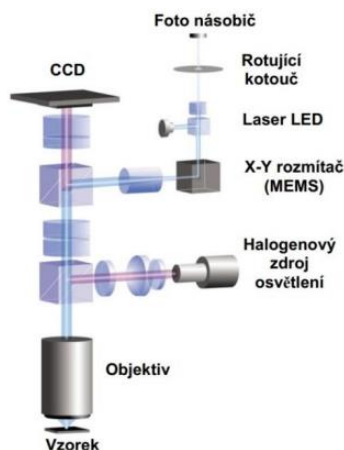


Obrázek 39: Objektivy digitálního mikroskopu Keyence VHX-7100. Převzato z [34].

Mikroskop má také možnosti možnost naklápění snímací hlavy, práci s osvětlením, úpravy snímků pro lepší zobrazení struktury povrchu a další softwarové funkce.

3.1.3 Konfokální mikroskop LEXT OLS 5000

Pro ověření přesnosti 3D dat byl jeden vzorek zkoumán na konfokálním mikroskopu LEXT OLS 5000. Oproti klasickému mikroskopu je konfokální mikroskop díky své konstrukci, viz obrázek 40, schopen snímat pouze rovinu v hloubce ostrosti. Díky tomu je možné pomocí softwaru v PC přesněji skládat jednotlivé snímky vzorku do 3D záznamu a zachovat přesnější data o rozměru vzorku v ose z, hodnota rozlišení v ose je až 0,5 nm [35].



Obrázek 40: Optická dráha konfokálního mikroskopu LEXT. Převzato z [36].

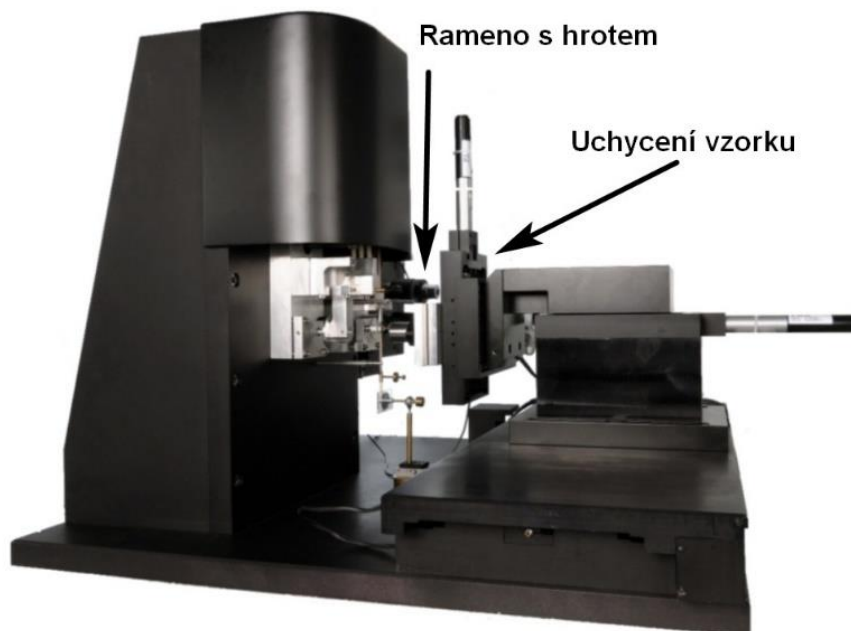
LEXT OLS 5000 se skládá ze zdroje připojeného k PC a mikroskopu. Mikroskop se skládá z pracovního stolku, skříně s elektronikou, optikou a k ní připojenému revolveru s pěti objektivy se zvětšeními 5x, 10x, 20x, 50x a 100x. S objektivem 100x může pracovat mikroskop ve 2 vzdálenostech od vzorku. Mikroskopu se ovládá převážně přes PC, pohyb pracovního stolku lze ovládat také joystickem, viz obrázek 41. Rozlišení CCD čipu je 4 096 x 4 096 px. Mikroskop je schopen skládat více snímků vzorku do jednoho. Rozsah zvětšení je 54x až 17 280x. Jako zdroj světla mikroskop využívá laser o vlnové délce $\lambda_L = 408$ nm a halogenovou lampu.



Obrázek 41: Konfokální mikroskop LEXT OLS 5000. Převzato z [37].

3.1.4 Nanointendační přístroj NanoTest NTX

Přístroj NanoTest NTX od firmy Micromaterials byl použit pro zjištění mechanických vlastností vytvořené vrstvy oxidu a původního materiálu. Přístroj se skládá z ramene, na kterém je připevněn nanointendační hrot, a posuvného uchycení pro měřený vzorek, viz obrázek 42.



Obrázek 42: Nanointendační přístroj NanoTest NTX. Upraveno z [38].

Rameno se vzorkem vtlačí na určeném místě hrot do vzorku definovanou silou. Ta je určena na základě vlastností materiálu, případně tloušťky vrstvy na materiálu. Po odlehčení hrotu je rameno přesunuto na další místo. Takto jsou do vzorku na určité ploše vytvořeny vtisky. Z velikosti vtisku a použité síly jsou následně určeny mechanické vlastnosti vzorku. Přesnost zatížení vzorku je 3 nN, maximální zatížení 500 mN [39].

3.2 Materiál

Jako základní materiál byla v experimentu použita vysokouhlíková ocel obsahující křemík, mangan, chrom a nikl s označením 1.3505 (5210, 100Cr6). Je to nízkoslitinová ocel, která prochází kalením. Je vhodná pro výrobu kuliček, válečku a kroužků pro ložiska. Chemické složení oceli je uvedeno v tabulce 2 [40].

Tabulka 2: Chemické složení oceli 100Cr6 [40].

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Další
Obsah [hm. %]	0,97	0,25	0,35	1,5	-	max. 0,30	-	-	max. 0,3 Cu

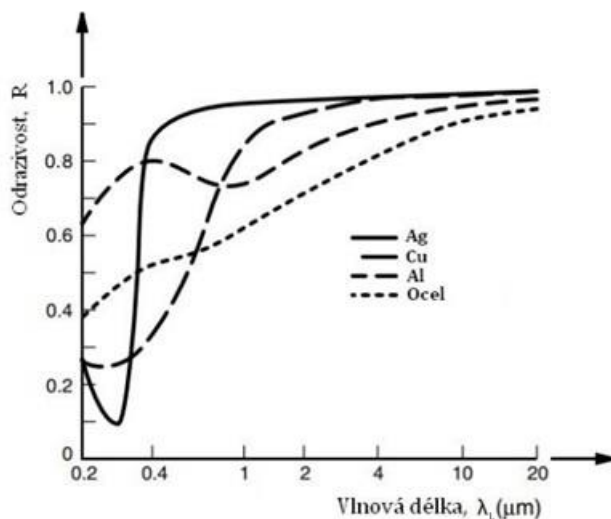
Použití materiálu pro dané aplikace je určena také mechanickými vlastnostmi. Po mírném žhání, zahřátí v peci na (760–800) °C a pomalém vychladnutí, je uváděna maximální Brinellova tvrdost 207. Po kalení, zahřátí na teplotu (830–870) °C a následné olejové lázni, je udávaná tvrdost 64 HRC. Modul pružnosti v tahu má hodnotu $E = (190–210)$ GPa [40].

Pro výpočet teoretických parametrů značení je třeba znát některé fyzikální vlastnosti popisující reakci materiálu na dodávání tepla a reakci s okolím. Některé vlastnosti oceli známe – měrné teplo pevného skupenství c_p , tepelnou vodivost λ a hustotu ρ . Pro základní odhad postačí teploty železa – teplota tání T_t a teplota stability oxidové vrstvy T_r . Hodnoty veličin viz tabulka 3.

Tabulka 3: Fyzikální vlastnosti železa a oceli 100Cr6 [24], [40], [41].

T_t	T_r	c_p	λ	ρ
[°C]	[°C]	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	[kg·m ³]
1 538	200	460	20	7 830

Velice významná vlastnost materiálu je odrazivost R . Její hodnota pro kovy se mění v závislosti na teplotě, s rostoucí teplotou klesá. Důležitá je i úprava povrchu kovu. Povrch přímo z výroby má vyšší odrazivost než povrch po obroušení smirkovým papírem. Pro povrch z výroby je přibližná hodnota odrazivosti pro vlnovou délku $\lambda_L = 1\ 070\ \text{nm}$ za standardních podmínek stanovena z grafu, viz obrázek 43, a je rovna $R = 0,6$.



Obrázek 43: Odrazivost kovů a kovových slitin v závislosti na vlnové délce.

Upraveno z [42].

3.3 Nastavení experimentu

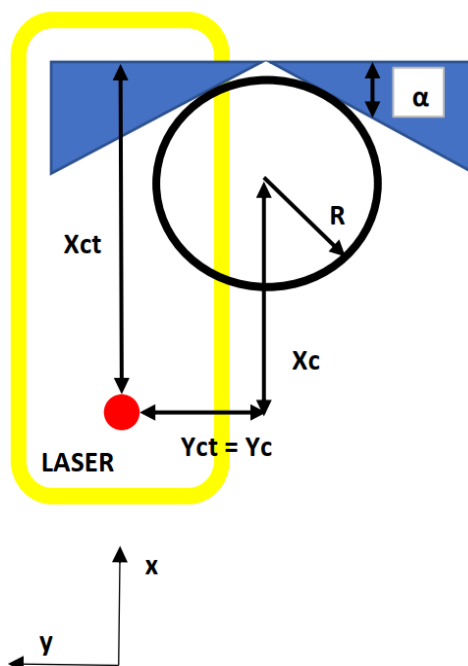
Pro značení materiálu laserem lze použít různé hodnoty parametrů laseru pro dosažení požadovaného výsledku. Nastavení parametrů je závislé na technologii značení, vlastnostech materiálu zadaných požadavcích pro značení a jejich prioritního seřazení (rychlost vyznačení na materiál, kvalita značení, finanční zatížení, ...). Pro dosažení požadovaného výsledku značení je třeba parametry optimalizovat.

V následujících kapitolách jsou popsány nastavení parametry použité v experimentu.

3.3.1 Uchycení vzorků a kalibrace os laserového systému

Pro dosažení kvalitních výsledků při značení laserem je důležité, aby pozice vzorku byla pevně dána a byly určeny souřadnice značení tak, aby vyznačené kódy a písmena byly správně umístěny na vzorku.

Jako vzorky byly použity kroužky pro výrobu ložisek s vnějšími průměry $d_{out} = 53,5$ mm, 53,47 mm, 45,8 mm, 72,1 mm. Ty byly vkládány na pracovní stůl do klínu o úhlu $\alpha = 20^\circ$. Navíc nulové souřadnice os x a y nejsou na ose klínu, viz obrázek 44.



Obrázek 44: Nákres uchycení vzorku na pracovní stůl.

Kvůli různému průměru ložisek bylo nutné pro každý typ vypočítat korekce souřadnic pro střed ložiska. Pro osu y byla korekce souřadnice středu y_s ložiska rovna vzdálenosti bodu $y = 0$ mm a souřadnice na ose klínu y_{ct} . Pro osu x je výpočet složitější a je dán vztahem

$$x_s = x_{ct} - \frac{d_{out}}{2 \cdot (\cos \alpha + \tan \alpha \sin \alpha)} [\text{mm}], \quad (7)$$

kde x_{ct} je vzdálenost nulové souřadnice laserového svazku v ose x a základny klínu.

Samotný pracovní stůl je otočný a má 3 klíny, viz obrázek 45.



Obrázek 45: Ukázka pracovního stolu laseru Scorpion Rapide G2.

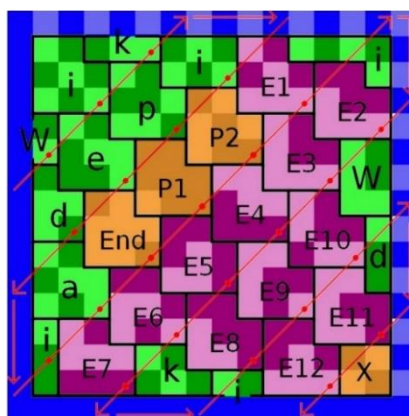
Otáčení stolkem musí být prováděno opatrně. Při umístění jednoho klínu pod skenovací hlavu laseru je stolek zajištěn mechanismem, který dává do stolku jistý zpětný ráz. Kvůli tomu je možné, že se ložisko v klínu pohne a při značení dojde k chybnému umístění kódu a může se stát, že kód bude značen až na hranu ložiska, viz obrázek 46, nebo laser bude skenovat mimo ložisko.



Obrázek 46: Ukázka vyznačení kódu na hranu a mimo vzorek.

3.3.2 Popis data matrix kódu

Na vzorky byl značen tzv. data matrix kód. Je to matice černých a bílých čtverečků, dále buněk. Je ze dvou stran ohraničená černou řadou buněk tzv. L finder pattern, která slouží k nalezení matice, určení její velikosti, orientace a zjištění distorze matice. Další dvě strany jsou ohraničené střídajícími se černými a bílými buňkami, tzv. Clock track. Ty slouží k určení základní struktury symbolu a také pomáhají určit velikost a distorzi matice. Buňky data matrix kódu jsou sdruženy do oblastí. Jednotlivé oblasti se skládají z osmi buněk (8 bitů). Buňky mají význam jedničky (černá buňka) nebo nuly (bíla buňka). U některých aplikací lze význam barev obrátit. Různé kombinace 8 buněk poté dávají každé oblasti význam. Existuje několik druhů oblastí, viz obrázek 1. Data kódu jsou vyčítána diagonálně, viz obrázek 47 [43], [44].



Obrázek 47: Ukázka skládání data matrix kódu z oblastí a vyčítání kódu. Upraveno z [44].

Zelené oblasti nesou požadovanou informaci, oranžové oblasti jsou výplň pro tvar matice, fialové oblasti jsou korekce pro chyby, modrá oblast značí L pattern a Clock track pro nalezení kódu. Jednotlivé oblasti jsou obvykle složeny do tvaru čtverce. Existuje i obdélníková varianta kódu, viz obrázek 48 [43], [44].



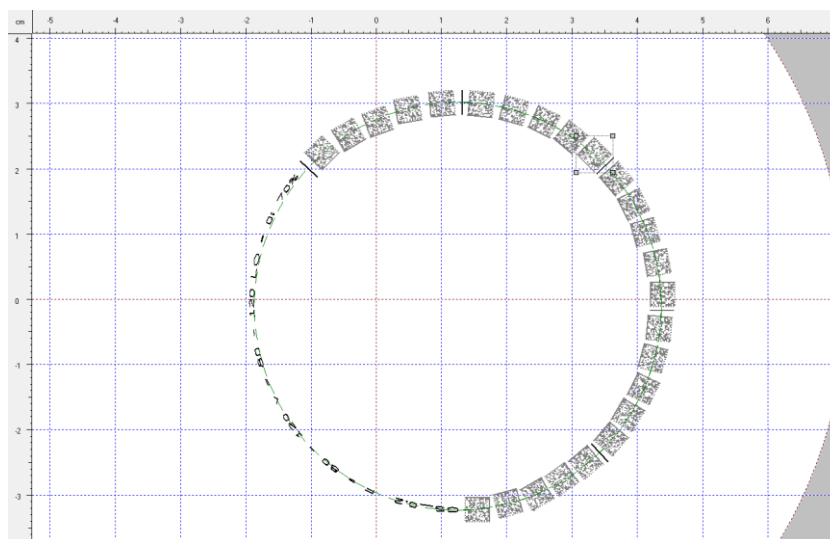
Obrázek 48: Ukázka obdélníkové verze Data Matrix kódu. Převzato z [44].

Data matrix kód pojme dle velikosti matice různé množství dat. Rozsah velikostí čtvercové matice kódu je od 10x10 buněk, která pojme 1 byte, tedy 3 alfanumerické znaky, po matici 144x144, která pojme 1555 bytů resp. 2335 alfanumerických znaků. Rozsah obdélníkové matice je od 8x18 buněk po 16x48 buněk. Data matrix kód může obsahovat kódovací struktury, např. ASCII, nebo ISO/IEC 646. Pro korekci chyb se používá standart ECC 200. Data matrix kód popisují standarty určující různé vlastnosti pro použití. Příkladem je ISO/IEC 16022:2006, který popisuje proces kódování informace od matice [43], [44].

Pokud porovnáme Data Matrix kód například s QR kódem, tak velkou výhodou Data matrix kódu je obsah dat ku velikosti – vyšší hustota dat v ploše kódu. Výhodou QR kódu je možnost větší matice než u Data matrix kódu, a tedy většího obsahu dat. Pro průmysl, kde se preferuje menší matice s větší hustotou dat, je výhodnější Data matrix kód [45].

3.3.3 Software pro programování značení

Programy pro značení byly vytvořeny v softwaru Scriba verze 3.6.0.10. Pomocí softwaru lze i částečně ovládat laser. Programování značení probíhá graficky. Na levé straně je od kraje seřazena lišta pro výběr obrazce nebo různých funkcí, okno se seznamem obrazců na pracovní ploše a okno s nastavením vybraného obrazce. Pod okny je další menší okno pro psaní textu, vkládání informací do kódů, nebo zadávání rozměrů některých obrazců. Vytvoření obrazce je snadné. V postranní liště je vybrán typ obrazce, který má být vyznačen. Ten je umístěn na pracovní plochu. Je možnost vybrat text ve variantě kruhové nebo řádkové, 4 typy kódů, obrázků a logo. Umístění obrazce lze udělat graficky tažením myši, nebo v okně nastavení obrazce zadat souřadnice. Ve stejném okně jsou také nastavovány parametry laseru pro značení, parametry kódů, jako je velikost případně tvar, parametry loga apod. Důležitým nastavením je také nastavení typu souřadnic pro kruhový text. Možností je soustava XY, nebo R-theta. Přibližování pracovní plochy je možné kolečkem myši, posuv pracovní plochy je pouze posuvníky na dolní a pravé straně okna softwaru. Pracovní plocha má označené osy a mřížku, viz obrázek 49.



Obrázek 49: Ukázka pracovní plochy softwaru Scriba.

Důležité je propojení PC s laserem. Během experimentu bylo propojení realizováno pomocí LAN kabelu. Je nutné mít správně nastavenou IP adresu a adresu vstupní brány v síťové kartě, aby spojení bylo možné.

3.3.4 Čtení vyznačených 2D data matrix kódů

Pro čtení vyznačených data matrix kódů byla použita mobilní aplikace Barcode Scanner od firmy Cognex. Z hledaných možností čtení kódů byla tato aplikace zdaleka nejlepší. Má velké množství nastavení. Obraz lze přiblížit, lze nastavit využití CPU jednotek mobilního telefonu, jaké kódy má aplikace číst a další funkce. Rozlišovací schopnost aplikace je závislá na rozlišení mobilního telefonu. Byly použity dva mobilní telefony, Xiaomi Redmi 2 Enhanced s fotoaparátlem o rozlišení 8 Mpix a Motorola Moto Z Play s rozlišením fotoaparátu 16 Mpix. Při přečtení kódu mobilní telefon vydá zvukové upozornění a daný kód označí zeleným čtverečkem, viz obrázek 50.



Obrázek 50: Ukázka čtení kódů mobilní aplikací.

Výhodou použité aplikace je, že firma KOYO používá kamerový systém pro čtení kódů také od firmy Cognex.

3.3.5 Parametry procesu značení

Parametry značení data matrix kódu, které se nastavovaly během experimentu, jsou průměrný výkon P [W] – v praxi nastavení procent maximálního výkonu, frekvence pulzů f [kHz], rychlost skenování v [mm·s⁻¹], odstup řádků tzv. line offset l_{off} [mm] a velikost buňky data matrix kódu s_c [mm]. Délka pulzu byla rovna $\tau = 250$ ns. Na jejich základě lze vypočítat vhodné veličiny pro kvalitativní popis procesu značení jako je vstup tepla a překrytí pulzů.

Energie pulsu E ovlivňuje teplotu povrchové vrstvy materiálu. Při příliš vysoké hodnotě může dojít k natavení povrchu, což je nežádoucí efekt. Její minimální hodnota je počítána kalorimetrickou rovnicí, ve které je zohledněna i odrazivost materiálu. Rovnice má tvar

$$E = \frac{S \cdot h}{1-R} \rho [c_p \cdot (T_r - T_0)] \text{ [J]}, \quad (8)$$

kde S je plocha svazku, T_0 je počáteční teplota materiálu a h je hloubka ovlivněné vrstvy odhadnuta dle vzorce

$$h = \sqrt{\frac{\lambda \cdot \tau}{\rho \cdot c_p}} \text{ [m]} \quad (9)$$

Při značení mimo energie v pulzu ovlivňuje kvalitu značení vedení tepla materiálem. Teplo, které je dodáno na povrch materiálu ovlivní i nějakou oblast mimo plochu pulzu. Vedení tepla po ploše popisujeme rovnicí

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}, \quad (10)$$

kde q je hustota tepelného toku, dT je diferenciál teploty a dx je diferenciál souřadnice. Proto se pro přesnější popis procesu značení používá veličina vstup tepla, která je dána rovnicí

$$E_S = \frac{P}{v \cdot (l_{\text{off}} + w)} \text{ [J} \cdot \text{mm}^{-2}\text{]}. \quad (11)$$

Hodnota vstupu tepla má zásadní vliv na kvalitu vytvořené vrstvy a její korozní odolnost. Vliv na kvalitu má také frekvence. Při zvyšování frekvence pulzů totiž klesá energie pulzu, která se z průměrného výkonu vypočítá dle vzorce

$$E = \frac{P}{f} \text{ [J]}. \quad (12)$$

Díky tomu je energie do materiálu dodávána rovnoměrněji.

3.3.6 Nastavení hodnot parametrů experimentu

Počáteční hodnoty parametrů vycházely ze zkušenosti pracovníků firmy KOYO Bearings. Průměrný výkon laseru měl hodnotu $P = 20$ W, rychlost značení $v = 100$ mm·s⁻¹, frekvence pulzů $f = 20$ kHz, pracovní vzdálenost $F_w = 323$ mm, odstup řádků $l_{off} = 0$ mm a velikost buňky $s_c = 0,4$ mm. Značilo se na ložiska s šířkou čela 6,00 mm, 4,44 mm, 3 mm a 1,90 mm. Cílem experimentu bylo vytvořit kód s vysokou hustotou informace na plochu a dobrou čitelností čtecím zařízením.

V první části experimentu byly optimalizovány parametry pro pracovní vzdálenost $F_w = 323$ mm, velikost buňky $s_c = 0,4$ mm a odstup řádků $l_{off} = 0$ mm. Průměrný výkon měl hodnotu $P = 20$ W. Ložiska, na která se značilo, měla, povrch obroušen smirkovým papírem. Nejprve byl zkoumán vliv rychlosti a frekvence. Jednotlivé proměnné parametry jsou napsány v tabulce 4. Vstup tepla pro odstup řádku $l_{off} = 0$ mm je značen E_{S0i} . Vzorky byly značeny všemi možnými kombinacemi frekvence a rychlosti.

Tabulka 4: Frekvence, rychlost a vstup tepla při značení v pracovní vzdálenosti 323 mm.

i	v_i [mm·s ⁻¹]	f_i [kHz]	E_{S0i} [J·mm ⁻²]
1	80	20	5,0
2	100	40	4,0
3	120	60	3,3
4	140	80	2,9
5	160	100	2,5

Následně byly vybrány ideální parametry značení a to $f = 40$ kHz, $v = 100$ mm·s⁻¹ a $E_S = 4,0$ J·mm⁻². S těmito parametry byl zkoumán vliv odstupů řádků l_{off} na kvalitu značení. Parametry použité v experimentu jsou v tabulce 5. Vstup tepla byl dopočítán dle vzorce (11) pro každou hodnotu odstupů řádků l_{off} .

Tabulka 5: Odstup řádků a vstup tepla ideálními parametry z předchozí části.

l_{off} [mm]	E_S [J·mm ⁻²]
0,000	4,0
0,025	2,7
0,050	2,0
0,075	1,6
0,100	1,3

Jako ideální parametry byly určeny $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 40 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0.050 \text{ mm}$. Vstup tepla byl $E_{S0} = 2 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. Poté byly zkoumány možnosti zmenšení 2D data matrix kódu s nastavenými ideálními parametry.

V druhé části experimentu byly optimalizovány parametry pro pracovní vzdálenost $F_w = 319 \text{ mm}$. Optimální hodnoty byly určovány pro kód s velikostí buňky $s_c = 0,2 \text{ mm}$, výkon $P = 20 \text{ W}$ a odstup řádku $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$, $l_{\text{off}} = 0,025 \text{ mm}$ a $l_{\text{off}} = 0,050 \text{ mm}$. Ložiska, na která bylo značeno, měla povrch obroušen smirkovým papírem. Parametry použité pro značení jsou napsány v tabulce 6. Vzorky byly značeny všemi možnými kombinacemi frekvence, rychlosti a odstupu řádku. Vstup tepla pro odstup řádku $l_{\text{off}} = 0,025 \text{ mm}$, respektive $l_{\text{off}} = 0,050 \text{ mm}$ je značen E_{S025} , respektive E_{S05} .

Tabulka 6: Frekvence, rychlost a vstup tepla pro různé hodnoty odstupu řádků.

i	v_i [mm·s ⁻¹]	f_i [kHz]	E_{S0i} [J·mm ⁻²]	E_{S025i} [J·mm ⁻²]	E_{S05i} [J·mm ⁻²]
1	150	150	4,6	2,5	1,7
2	175	175	3,9	2,1	1,4
3	200	200	3,4	1,9	1,3
4	225	225	3,1	1,6	1,1
5	250	250	2,8	1,5	1,0

Následně byly zkoumány možnosti dalšího zmenšení velikosti buňky kódu pro ideální parametry a byla zkoumána možnost značení na ložiska firmy KOYO Bearings. Jako ideální parametry byly určeny $v = 175 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 200 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,050 \text{ mm}$. Vstup tepla byl $E_{S05} = 1,4 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$.

V poslední části experimentu byly optimalizovány parametry pro ložiska s povrchem přímo z výroby. Byly optimalizovány parametry pro pracovní vzdálenost $F_w = 319 \text{ mm}$, velikost buňky $s_c = 0,2 \text{ mm}$, výkony $P = 20 \text{ W}$, $P = 14 \text{ W}$ a $P = 12 \text{ W}$ a odstup řádků $l_{\text{off}} = 0 \text{ mm}$, $l_{\text{off}} = 0,025 \text{ mm}$ a $l_{\text{off}} = 0,050 \text{ mm}$. Parametry použité pro značení výkonem $P = 20 \text{ W}$ jsou uvedeny v tabulce 7. Vzorky byly značeny všemi možnými kombinacemi frekvence, rychlosti a odstupu řádku.

Tabulka 7: Frekvence, rychlost a vstup tepla pro různé hodnoty odstupu řádků při značení výkonem laseru 20 W na povrch ložiska opracovaný z výroby.

i	v_i [mm·s ⁻¹]	f_i [kHz]	E_{S0i} [J·mm ⁻²]	E_{S025i} [J·mm ⁻²]	E_{S05i} [J·mm ⁻²]
1	150	100	4,6	2,5	1,7
2	175	110	3,9	2,1	1,4
3	200	120	3,4	1,9	1,3
4	225	130	3,1	1,6	1,1
5	250	140	2,8	1,5	1,0

Parametry pro značení $P = 14$ W a $P = 12$ W jsou uvedeny v tabulce 8. Vzorky byly značeny všemi možnými kombinacemi frekvence, rychlosti a odstupem řádku $l_{off} = 0$ mm. Vstup tepla pro výkony $P = 14$ W, respektive $P = 12$ W je značen E_{S14} , respektive E_{S12} .

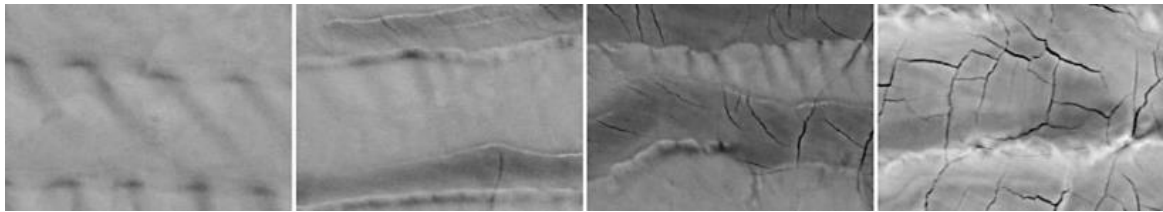
Tabulka 8: Frekvence, rychlost a vstup tepla pro různé hodnoty odstupu řádků při značení výkonem laseru 14 W a 12 W na povrch ložiska opracovaný z výroby.

i	v_i [mm·s ⁻¹]	f_i [kHz]	E_{S14i} [J·mm ⁻²]	E_{S12i} [J·mm ⁻²]
1	80	80	6,0	5,2
2	90	90	5,4	4,6
3	100	100	4,8	4,1
4	110	110	4,4	3,8
5	120	120	4,0	3,4

3.4 Hodnocení kvality vyznačeného kódu

Hodnocení kvality lze rozdělit na dva typy, schopnost čtení kódu čtecím zařízením a hodnocení mechanických vlastností povrchu značeného výrobku.

Pro mechanické vlastnosti povrchu je zásadní kvalita oxidové vrstvy. Ta je zkoumána na mikroskopu a projevuje se množstvím prasklin vrstvy. Pokud je vrstva kvalitní, je pod mikroskopem vidět homogenní povrch bez prasklin. Při špatném nastavení parametrů laseru je na snímcích z mikroskopu vidět více mikroprasklin, viz obrázek 51.



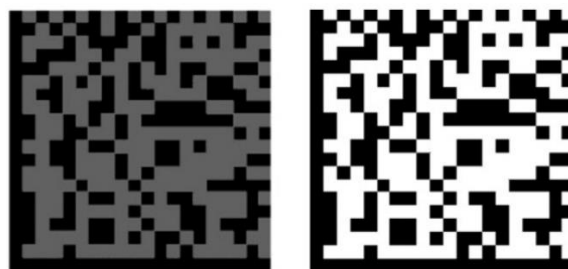
Obrázek 51: Ukázka různých oxidačních vrstev s narůstajícím množstvím prasklin.

Upraveno z [29].

Z hlediska kvality mechanických vlastností značeného výrobku se zkoumá odlišnost vlastností vrstvy od základního materiálu. Mezi zkoumané vlastnosti patří výška oxidové vrstvy h_v [μm] a korozní odolnost. Dále pak tvrdost H [GPa], redukovaný modul elasticity E_m [GPa], které byly měřeny na vybraných vzorcích.

Výška oxidové vrstvy byla měřena na mikroskopu KEYENCE VHX 7100. Na mikroskopu OLYMPUS LEXT OLS 5000 byl ověřeny výsledky z mikroskopu KEYENCE. Korozní odolnost byl pozorována během uchovávání ložisek. Tvrdost a elasticita byly měřeny nanoindentačním přístrojem s průběhem měření 20 s zatěžování, 40 s výdrž při maximálním zatížení a 10 s odlehčování. Maximální zatížení mělo sílu 20 mN. Byl použit hrot tvaru Berkovich. Měřené vlastnosti mají význam při použití výrobku.

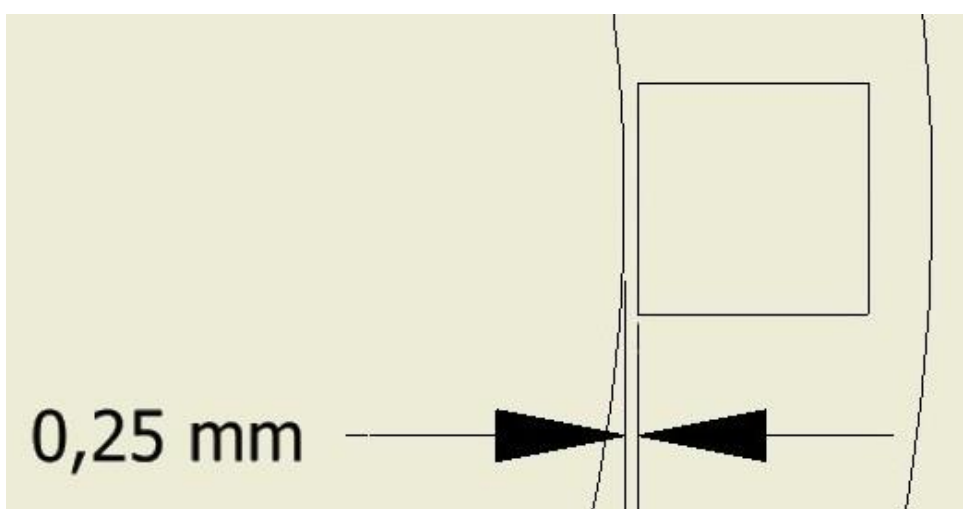
Kvalita oxidační vrstvy má také vliv na kontrast kódu. Ten je hlavním parametrem ovlivňujícím schopnost čtení kódu. Kromě kvality oxidační vrstvy je kontrast ovlivněn také podkladovým materiálem a kvalitou osvětlení. Podkladem může být laserem vytvořená světlá oxidační vrstva, nebo čistý neovlivněný materiál. Matematicky se kontrast vyjadřuje jako poměr rozdílu intenzit světlé buňky a tmavé buňky ku součtu intenzit těchto buněk. Ukázka rozdílně kontrastních Data Matrix kódů viz obrázek 52.



Obrázek 52: Porovnání různě kontrastních Data Matrix kódů. Upraveno z [43].

Pro výsledky experimentu je zásadní schopnost čtecího zařízení číst kód pravidelně a bez chyb při různých možnostech osvětlení. V experimentu bylo pro čtení užíváno běžných zdrojů osvětlení v domácnosti (LED žárovka, zářivka, ...).

Pro praktické účely využití čtení data matrix kódu je také důležitý objem dat, který může obsahovat vyznačený kód při daných rozměrech a minimální vzdálenost od okrajů čela ložiska, na které je značen. Požadavky minimálního obsahu dat odpovídají rozměru 18x18 buněk a 12x36 buněk, které obsahují 25, respektive 31 znaků. Minimální vzdálenost od okraje čela ložiska je 0,25 mm a je určena směrnicí firmy KOYO Bearings, viz obrázek 53. Aby kód obsahoval dostatečné množství dat při zmenšení plochy, na kterou je značen, je nutné zmenšit rozměry buňky kódu, což nutně způsobuje horší možnosti čtení, [47].



Obrázek 53: Ukázka umístění kódu na čelo ložisky.

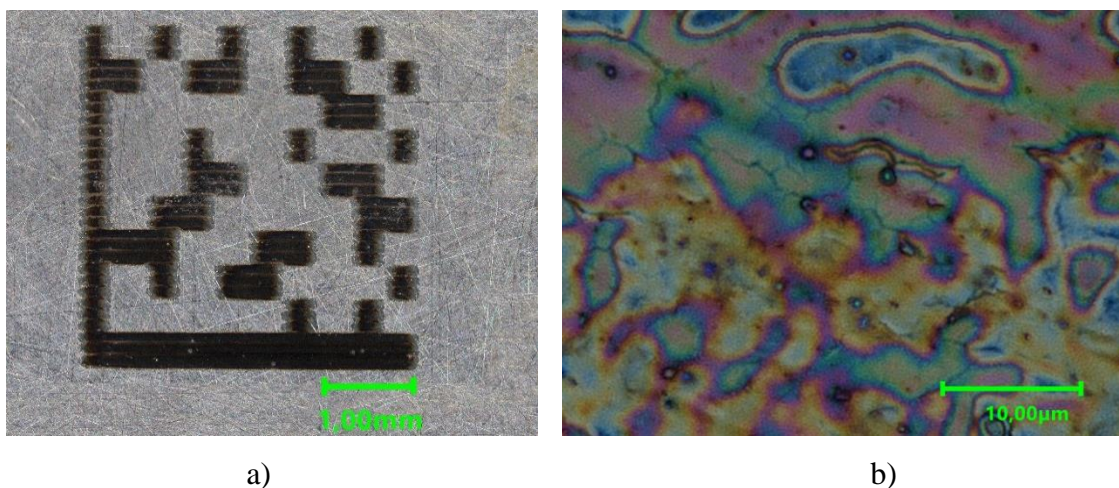
4 Výsledky experimentu

V následující kapitole jsou ukázány a popsány výsledky experimentu značení data matrix kódů laserovým žiháním. Výsledky jsou hodnoceny z hlediska kvality vytvořené vrstvy a možnosti načítání vyznačených kódů čtečkou. Je ukázáno největší možné rozlišení laseru a schopnost vytvořit kód s dostatečným obsahem dat na daný rozměr čela ložiska. V poslední části kapitoly jsou ukázány výsledky měření tvrdosti a modulu elasticity.

4.1 Optimalizace značení oceli v pracovní vzdálenosti 323 mm

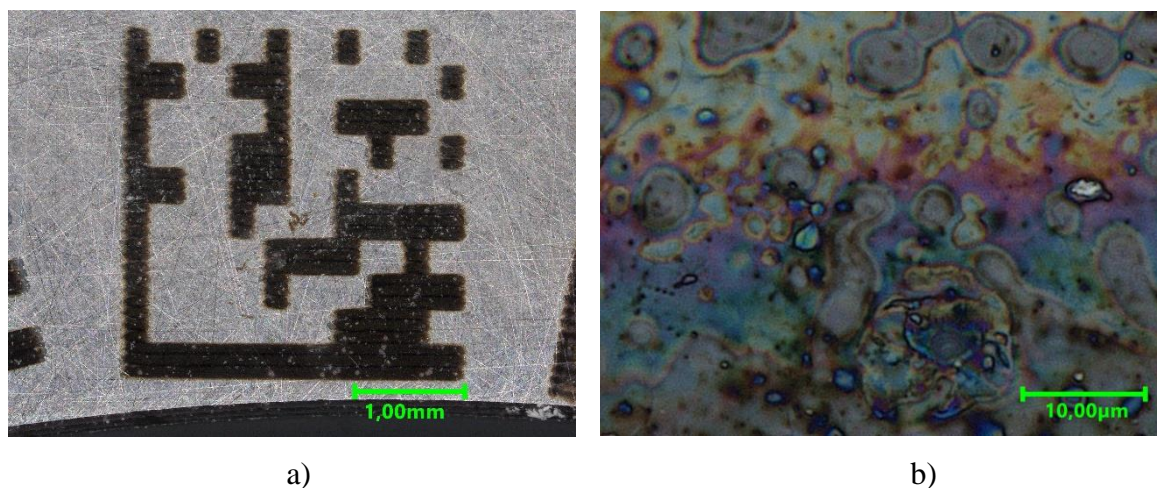
V této kapitole jsou ukázány výsledky značení v pracovní vzdálenosti 323 mm na ocel s broušeným povrchem. Jsou zde prezentovány výsledky optimalizace rychlosti značení, frekvence pulzů a odstavu řádku při značení výkonem laseru $P = 20$ W. Bylo značeno na ložisko s šířkou čela 6,00 mm. Následně jsou ukázány výsledky zmenšení data matrix. Všechny kódy měly velikost buňky kódu rovnu $s_c = 0,4$ mm.

Na obrázku 54 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 80$ mm·s⁻¹ a $f = 20$ kHz a $l_{off} = 0,000$ mm. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_S = 5,0$ J·mm⁻². Výška vrstvy je rovna $h_v = (1,3 \pm 0,2)$ μm. Kvalita značení je z hlediska kontrastu a možnosti čtení výborná (obrázek 54a). Vyznačená vrstva je relativně nízká, ale je znatelně popraskaná, viz obrázek 54b.



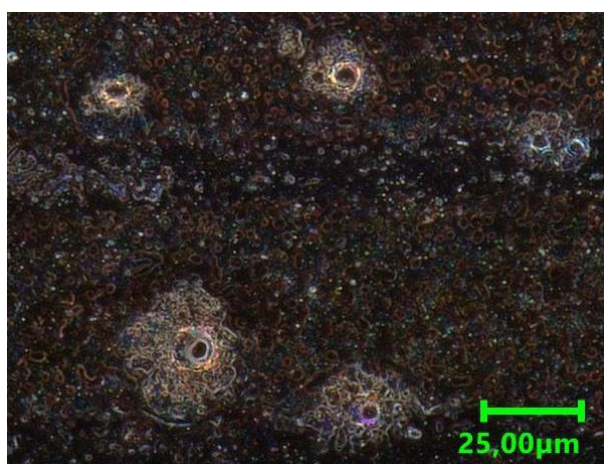
Obrázek 54: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 80$ mm·s⁻¹, $f = 20$ kHz a $l_{off} = 0,000$ mm.

Na obrázku 55 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 80 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 40 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_s = 5,0 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy je rovna $h_v = (1,5 \pm 0,5) \mu\text{m}$. Kvalita značení je z hlediska kontrastu a možnosti čtení výborná (obrázek 55a). Vyznačená vrstva je relativně nízká a je opět znatelně popraskaná, viz obrázek 55b. Na několika místech je vidět díry ve vrstvě. Na snímku 55a jsou vidět jako šedé tečky na vrstvě.



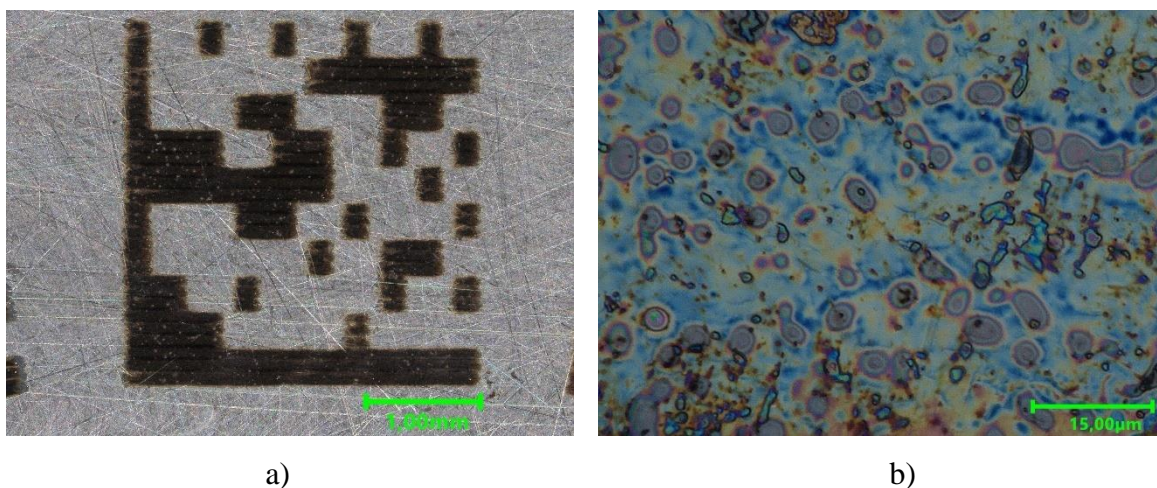
Obrázek 55: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 80 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 40 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$.

Na obrázku 56 je ukázán detail děr ve vyznačené vrstvě. Materiál okolo děr je světlejší a tvar děr připomíná kráter – díra s nahromaděným materiálem na okraji.



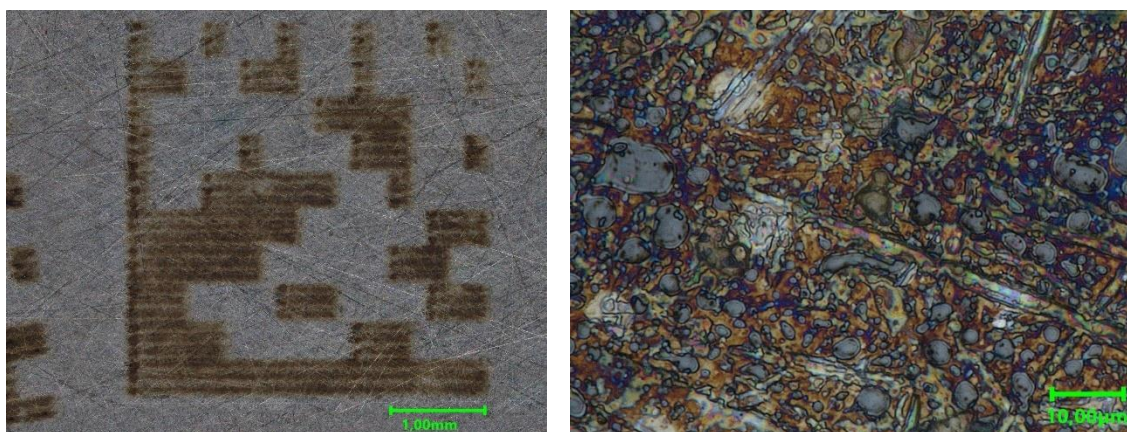
Obrázek 56: Detail děr ve vrstvě značené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 80 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 40 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$.

Na obrázku 57 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 40 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_S = 4,0 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy je rovna $h_v = (1,4 \pm 0,1) \mu\text{m}$. Kvalita značení je z hlediska kontrastu a možnosti čtení výborná (obrázek 57a). Stále jsou místy vidět díry ve vrstvě, ale v porovnání s předchozím snímkem mnohem méně. Vrstva je již téměř bez prasklin (obrázek 57b).



Obrázek 57: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a $f = 40 \text{ kHz}$.

Na obrázku 58 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 120 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 60 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_S = 3,3 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy je rovna $h_v = (1,18 \pm 0,04) \mu\text{m}$. Kvalita značení z hlediska kontrastu není dobrá (obrázek 58a). Vrstva má převážně hnědou barvu a kód je již velice špatně čitelný čtečkou. Vrstva je homogenní v řádku a bez prasklin (obrázek 58b), ale okraje řádků jsou mnohem světlejší než jejich střed.

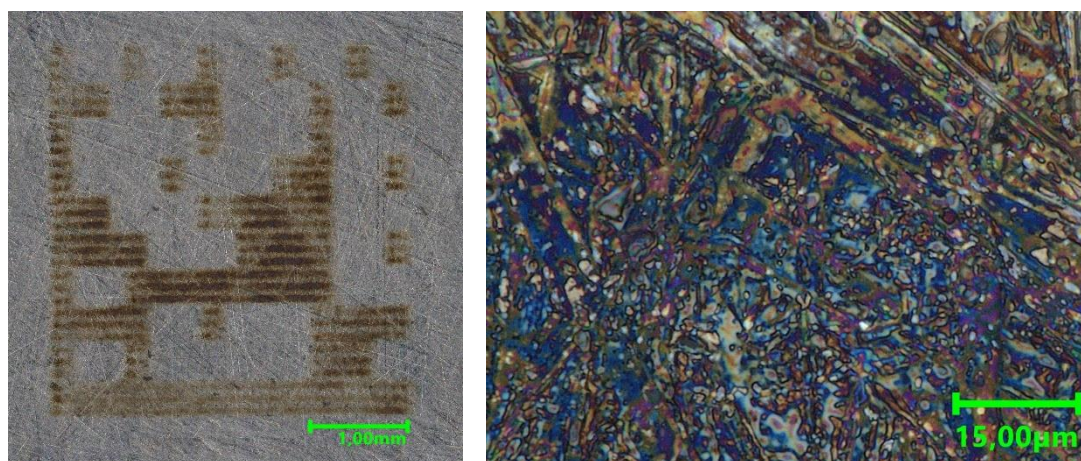


a)

b)

Obrázek 58: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 120 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 60 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$.

Na obrázku 59 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 140 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 60 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_S = 2,9 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy je rovna $h_v = (1,1 \pm 0,1) \mu\text{m}$. Kontrast kódu je špatný, viz obrázek 59a. Kód téměř nelze načíst čtečkou. Vrstva má hnědou až nažloutlou barvu a mezi řádky jsou mezery bez vrstvy. Vrstva v řádku je homogenní a bez prasklin (obrázek 59b).

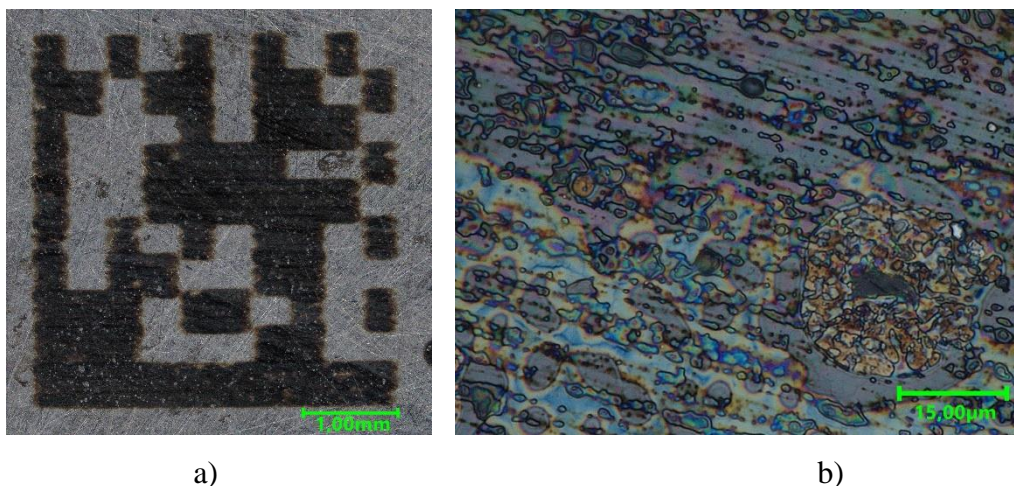


a)

b)

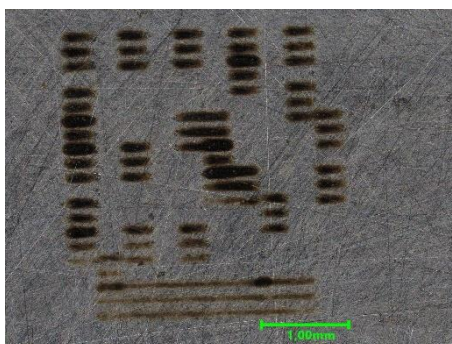
Obrázek 59: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 140 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 60 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$.

Na obrázku 60 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použití parametrech $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 40 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,050 \text{ mm}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_S = 2,0 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy je rovna $h_v = (1,1 \pm 0,5) \mu\text{m}$. Kontrast kódu je výborný, viz obrázek 60a. Čtení kódu je bezproblémové. Vrstva je homogenní a bez prasklin, viz obrázek 60b.



Obrázek 60: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 40 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,050 \text{ mm}$.

Na obrázku 61 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 40 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,075 \text{ mm}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_S = 1,6 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy na tomto vzorku nebyla měřena. Nastavení rychlosti a frekvence je stejné jako u předchozího snímku. Pouze se liší odstupem řádku. Ten je již příliš velký. Jednotlivé řádky jsou již oddělené. Kontrast kódu je docela dobrý, ale kvůli mezerám mezi řádky kód nelze načíst. Ve spodní části kódu je vidět spíše hnědá barva vrstvy snižující kontrast.

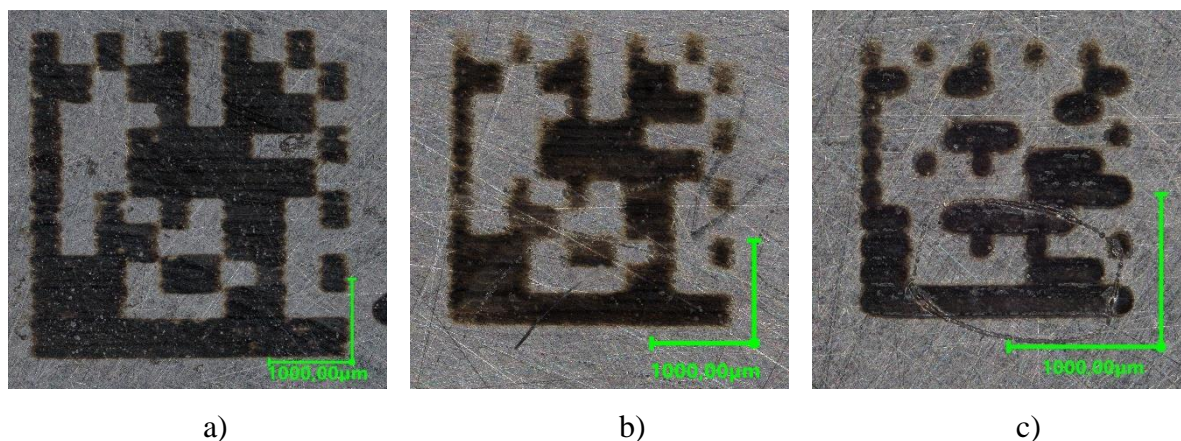


Obrázek 61: Ukázka celého kódu vyznačeného na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 40 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,075 \text{ mm}$.

4.1.1 Zmenšení velikosti buňky kódu pro pracovní vzdálenost 323 mm

Z předchozích výsledků byly vybrány ideální hodnoty značení $v = 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 40 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,050 \text{ mm}$. Těmito parametry byly značeny všechny vzorky, které jsou prezentovány v této kapitole. Všechny data matrix kódy mají rozměr 10 x 10 buněk.

Na obrázku 62 jsou ukázány 3 kódy o 3 různých velikostech buněk a rozměrech. Na obrázku 62a je ukázán kód s velikostí buňky $s_c = 0,4 \text{ mm}$. Buňky mají tvar čtverců a jsou dobře rozeznatelné. Na obrázku 62b je ukázán kód s velikostí buňky $s_c = 0,3 \text{ mm}$. Buňky jsou stále dobře definovatelné čtverce, ale mají již rozmazané okraje. Kód je stále dobře čitelný. Na obrázku 62c je ukázán kód s velikostí buňky $s_c = 0,2 \text{ mm}$. Je vidět zaoblení buněk. Jednotlivé buňky jsou kruhového, nebo oválného tvaru. Kód je již špatně čitelný. Další zmenšení je za hranicemi možností laseru v dané pracovní vzdálenosti, při které má laser průměr svazku $50 \mu\text{m}$.

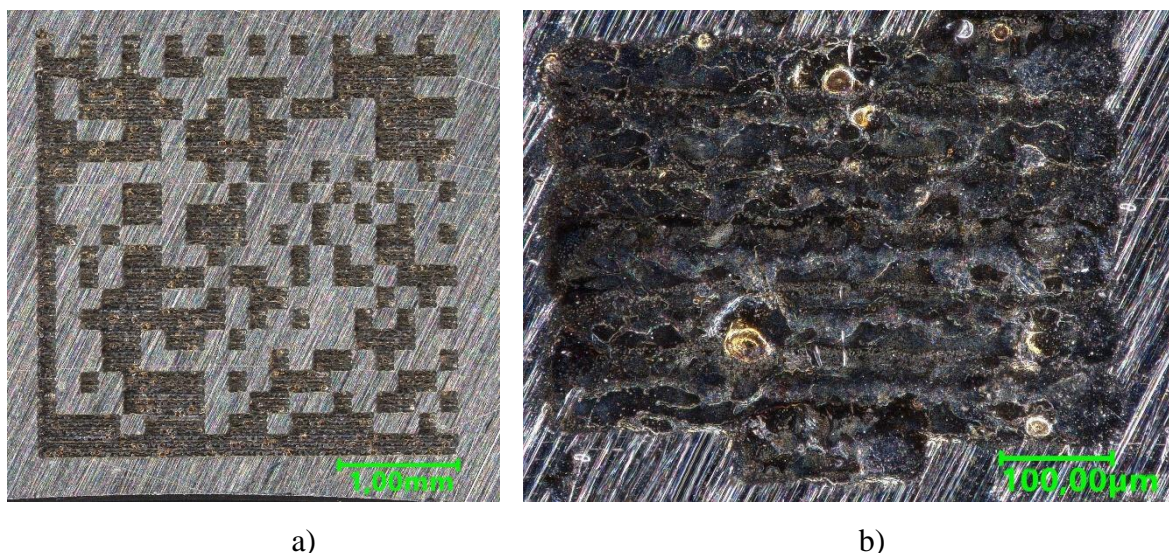


Obrázek 62: Ukázka kódu s velikostí buňky a) $s_c = 0,4 \text{ mm}$, b) $s_c = 0,3 \text{ mm}$, c) $s_c = 0,2 \text{ mm}$.

4.2 Optimalizace značení oceli v pracovní vzdálenosti 319 mm

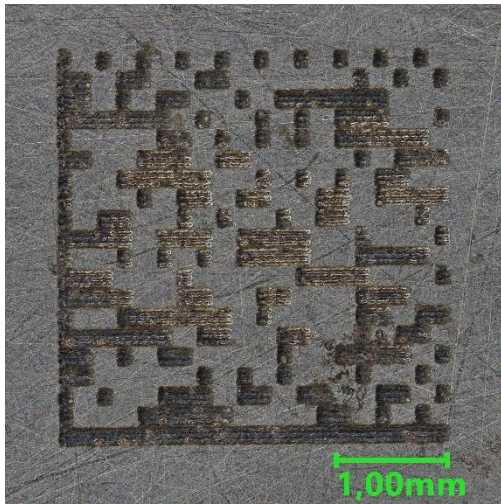
V této kapitole jsou ukázány výsledky značení v pracovní vzdálenosti 319 mm na ocel s broušeným povrchem. Opět jsou v textu prezentovány výsledky optimalizace rychlosti značení, frekvence pulzů a odstupu řádku při značení výkonem laseru $P = 20$ W. Bylo značeno na ložisko s šířkou čela 6,00 mm. Následně jsou ukázány výsledky zmenšení data matrix kódu. Všechny kódy měly velikost buňky kódu rovnu $s_c = 0,2$ mm.

Na obrázku 63 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 150$ mm·s⁻¹, $f = 250$ kHz a $l_{\text{off}} = 0,000$ mm. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_s = 4,6$ J·mm⁻². Výška vrstvy je rovna $h_v = (7,7 \pm 1,2)$ μm. Kontrast kódu je výborný, viz obrázek 63a. Čtení kódu je bezproblémové. Vrstva je velice vysoká a plná nerovností, ale bez prasklin, viz obrázek 63b. Občas se ve vrstvě objevují díry.



Obrázek 63: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 150$ mm·s⁻¹, $f = 250$ kHz a $l_{\text{off}} = 0,000$ mm.

Na obrázku 64 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 175$ mm·s⁻¹, $f = 200$ kHz a $l_{\text{off}} = 0,050$ mm. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_s = 1,4$ J·mm⁻². Výška vrstvy je rovna $h_v = (1,2 \pm 0,1)$ μm. Kontrast kódu je velice dobrý, viz obrázek 64a. Oproti kódu na obrázku 63 je kontrast menší, ale není snížena čitelnost kódu. Vrstva je nízká, homogenní a bez prasklin, viz obrázek 64b. Díry se ve vrstvě téměř neobjevují.



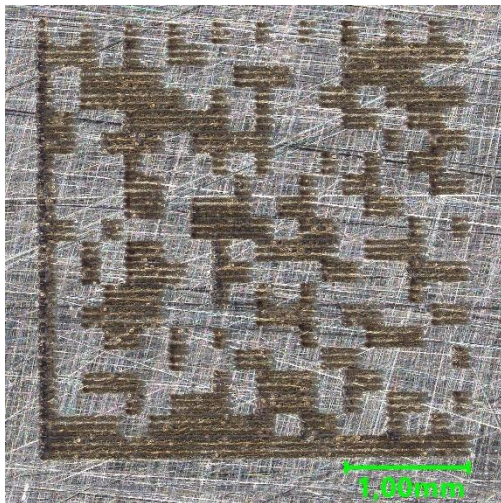
a)



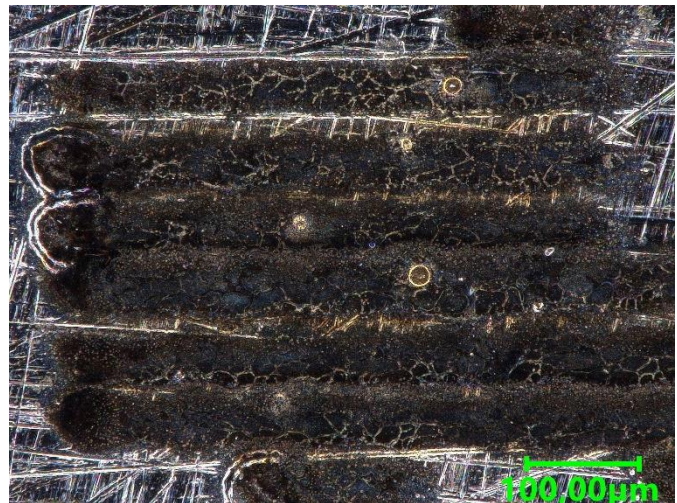
b)

Obrázek 64: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 175 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 200 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,050 \text{ mm}$.

Na obrázku 65 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 200 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_s = 3,4 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy je rovna $h_v = (3,2 \pm 0,1) \text{ } \mu\text{m}$. Kontrast kódu je dobrý, viz obrázek 65a, ale již se objevují mezery mezi jednotlivými řádky. Kód je stále bez problémů čitelný. Vrstva je homogenní bez prasklin. Občas se vyskytují díry ve vrstvě, viz obrázek 65b.



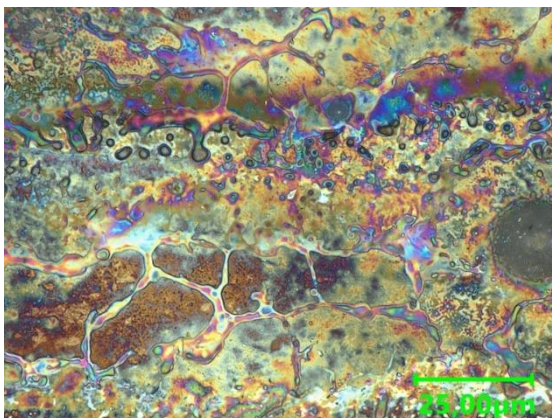
a)



b)

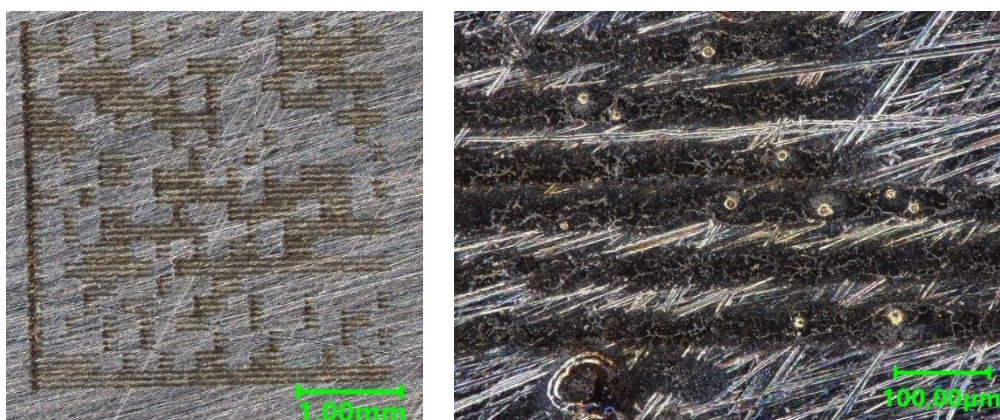
Obrázek 65: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 200 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$.

Na obrázku 65b jsou struktury připomínající praskliny. O praskliny se ale nejedná. Jsou to pouze různé fáze materiálu vrstvy, jak je ukázáno na obrázku 66.



Obrázek 66: Detail struktury vrstvy kódu vyznačeného parametry $v = 200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,
 $f = 200 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$.

Na obrázku 67 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 225 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 200 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,025 \text{ mm}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_s = 1,6 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy je rovna $h_v = (1,6 \pm 0,3) \mu\text{m}$. Kontrast kódu je menší, barva přechází do odstínů hnědé, viz obrázek 67a. Jednotlivé řádky oddělují mezery bez vyznačené vrstvy. Kód je stále čitelný, ale čas pro načítání kódu čtečkou může být delší. Vrstva je homogenní bez prasklin. Občas se ve vrstvě vyskytují díry, viz obrázek 67b. Detailně jsou vidět mezery mezi jednotlivými řádky. Objevuje se také kolísání výkonu při začátku značení. Na začátku řádku je vidět natavená stopa pulzu.



a)

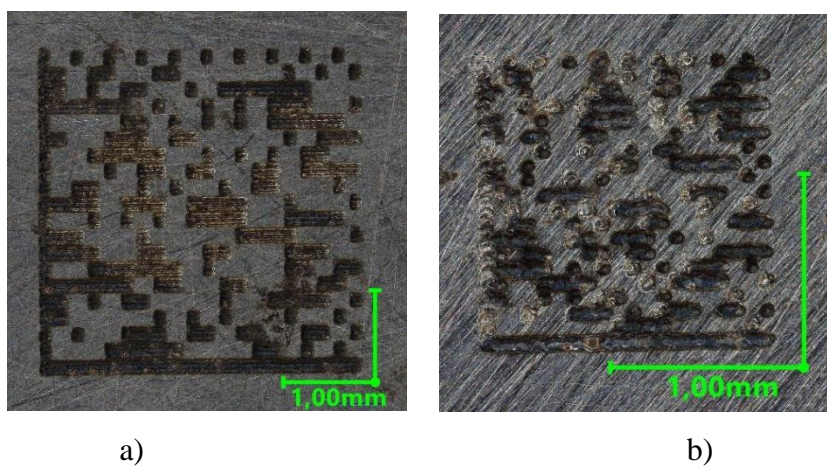
b)

Obrázek 67: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 220 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 200 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,025 \text{ mm}$.

4.2.1 Zmenšení velikosti buňky kódu pro pracovní vzdálenost 319 mm

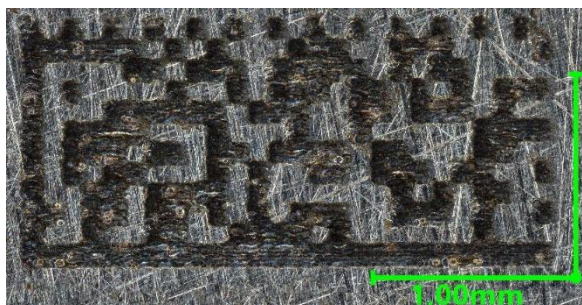
Z předchozích výsledků byly vybrány ideální hodnoty značení $v = 175 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 200 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,050 \text{ mm}$. Hodnota vstupu tepla je $E_S = 1,4 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$. Těmito parametry byly značeny všechny vzorky, které jsou prezentovány v této kapitole. Rozměry kódů se liší.

Na obrázku 68 jsou ukázány 2 kódy o 2 různých velikostech buněk a rozměrech 20x20 buněk. Na obrázku 68a je ukázán kód s velikostí buňky $s_c = 0,200 \text{ mm}$. Buňky mají tvar čtverců a jsou dobře rozeznatelné. Na obrázku 68b je ukázán kód s velikostí buňky $s_c = 0,100 \text{ mm}$. Jednotlivé buňky jsou kruhového, nebo oválného tvaru. Kód je již nečitelný. Další zmenšení je nemožné.



Obrázek 68: Ukázka kódu s velikostí buňky a) $s_c = 0,200 \text{ mm}$, b) $s_c = 0,100 \text{ mm}$.

Na obrázku 69 je ukázán kód s velikostí buňky $s_c = 0,125 \text{ mm}$. Buňky stále jsou dobře definovatelné čtverce. Okraje buněk jsou lehce zaoblené. Kód je stále dobře čitelný.



Obrázek 69: Ukázka kódu s velikostí buňky $s_c = 0,125 \text{ mm}$.

4.3 Možnosti značení na ložiska s různými rozměrem čel

Nejmenší možný rozměr buňky, který je možné načíst, je $s_c = 0,125$ mm. Rozměry kódu s minimálním obsahem dat jsou poté 2,25 mm x 2,25 mm pro kód 18x18 buněk (dále čtverec) a 1,5 mm x 4,5 mm pro kód 12x36 buněk (dále obdélník). Rychlost značení kódu na ložisko se pohybuje do 3 s, podle velikosti kódu, $v = 175 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 200 \text{ kHz}$ a $l_{\text{off}} = 0,050$ mm. Možnosti vyznačení kódu s minimálním obsahem dat jsou uvedeny v tabulce 9, kde $s_{c_č}$ je velikost buňky čtverce a s_{c_o} je velikost buňky obdélníku.

Tabulka 9: Možnost značení čtvercového a obdélníkového kódu na různá ložiska

Šířka čela [mm]	Reprezentační typ	$s_{c_č}$ [mm]	Čtení [%]	s_{c_o} [mm]	Čtení [%]
<2	RA-606-327	-	-	-	-
2-3	UF-607-522	-	-	-	-
3-4	UF-606-309	0,125	65	0,175	75
4-5	RA-608-338	0,175	75	0,250	95
5<	AJ-607-067	0,200	80	0,300	95

Jak vypadá porovnání značení na jednotlivé průměry ložisek ukazuje obrázek 70. Zleva je ukázáno ložisko s označením UF-607-522 s šířkou čela 1,9 mm, ložisko s označením UF-606-309 s šířkou čela 3,0 mm, ložisko s označením RA-608-338 s šířkou čela 4,4 mm a ložisko s označením AJ-607-067 s šířkou čela 6,0 mm.

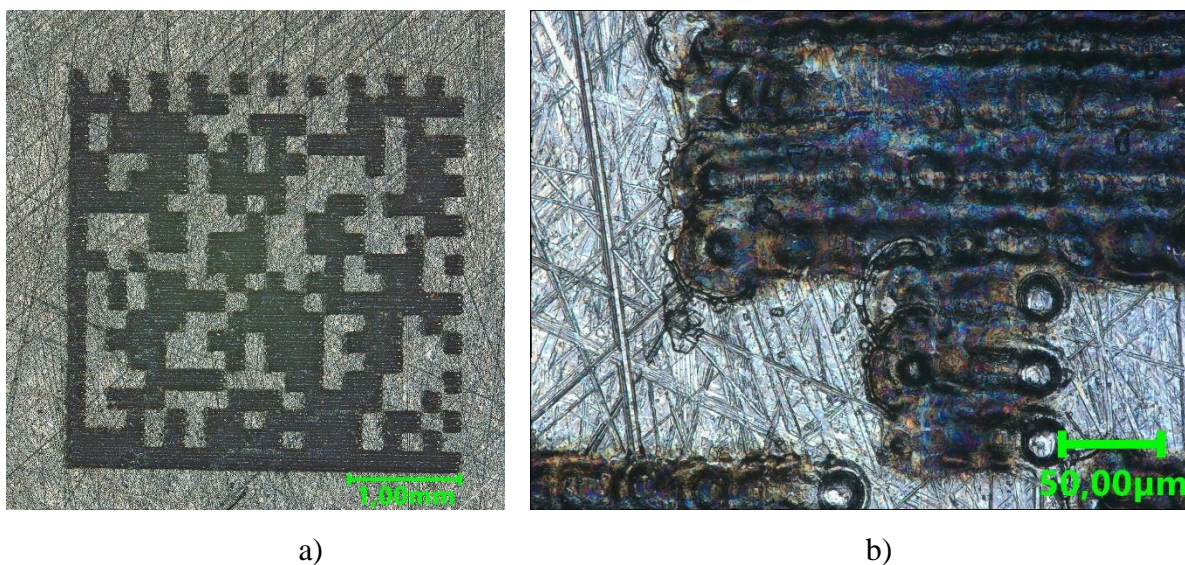


Obrázek 70: Ukázka ložisek s různými rozměry od firmy KOYO Bearings.

4.4 Optimalizace značení oceli na neupravený povrch z výroby

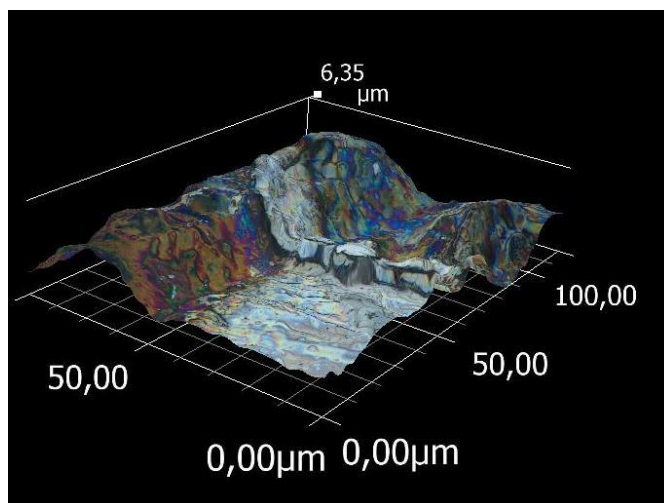
V této kapitole jsou ukázány výsledky značení v pracovní vzdálenosti 319 mm na ocel s povrchem z výroby. V textu jsou prezentovány výsledky optimalizace rychlosti značení, frekvence pulzů, odstupe řádku a výkonu. Bylo značeno na ložisko s šířkou čela 6,00 mm. Všechny kódy měly velikost buňky kódu rovnu $s_c = 0,2$ mm.

Na obrázku 71 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použití parametrech $v = 175 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 100 \text{ kHz}$, $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$ a výkonu $P = 20 \text{ W}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_s = 3,9 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy je rovna $h_v = (4,5 \pm 0,4) \mu\text{m}$. Kontrast kódu je výborný, viz obrázek 71a. Buňky jsou dobře viditelné. Vrstva je velice vysoká a drsná. Jsou vidět natavené stopy jednotlivých pulzů, zvlnění vrstvy i stopy počátečních pulzů, viz obrázek 71b.



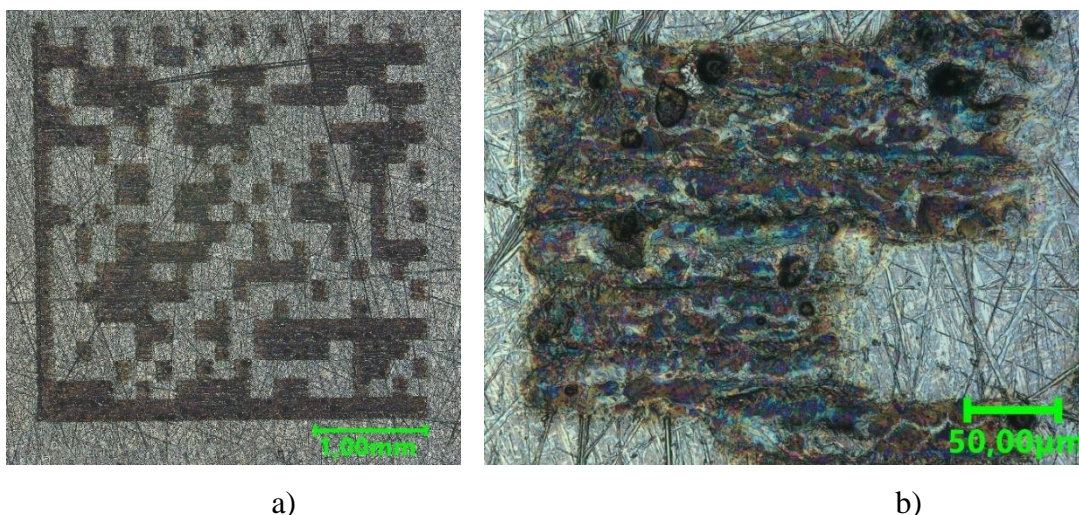
Obrázek 71: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 175 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 100 \text{ kHz}$, $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$ a $P = 20 \text{ W}$.

Na obrázku 72 je detailně ukázáno zvlnění vrstvy. V některých místech mají vlny větší výšku než je výška vrstvy. Vrstva je zde bez prasklin.



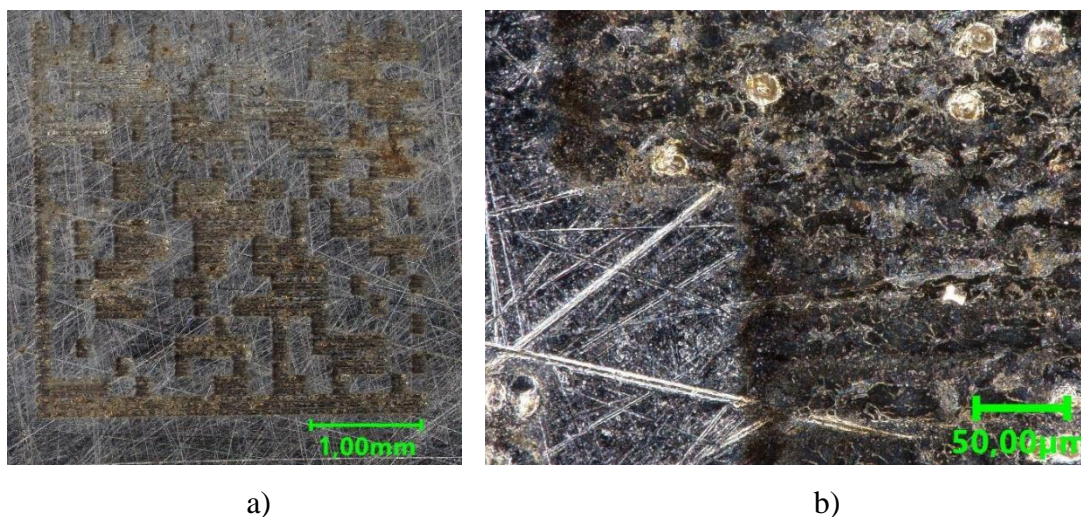
Obrázek 72: Detail struktury vrstvy kódu vyznačeného parametry $v = 150 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 100 \text{ kHz}$, $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$ a $P = 20 \text{ W}$.

Na obrázku 73 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použití parametrech $v = 250 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 140 \text{ kHz}$, $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$ a výkonu $P = 20 \text{ W}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_s = 2,8 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy je rovna $h_v = (2,8 \pm 0,2) \text{ }\mu\text{m}$. Kontrast kódu je stále dobrý, viz obrázek 73a. Vrstva má hnědou barvu, nicméně čtení je bez problémů. Ve vrstvě se místy objevují díry a je stále vidět zvlnění, viz obrázek 73b.



Obrázek 73: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 250 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $f = 140 \text{ kHz}$, $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$ a $P = 20 \text{ W}$.

Na obrázku 74 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 130 \text{ kHz}$, $l_{\text{off}} = 0,025 \text{ mm}$ a výkonu $P = 20 \text{ W}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_S = 1,5 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy je rovna $h_v = (1,8 \pm 0,4) \mu\text{m}$. Kontrast kódu je horší, viz obrázek 74a. Buňky jsou stále viditelné, ale načítání kódu čtečkou je problematické. Vrstva má hnědou až žlutou barvu. Ve vrstvě se místy objevují díry, viz obrázek 74b.



Obrázek 74: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 250 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 130 \text{ kHz}$, $l_{\text{off}} = 0,025 \text{ mm}$ a $P = 20 \text{ W}$.

Na obrázku 75 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 225 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 140 \text{ kHz}$, $l_{\text{off}} = 0,025 \text{ mm}$ a výkonu $P = 20 \text{ W}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_S = 1,6 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy je rovna $h_v = (1,9 \pm 0,2) \mu\text{m}$. Kontrast kódu je velice dobrý. Na spodním okraji má kód menší kontrast, viz obrázek 75a. Načítání kódu přesto není problém. Vrstva je homogenní s občasným výskytem děr, viz obrázek 75b.

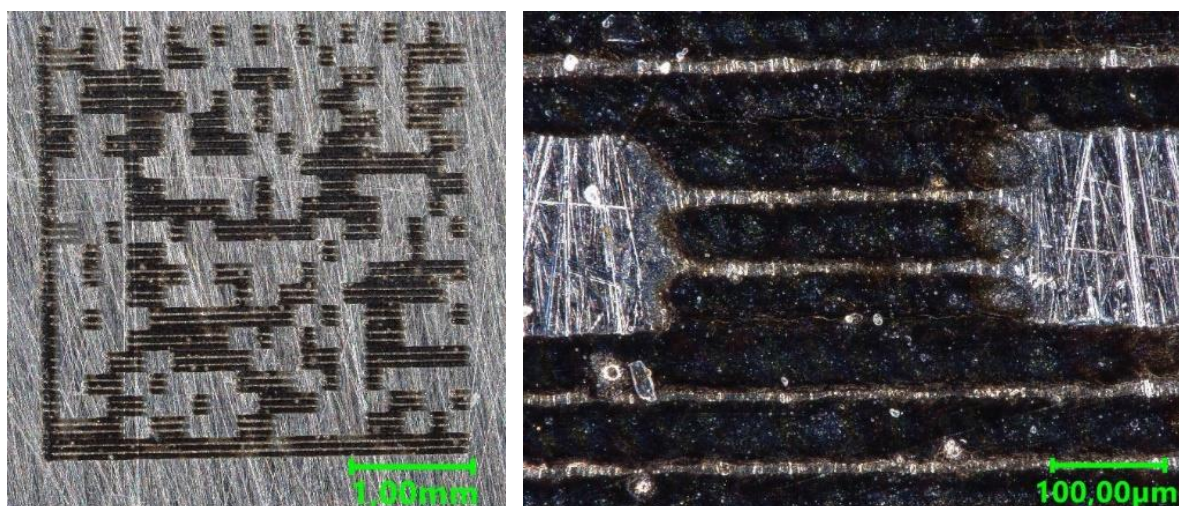


a)

b)

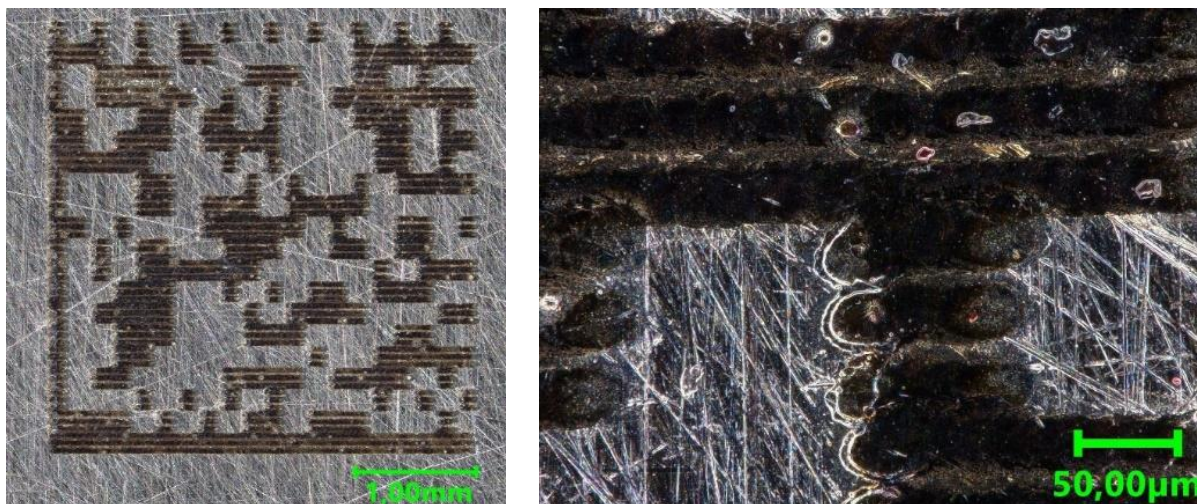
Obrázek 75: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 225 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 140 \text{ kHz}$, $l_{\text{off}} = 0,025 \text{ mm}$ a $P = 20 \text{ W}$.

Na obrázku 76 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 90 \text{ kHz}$, $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$ a výkonu $P = 12 \text{ W}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_S = 4,1 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy je rovna $h_v = (2,7 \pm 0,3) \mu\text{m}$. Kontrast kódu je výborný, viz obrázek 76a. Čtení kódu je bezproblémové. Vrstva je v řádcích homogenní s občasným výskytem děr, je ale vidět malé oddělení jednotlivých řádků, viz obrázek 76b. Na čtení kódu to však nemá vliv.



Obrázek 76: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 90 \text{ kHz}$, $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$ a $P = 12 \text{ W}$.

Na obrázku 77 je ukázán data matrix kód vyznačený na ocel 1.3505 při použitých parametrech $v = 110 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 100 \text{ kHz}$, $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$ a výkonu $P = 12 \text{ W}$. Hodnota vstupu tepla je rovna $E_S = 4,4 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy je rovna $h_v = (3,3 \pm 0,4) \mu\text{m}$. Kontrast kódu je výborný, viz obrázek 77a. Čtení kódu je bezproblémové. Vrstva je v řádcích homogenní s občasným výskytem děr. Na začátku buněk a řádků jsou vidět stopy jednotlivých pulzů. Řádky již nejsou odděleny, jen vrstva na přechodu řádků je světlejší, viz obrázek 77b.



Obrázek 77: a) Ukázka celého kódu a b) detail oxidové vrstvy vyznačené na oceli 1.3505 s parametry značení $v = 110 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $f = 100 \text{ kHz}$, $l_{\text{off}} = 0,000 \text{ mm}$ a $P = 14 \text{ W}$.

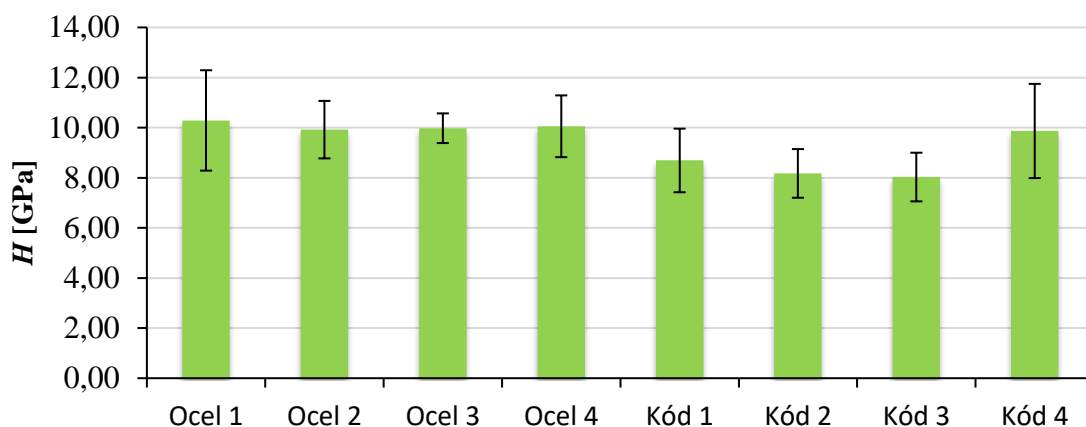
4.5 Výsledky měření tvrdosti, modulu elasticity a korozní odolnosti

Výsledky měření tvrdosti a modulu elasticity byly provedeny na čtyřech kódech a čtyřech místech oceli pro porovnání vlastností. Kódy, na kterých bylo měřeno, jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10: Kódy s parametry značení, na kterých byla měřena tvrdost a modul elasticity.

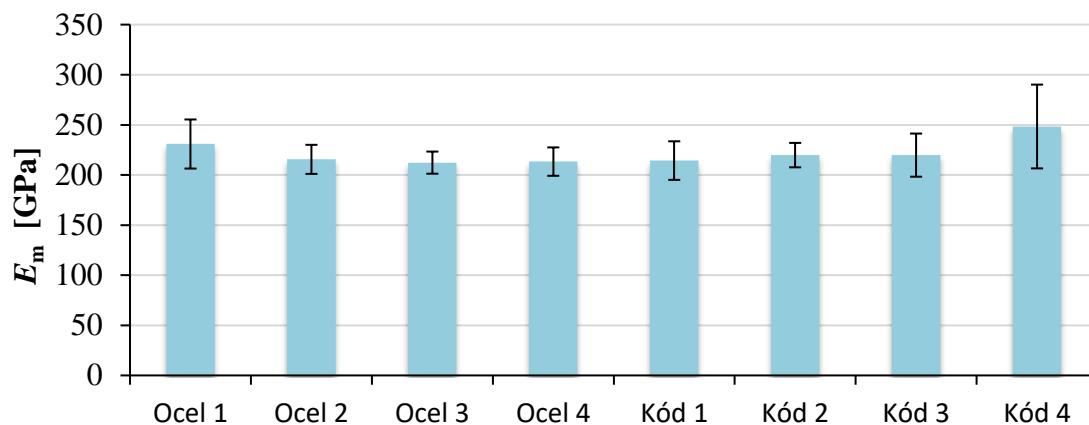
Vzorek	P [W]	s_{ci} [mm]	v_i [mm·s ⁻¹]	f [kHz]	l_{off} [mm]	E_s [J·mm ⁻²]	h_v [μm]	δh_v [μm]
kód 1	20	0,3	100	40	0,005	4,0	1,4	0,1
kód 2	14	0,2	110	100	0,000	4,4	3,3	0,4
kód 3	20	0,2	250	140	0,000	2,8	2,8	0,2
kód 4	20	0,2	175	100	0,000	3,9	4,5	0,4

Na obrázku 78 je ukázán graf výsledků měření tvrdosti. Je vidět, že hodnoty tvrdosti oceli jsou na jednotlivých vzorcích shodné. Nejvíce se hodnotě tvrdosti oceli blíží kód 4. Ostatní kódy mají tvrdost o 1 GPa až 2 GPa menší. Je také vidět, že u vzorku oceli 1 a kódu 4 je větší nejistota měření. To je pravděpodobně z důvodu vyšší drsnosti povrchu. Povrch oceli 1 byl broušen brusným papírem a vrstva kódu 4 je silně zvlňena, viz obrázek 72.



Obrázek 78: Graf výsledků měření tvrdosti oceli 1.3505 a vyznačené oxidové vrstvy.

Na obrázku 79 je ukázán graf s výsledky měření modulu elasticity. Výsledky měření modulu elasticity oceli vychází téměř shodně s tabulkovou hodnotou oceli 1.3505. Rozdíl hodnot je v rámci odchylky měření. Liší se pouze výsledek vzorku oceli 1, jehož povrch byl broušen. Hodnoty modulu elasticity oxidových vrstev kódu se přibližují hodnotě oceli s klesající hodnotou výšky oxidové vrstvy. Opět je vidět vliv drsnosti povrchu na nejistotu měření.



Obrázek 79: Graf výsledků měření modulu elasticity oceli 1.3505 a oxidové vrstvy.

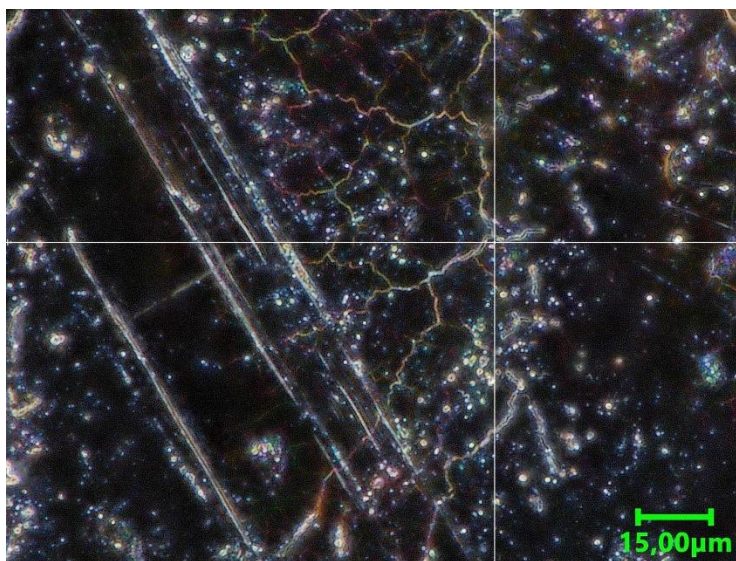
Korozní odolnost kódů byla v porovnání s volným povrchem ložiska téměř totožná. Za normálních klimatických podmínek (pokojová teplota i vlhkost) dochází ke korodování povrchu ložisek po několika měsících. Ve většině případů dochází ke korozi volného povrchu, a až poté ke korozi plochy kódu. Příklad korodovaného kódu viz obrázek 80. I přes silnou korozi povrchu je vidět, že vyznačená vrstva je stále zachována a lze ji od koroze odlišit.



Obrázek 80: Ukázka korodovaného povrchu ložiska.

5 Diskuze

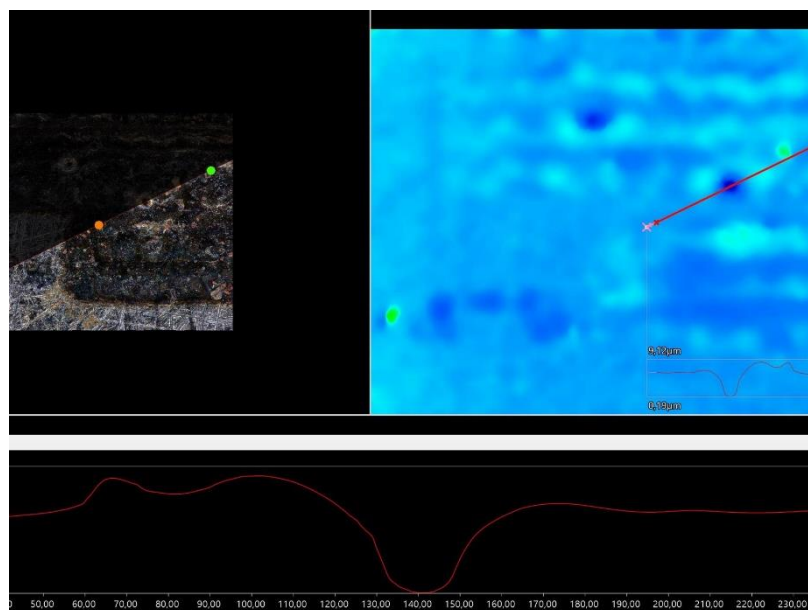
Značení laserem ovlivňuje mnoho parametrů. Nejzásadnější parametry jsou vstup tepla a frekvence pulzů. Pro kvalitní značení je zásadní kvalita vrstvy. Výraznou roli hraje výška vrstvy a také tvar jejího povrchu a jeho homogenita. Problémem je výskyt děr ve vrstvě a především praskliny. Při špatném nastavení, kdy vstup tepla má hodnotu $E_S = 5,0 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-2}$ a větší a frekvence je nízká (pro průměr svazku $50 \text{ } \mu\text{m}$ 20 kHz a méně), dochází k výraznému praskání vrstvy, ukázka viz obrázek 81.



Obrázek 81: Ukázka výrazných prasklin při špatném nastavení značení.

Ke snížení výskytu prasklin dochází se snížením vstupu tepla. Velký vliv má frekvence. I při stejném vstupu tepla, může zvýšení frekvence snížit výskyt prasklin, nebo dokonce mohou praskliny úplně vymizet. Důvodem může být rovnoměrnější ovlivnění povrchu. Při zvýšení frekvence dochází ke snížení energie v pulzu a také ke snížení vrcholového výkonu. Energie pro vznik vrstvy je díky tomu dodávána postupně a čas na vytvoření vrstvy může být delší, díky čemuž dochází k její homogenizaci.

Pro tvar povrchu vrstvy je největším problémem výskyt děr. Hloubka díry může být i o několik mikrometrů větší, než je výška vrstvy. Na obrázku 82 je ukázán profil díry měřené na vrstvě výšky $(3,3 \pm 0,7) \text{ } \mu\text{m}$. Hloubka díry je $8,3 \text{ } \mu\text{m}$.



Obrázek 82: Profilové měření díry na vrstvě vysoké ($3,3 \pm 0,7$) μm .

Pozice a množství děr vypadá dle výsledků náhodně. Nejpravděpodobnější je, že výskyt děr je způsoben kolísáním výkonu laseru. Materiál uvnitř díry by mohl být při příliš vysokém výkonu odpařen a jeho zbytek nahromaděn okolo vytvořené díry.

Dalším problémem, se kterým se lze během značení setkat, je různý kontrast kódu, případně jeho částečné nevyznačení. Náznak tohoto problému lze vidět na obrázku 75. Pravděpodobně je to způsobeno nečistotami na povrchu ložiska. Ložiska pro značení jdou z výroby zamaštěná olejem. Pokud se olej z povrchu nesetře, může pohltit část energie svazku, viz obrázek 83.



Obrázek 83: Ukázka problému značení na neočištěné ložisko.

Výsledky tvrdosti ukazují vliv oxidové vrstvy na mechanické vlastnosti povrchu. Výška vrstvy ovlivňuje především modul elasticity. Vzorek s výrazně vyšší oxidovou vrstvou má modul pružnosti o několik desítek GPa vyšší než ocel (obrázek 79). Tvrdost má ale téměř stejnou hodnotu jako ocel (obrázek 78). U vzorků s nižší oxidovou vrstvou nedochází ke změně modulu pružnosti oproti oceli, ale snižuje se o jednotky GPa jejich tvrdost. Je možné, že kvůli tomu, že vyšší vrstva vznikala za vyšší teploty, mohlo dojít i k dalším změnám v oceli pod vrstvou a vzniku tvrdších forem složek oceli. Navíc je i z obrázku 81 vidět, že při špatném nastavení, kdy je pro vznik vrstvy dodáno větší množství energie, je vrstva křehčí a vznikají praskliny. To může indikovat vyšší tvrdost vrstvy.

Korozní odolnost vyznačeného kódu je dobrá ve srovnání s volným povrchem oceli. Je to pravděpodobně díky tomu, že oxidová vrstva chrání povrch před vlhkostí, která je nutná pro vznik koroze.

Závěr

Předložená práce popisuje metody a technologie laserového značení. Věnuje se problematice značení žiháním a ukazuje výsledky optimalizace procesu značení s důrazem na korozní odolnost. Dále popisuje experiment značení laserovým žiháním 2D data matrix kódů na ložiska z oceli s označením 1.3505 (5210, 100Cr6) firmy KOYO Bearings pulzním vláknovým laserem Electrox Scorpion G2, popisuje 2D data matrix kód, jeho vlastnosti a možnosti čtení a ukazuje výsledky značení.

Experiment ukazuje vliv parametrů laseru na kvalitu značení a možnosti zmenšení buňky data matrix kódu pro značení na různé rozměry čela ložisek. Cílem experimentu byla optimalizace parametrů laseru s důrazem na čtení kódu a korozní odolnost vyznačené vrstvy. Optimalizace parametrů byla zaměřena na rychlost značení, frekvenci pulzů, odstup řádků a výkon laseru pro pracovní vzdálenost 323 mm a 319 mm. Pro výhodnější popis parametrů značení byl použit vstup tepla, který byl vypočítán pomocí rovnice (11). Značeno bylo na povrch ložiska broušený brusným papírem a na neupravený povrch z výroby.

Všechny výsledky byly zkoumány na mikroskopu KEYENCE VHX 7100. Na tomto mikroskopu byla u vybraných vzorků měřena výška oxidové vrstvy. Výsledky měření byly ověřeny na mikroskopu LEXT OLS 5000. Dále byla na vybraných vzorcích měřena tvrdost a modul elasticity na nanointendačním přístroji NanoTest NTX. Korozní odolnost byla pozorována během přechovávání ložisek za normálních podmínek po dobu trvání experimentu.

První část experimentu se věnovala značení žiháním v pracovní vzdálenosti 323 mm na broušený povrch ložiska. Byla optimalizována rychlost značení, frekvence pulzů a odstup řádku pro výkon 20 W. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při použití rychlosti značení $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, frekvence pulzů $f = 40 \text{ kHz}$, odstup řádku $l_{\text{off}} = 0,050 \text{ mm}$ a vstupu tepla $E_s = 2,0 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy byla rovna $h_v = (1,4 \pm 0,1) \mu\text{m}$. Dále byla zkoumána možnost zmenšení buňky data matrix kódu. Dostatečně kvalitního kódu bylo dosaženo při zmenšení buňky na rozměr 0,250 mm. Důležitým zjištěním bylo, že při použití příliš vysokého vstupu tepla a nízké frekvence pulzů dochází ve vyznačené vrstvě k tvorbě prasklin. Dále také, že pracovní vzdálenost neumožňuje dosáhnout menší buňky kódu než 0,250 mm. Při pokusu o menší rozměry již není kód dostatečně kvalitní pro načítání čtečkou.

Druhá část experimentu se věnovala značení žiháním v pracovní vzdálenosti 319 mm na broušený povrch ložiska. Byla optimalizována rychlost značení, frekvence pulzů a odstup řádku pro výkon 20 W. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při použití rychlosti značení $v = 175 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, frekvence pulzů $f = 200 \text{ kHz}$, odstup řádku $l_{\text{off}} = 0,050 \text{ mm}$ a vstupu tepla $E_s = 1,4 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy byla rovna $h_v = (1,2 \pm 0,1) \text{ }\mu\text{m}$. Dále byla zkoumána možnost zmenšení buňky data matrix kódu. Dostatečně kvalitního kódu bylo dosaženo při zmenšení buňky na rozměr 0,125 mm. Důležitým zjištěním bylo, že při vyšším vstupu tepla dochází k vytváření stop po pulzech na začátcích řádků a buněk a dochází ke zvlnění povrchu oxidové vrstvy. Dále také pracovní vzdálenost neumožňuje dosáhnout menší buňky kódu než 0,125 mm. Při pokusu o menší rozměry již není kód dostatečně kvalitní pro načítání čtečkou.

Ve třetí části bylo ukázáno, na jakou šířku čela ložisek je možné značit při zachování dostatečného množství informací a standardů značení firmy KOYO Bearings. Nejmenší ložisko, na které je možné značit, má šířku čela 3 mm.

Čtvrtá část experimentu se věnovala značení žiháním v pracovní vzdálenosti 319 mm na neopracovaný povrch ložiska z výroby. Byla optimalizována rychlost značení, frekvence pulzů a odstup řádků pro výkon 20 W, 14 W a 12 W. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při použití rychlosti značení $v = 225 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, frekvence pulzů $f = 140 \text{ kHz}$, odstup řádku $l_{\text{off}} = 0,025 \text{ mm}$, výkonu 20 W a vstupu tepla $E_s = 1,6 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. Výška vrstvy byla rovna $h_v = (1,9 \pm 0,2) \text{ }\mu\text{m}$. Důležitým zjištěním bylo, že pro kvalitní výsledek není nutné snižovat výkon laseru. Snížení výkonu by znamenalo snížení rychlosti značení a zpomalení výroby.

Poslední část prezentuje výsledky měření tvrdosti, modulu tvrdosti a je ukázána korozní odolnost. Výsledky měření modulu elasticity se pro ocel nelišily od tabulkových hodnot. Vytvořená vrstva ovlivňuje vlastnosti materiálu v závislosti na výšce vrstvy. Výsledky vzorků s vyšší oxidovou vrstvou vykazují podobnou tvrdost jako ocel a vyšší modul elasticity než ocel. U vzorků s nižší oxidovou vrstvou dochází ke snížení tvrdosti, ale modul elasticity je téměř stejný jako u oceli. Korozní odolnost vrstvy je totožná s odolností volného povrchu oceli.

Výsledky experimentu budou dále využity v praxi při značení ložisek 2D kódem.

Seznam použitých pramenů

- [1] Ionix, *Laser marking* [online].
Dostupné z <http://www.ionix.fi/en/technologies/laser-processing/laser-marking/>
- [2] ION, J.C. *Processing of Engineering Materials: Principles, procedure and industrial application*. 1. Oxford: Elsevier, 2005. ISBN 0 7506 6079 1.
- [3] LAZOV, L., DENEVA H., NARICA P., *Laser Marking Methods* [online].
Environment Technology Resources, Rezekne, Latvia Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. Volume I, 108-115 [online].
Dostupné z https://www.researchgate.net/profile/Hristina_Deneva3/publication/281192318_Laser_Marking_Methods/links/59d52cd5a6fdcc874695610c/Laser-Marking-Methods.pdf?origin=publication_detail
- [4] STEEN, W. M., J MAZUMDER. *Laser Material Processing*.
4. London: Springer, 2010. ISBN 978-1-84996-061-8.
- [5] WISH, *Laser DIY engraver* [online].
Dostupné z https://canary.contesting.wish.com/api/webimage/5e578ddabc53b4540dbe9175-large.jpg?cache_buster=b154521d06555f92d6c1d0c485a44b85
- [6] RONAR-SMITH, *F-Theta Scan Lenses* [online].
Dostupné z <https://wavelength-oe.com/wp-content/uploads/F-Theta-Scan-Lens-Technical-Note.pdf>
- [7] CHEN G. *Design of Large Working Area F-Theta Lens* [online].
Dostupné z <https://www.optics.arizona.edu/sites/optics.arizona.edu/files/msreport-gong-chen.pdf>
- [8] SPECIAL OPTICS, *Scanning Lens Theory* [online].
Dostupné z http://www.insight-scientific.com/special/2-wp_scanning_lens_theory.pdf
- [9] FUTONICS, *Futonics F-Theta lenses* [online].
Dostupné z https://www.futonics.de/wp-content/uploads/2020/03/13032020_-Flyer_F-Theta-Objektive_1.pdf

- [10] YUREVICH V. I. a spol. *Optical design and performance of F-Theta lenses for high-power and high-precision application* [online].
Dostupné z https://www.researchgate.net/profile/Vladimir-Yurevich/publication/282653504_Optical_design_and_performance_of_F-Theta_lenses_for_high-power_and_high-precision_applications/links/5616262c08ae4ce3cc6592d2/Optical-design-and-performance-of-F-Theta-lenses-for-high-power-and-high-precision-applications.pdf
- [11] KEYENCE, *Tříosý vláknový popisovací laser: Řada MD-F* [online].
Dostupné z https://axlimperial.com/wp-content/uploads/2018/05/AS_95340_MD-F_C_611G90_US_1038-1.pdf
- [12] J. F.READY, *LIA Handbook of Laser Materials Processing*
Laser Institute of America, 2001. ISBN 0-912035-15-3
- [13] DATALOGIC, *Reference Guide Laser Marking Systém* [online].
Dostupné z <https://www.slideshare.net/Gzuisz/rg-laser-markingena4>
- [14] TYKMA ELECTROX, *What Are the Differences Between Laser Marking, Laser Engraving and Laser Etching* [online].
Dostupné z <https://www.permanentmarking.com/what-are-the-differences-between-laser-marking-laser-engraving-and-laser-etching/>
- [15] LASERAX, *Laser Etching & Laser Engraving: Which One Should You Choose?* [online].
Dostupné z <https://www.laserax.com/blog/laser-etching-engraving>
- [16] ALL3DP, *Laser Etching Metal: What to Know to Get Started* [online].
Dostupné z <https://all3dp.com/2/laser-etching-metal-what-to-know-to-get-started/>
- [17] TYKMA ELECTROX, *Laser Marking Paint Applications* [online].
Dostupné z <https://www.permanentmarking.com/laser-marking-paint-applications/>
- [18] TRUMPF, *Laser marking plastic* [online].
Dostupné z https://www.trumpf.com/en_SG/solutions/applications/laser-marking/laser-marking-plastic/
- [19] BELASER, *Lasermarking of plastics/laser foaming* [online].
Dostupné z <https://www.belaser.de/en/laser-marking/laser-marking-of-plastics-laserdecoration.html>
- [20] FOBA, *Technologies for Laser Marking* [online].
Dostupné z <https://www.fobalaser.com/applications/processes/laser-marking/>

- [21] FRACTORZ, *Laser Marking – Methods, Materials and Applications* [online].
Dostupné z <https://fractory.com/laser-marking-methods-materials-applications/>
- [22] ALL3DP, *Glass Laser Engraving & Etching* [online].
Dostupné z <https://all3dp.com/2/glass-laser-engraving-etching-all-you-need-to-know/>
- [23] LASERENGRAVINGTIPS, *Laser Engraving Anodized Aluminum* [online].
Dostupné z <https://laserengravingtips.com/laser-engraving-anodized-aluminum/>
- [24] TROTEC, *Black marking on anodized aluminum* [online].
Dostupné z <https://www.troteclaser.com/en-us/knowledge/tips-for-laser-users/black-marking-anodized-aluminum/>
- [25] TRUMPF, *Laser marking – Annealing* [online].
Dostupné z https://www.trumpf.com/en_US/solutions/applications/laser-marking/annealing-laser-marking-procedure/
- [26] LASERAX, *How Does Laser Annealing Work?* [online].
Dostupné z <https://www.laserax.com/blog/how-does-laser-annealing-work>
- [27] M. ŠVANTNER A SPOL., *Thermal effects of laser marking on microstructure and corrosion properties of stainless steel* [online].
Dostupné z <https://www.osapublishing.org/ao/viewmedia.cfm?uri=ao-55-34-D35&seq=0&html=true>
- [28] K. M. ŁĘCKA A SPOL., *Effects of laser-induced oxidation on the corrosion resistance of AISI 304 stainless steel* [online].
Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/302055439_Effects_of_laser-induced_oxidation_on_the_corrosion_resistance_of_AISI_304_stainless_steel
- [29] B. SZUBZDA A SPOL., *Corrosion resistance of the AISI 304, 316 and 321 stainless steel surfaces modified by laser* [online].
Dostupné z <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/113/1/012017/pdf>
- [30] *Electrox*, *Electrox Scorpion G2, Montážní a uživatelská příručka*
- [31] *Electrox*, *Scorpion rapide* [online].
Dostupné s <https://www.permanentmarking.com/wp-content/uploads/Scorpion-Rapide-Data-Sheet-Nov-2014.pdf>

- [32] Keyence, Digitální mikroskop, Řada VHX-7100 [online].
Dostupné z <https://download.keyence.com/contents/?dlc=n8FdK7xdhG1bs9InnhoQgPtglJitGh28>
- [33] Olympus, Co je to digitální mikroskop? [online].
Dostupné z <https://www.olympus-ims.com/cs/insight/what-is-a-digital-microscope/>
- [34] Keyence, Digital Microscopes [online].
Dostupné z <https://www.keyence.com/products/microscope/digital-microscope/>
- [35] OLYMPUS, *LEXT OLS5000 3D Measuring Laser Microscope* [online].
Dostupné z <https://pdf.directindustry.com/pdf/olympus/lext-ols5000/17434-784861.html>
- [36] ŘEHOUN J., HAMÁČEK A., *Mikroskop LEXT a jeho využití v materiálových vědách* [online]. Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/277228711_Mikroskop_LEXT_a_jeho_vyuziti_v_materialovych_vedach
- [37] OLYMPUS, *Launch of the LEXT OLS5000 3D Measuring Laser Microscope* [online]. Dostupné z <https://www.olympus-global.com/news/2017/nr00633.html>
- [38] RCPTM, *Nanoindentation and scratch test* [online].
Dostupné z https://www.rcptm.com/wp-content/uploads/2015/12/vp4_Katalog_RCPTM_nanotest_en.pdf
- [39] MICROMATERIALS, *Nanotest Vantage Datasheet* [online].
Dostupné z <https://www.micromaterials.co.uk/wp-content/uploads/2019/02/NanoTest-Vantage-Datasheet.pdf>
- [40] SIJ GROUP, *Siquel 3505 Steel* [online].
Dostupné z <https://steelselector.sij.si/steels/OCR4ES.html>
- [41] PRVKY, *Železo* [online].
Dostupné z <http://www.prvky.com/26.html>
- [42] KANNATEY-ASIBU E., *Principles of Laser Materials Processing*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2009. Wiley series on processing of engineering
- [43] GS1; *DataMatrix Guideline* [online].
Dostupné z https://www.gs1.org/docs/barcodes/GS1_DataMatrix_Guideline.pdf

- [44] WIKIPEDIE, *Data Matrix* [online].
Dostupné z https://en.wikipedia.org/wiki/Data_Matrix
- [45] NATIONAL BAND, *QRcode vs. Data Matrix vs. Linear* [online].
Dostupné z <https://www.nationalband.com/qr-code-vs-data-matrix-vs-barcode/>
- [46] K. MROCZKOWSKA A SPOL. *Effects of laser-induced oxidation on the corrosion resistance of AISI 304 stainless steel* [online].
Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/302055439_Effects_of_laser-induced_oxidation_on_the_corrosion_resistance_of_AISI_304_stainless_steel
- [47] AUTOMATION.COM, *Data Matrix 2D Barcode ISO/IEC 16022 FAQ* [online].
Dostupné z <https://www.barcodefaq.com/2d/data-matrix/>

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	absorpce materiálu
a	rozptyl tepla
C	průměr apertury
c_p	měrné teplo pevného skupenství
d	vzdálenost od optické osy
d_{out}	vnější průměr ložiska
E	energie pulsu
E_m	modul elasticity
E_s	vstup tepla
f_L	ohnisková vzdálenost
F	vliv výkonu
f	frekvence pulzů
F_w	pracovní vzdálenost
h	hloubka ovlivněné vrstvy
H	tvrdost
h_v	výška oxidové vrstvy
k	konstanta
L	diagonální rozměr čtvercové pracovní plochy
l_{off}	odstup řádků
M	faktor kvality svazku
P	průměrný výkon
q	hustota tepelného toku
q_{f_0}	relativní deviace
R	odrazivost
r_b	průměr svazku
S	plocha svazku
s_c	velikost buňky data matrix kódu
T_0	počáteční teploty

T_m	teploty tavení
T_r	teplota stability oxidové vrstvy
T_t	teplota tání
Y	reálná vzdálenost fokusovaného svazku od optické osy
y_{ct}	souřadnice na ose klínu
y_s	korekce souřadnice středu
α	úhel klínu
λ_L	vlnová délka
ρ	hustotu
τ	délka pulzu
D_s	plocha svazku