

Možnosti značení vláknovým laserem

Jakub Zahrádka

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Jakub Zahradka
Osobní číslo:	T22044
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Možnosti značení vláknovým laserem

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární studii na téma laserové značení.
- Navrhněte vhodné grafické podklady.
- Provedte značení při různých podmínkách nastavení.
- Vyhodnotte získané výsledky.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

THYAGARAJAN, K. a GHATAK, A. K. Lasers: fundamentals and applications. Second edition. Graduate texts in physics. New York: Springer, [2010]. ISBN 978-1-4419-6442-7.

TER-MIKIRTYČEV, Valerij Vartanovič. Fundamentals of fiber lasers and fiber amplifiers. Springer series in optical sciences. Cham: Springer, c2014. ISBN 9783319023373.

ION, John C. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. Amsterdam: Boston, 2005. ISBN 9781429478434.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Adam Škrobák, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá využitím vláknového laseru v oblasti značení kovových materiálů. Teoretická část popisuje principy laserové technologie, její historii, druhy laserů a základní poznatky o laserovém značení.

Praktická část je zaměřena na práci s vláknovým laserem typu LFQ20-T a experimentální značení vybraných kovových materiálů.

Klíčová slova: Laser, laserový paprsek, laserové značení

ABSTRACT

This bachelors thesis deals on the use of a fiber laser for marking metallic materials. The theoretical part describes the principles of laser technology, its history, types of lasers, and fundamental knowledge of laser marking. The practical part is focused on working with a fiber laser of the LFQ20-T type and the experimental marking of selected metallic materials.

Keywords: Laser, laser beam, laser marking

Rád bych poděkoval panu Ing. Adamu Škrobákovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi pomohly při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl moc poděkovat své rodině a přátelům za veškerou podporu po dobu mého studia.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 HISTORIE A VÝVOJ LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍ.....	13
2 PRINCIP LASEROVÉHO PAPRSKU	14
3 VLASTNOSTI LASEROVÉHO PAPRSKU	15
3.1 MÓDY – PŘÍČNÉ ROZLOŽENÍ INTENZITY ZÁŘENÍ	17
4 ZÁKLADNÍ ČÁSTI LASEROVÉHO ZAŘÍZENÍ	21
4.1 AKTIVNÍ PROSTŘEDÍ	21
4.2 REZONÁTOR	21
4.3 ZDROJ LASEROVÉHO ZÁŘENÍ	23
4.4 CHLADICÍ SYSTÉM.....	23
5 ROZDĚLENÍ LASERŮ	24
5.1 PODLE AKTIVNÍHO PROSTŘEDÍ.....	24
5.1.1 Plynové lasery	24
5.1.2 Pevnolátkové lasery.....	25
5.1.3 Kapalinové lasery	26
5.1.4 Polovodičové lasery	26
5.2 PODLE SPEKTRÁLNÍ OBLASTI.....	27
5.3 PODLE ZPŮSOBU BUZENÍ.....	28
5.4 PODLE POČTU ENERGETICKÝCH HLADIN.....	29
5.5 PODLE REŽIMU PRÁCE	29
5.6 PODLE POUŽITÍ V PRŮMYSLU	30
5.7 PODLE VÝKONU.....	30
5.8 PODLE TYPU LASEROVÉ HLAVY	30
6 ZÁKLADNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÉ PRO ZNAČENÍ	31
6.1 CO ₂ LASERY	31
6.2 ND:YAG LASERY	32
6.2.1 Druhá harmonická – zelené lasery	33
6.2.2 Třetí harmonická – UV lasery	34
7 VLÁKNOVÉ LASERY.....	35
7.1 PRINCIP ČINNOSTI.....	35
7.2 EFEKTIVITA	36
7.3 VÝHODY.....	37
8 MOŽNOSTI ZNAČENÍ.....	38
8.1 PROCESY LASEROVÉHO ZNAČENÍ.....	38

8.1.1	Gravírování.....	38
8.1.2	Žihání.....	39
8.1.3	Ablace.....	40
8.1.4	Pěnění	41
8.1.5	Karbonizace.....	41
8.1.6	Fotochemický proces.....	42
8.2	STUDIE ZAMĚŘENÉ NA LASEROVÉ ZNAČENÍ NEREZOVÝCH OCELÍ.....	43
II	PRAKTICKÁ ČÁST	44
9	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	45
10	NÁVRH GRAFICKÝCH PODKLADŮ	46
10.1	VYTVOŘENÍ TESTOVACÍ MATICE 100X100 MM	47
10.2	VYTVOŘENÍ TESTOVACÍ MATICE 70X70 MM	49
10.3	VYTVOŘENÍ VZOROVÉHO ČTVERCE	50
11	VLÁKNOVÝ LASER (LFQ20-T).....	51
12	POUŽITÉ MATERIÁLY	53
12.1	NEREZOVÁ OCEL 1.4301.....	53
12.2	NEREZOVÁ OCEL 1.4401.....	54
12.3	NÁSTROJOVÁ OCEL 1.1730.....	55
13	EXPERIMENT	56
13.1	POSTUP PRÁCE S NEREZOVOU OCELÍ (1.4301, 1.4401).....	56
13.2	POSTUP PRÁCE S NÁSTROJOVOU OCELÍ (1.1730).....	58
14	VIZUÁLNÍ A MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA POVRCHOVÉHO ZNAČENÍ.....	59
14.1	BARVA ZNAČENÍ.....	59
14.1.1	Porovnání barevného značení na oceli 1.4301	59
14.1.2	Porovnání barevného značení na oceli 1.4401	60
14.1.3	Porovnání barevného značení na oceli 1.1730	61
14.2	MIKROSKOPICKÁ STRUKTURA ZNAČENÍ.....	62
14.2.1	Analýza struktury značení na oceli 1.4301.....	62
14.2.2	Analýza struktury značení na oceli 1.4401 a srovnání s ocelí 1.4301.....	64
14.2.3	Analýza struktury značení na oceli 1.1730 a srovnání s plechy.....	66
15	MĚŘENÍ HLOUBKY	70
	ZÁVĚR.....	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ	78
	SEZNAM TABULEK.....	80
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	81

ÚVOD

Laserová technologie patří mezi klíčové nástroje moderní průmyslové výroby. Od svého vzniku se lasery staly nepostradatelným prvkem v mnoha oblastech díky schopnosti přesného, bezkontaktního a rychlého zpracování materiálů.

Teoretická část této práce se zabývá principy fungování laseru, jeho historickým vývojem a vlastnostmi laserového paprsku. Dále popisuje konstrukci laserových zařízení a rozdělení laserů podle různých hledisek. Zvláštní pozornost je věnována vláknovým laserům.

V praktické části bylo provedeno značení pomocí vláknového laseru LFQ20-T na vybrané ocelové materiály. Popisuje tvorbu grafických podkladů, přípravu vzorků a postup při nastavování technologických parametrů. Dále se věnuje samotnému procesu značení a následné analýze vizuálních a mikroskopických výsledků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 HISTORIE A VÝVOJ LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍ

Pojem laser je zkratka z anglického výrazu "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", což v překladu znamená zesílení světla pomocí stimulované emise záření. [1]

Počátky vývoje laseru jsou lehce spjaty s kvantovou teorií, kterou na přelomu 19. a 20. století formuloval německý fyzik Max Planck. Ten předpokládal, že světlo je tvořeno malými „kousky“ energie – kvanty. Tato teorie byla později potvrzena dánským fyzikem Nielsem Bohrem a dále rozvinuta Albertem Einsteinem. Právě Einstein v roce 1916 teoreticky popsal jev stimulované emise, tedy cíleně vyvolané záření světelných kvant z atomu. Tento princip se stal základním kamenem pro vznik laseru. [2]

Einstein svou teorii aplikoval při vysvětlení fotoelektrického jevu, za což mu byla v roce 1921 udělena Nobelova cena za fyziku. Jeho hypotézy se postupně potvrzovaly a staly se pevnou součástí kvantové fyziky. V roce 1917 publikoval článek, ve kterém teoreticky popsal možnost stimulované emise, čímž nepřímo položil základy pro vznik laseru. Přesto však trvalo až do roku 1960, než byl zkonstruován první funkční laser. [2]

Za vynálezce prvního laseru je považován americký fyzik Theodore H. Maiman, který dne 16. května 1960 poprvé uvedl do provozu rubínový laser v laboratoři Hughes Research Laboratory v Malibu. Zařízení bylo tvořeno syntetickým rubínovým krystalem a výbojkou, přičemž provoz probíhal pouze v pulzním režimu. V té době se vývojem obdobných zařízení zabývalo více vědeckých týmů, avšak právě Maiman jako první dosáhl úspěšného spuštění plně funkčního laseru. Výsledky jeho výzkumu byly následně publikovány, a to i přes počáteční odmítavý postoj odborné veřejnosti, která zařízení vnímala pouze jako variantu již známého maseru. [2]

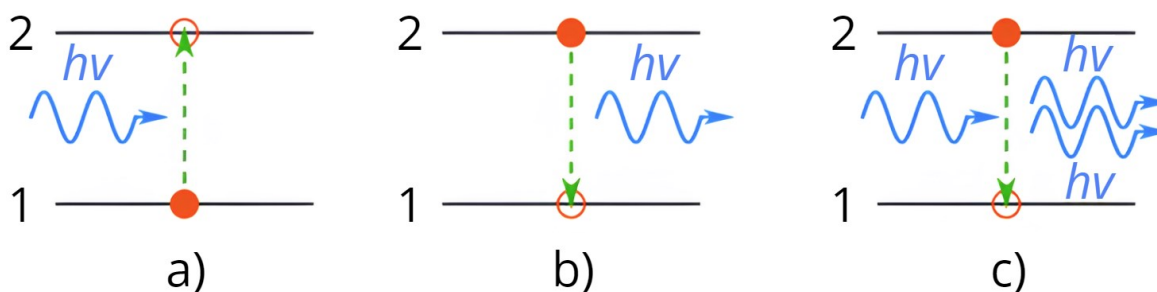
Po úspěšném uvedení laseru do praxe se rychle rozšířilo jeho využití ve vědě, průmyslu i medicíně. Již v prosinci 1961 byla v New Yorku provedena první lékařská operace s využitím laserové technologie, a to při odstranění nádoru ze sítnice oka. Tím byl odstartován prudký rozvoj této technologie, který již nebylo možné zastavit. Lasery se začaly používat k řezání, svařování, měření a přenosu informací v oblasti optické komunikace. [2]

2 PRINCIP LASEROVÉHO PAPRSKU

V běžném vnímání je světlo tvořeno fotony, jejichž fáze a směry šíření jsou neuspořádané a náhodné. Takové světlo je označováno jako nekoherentní a jeho vlastnosti jsou důsledkem nesynchronizované emise fotonů v různých směrech a s rozdílnými fázemi. Laserový paprsek oproti tomu představuje zcela odlišný typ záření, jehož výjimečné vlastnosti vyplývají z přesného uspořádání a součinnosti jednotlivých fotonů. Ty mají stejnou fázi, polarizaci i frekvenci, čímž vzniká záření koherentní a monochromatické. [2]

Pro pochopení principu fungování laseru je nutné porozumět interakci fotonů s prostředím, ve kterém se nacházejí, a kvantovým procesům, které v tomto prostředí probíhají. Aktivní prostředí laseru pracuje s několika energetickými hladinami, mezi nimiž mohou elektrony přecházet v důsledku působení fotonů. Tyto přechody mohou probíhat třemi základními způsoby:

- Absorpce – Elektron přechází z nižší energetické hladiny na vyšší díky pohlčení fotonu. Energie fotonu odpovídá rozdílu energetických hladin.
- Spontánní emise – Excitovaný elektron samovolně přejde z vyšší energetické hladiny na nižší a uvolní přitom foton náhodné fáze a směru. Tento proces je zodpovědný za běžné nekoherentní světlo, například světlo žárovky.
- Stimulovaná emise – Elektrony jsou excitovány na vyšší energetické hladiny a při jejich opětovném přechodu zpět na nižší energetickou hladinu je vyzářen foton. Tento jev je důležitý pro fungování laseru. [2; 3]



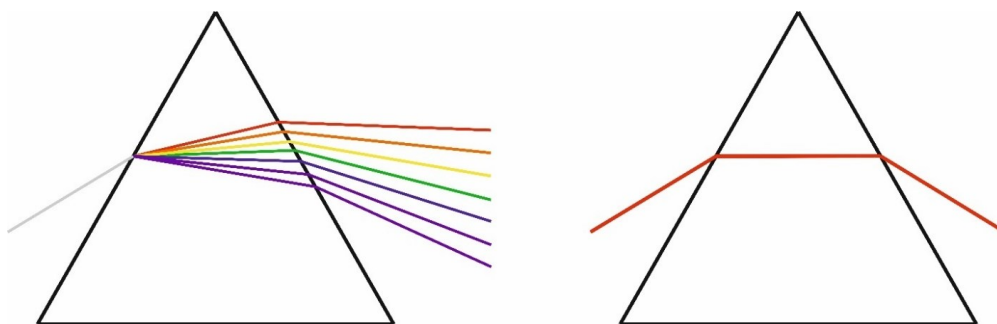
Obrázek 1 Emise fotonu

(zdroj: [3])

3 VLASTNOSTI LASEROVÉHO PAPRSKU

Laserové paprsky mají jedinečné vlastnosti, díky nimž jsou nepostradatelné v širokém spektru aplikací ve vědě, průmyslu, medicíně a technologiích. Schopnost zaostřit laserové světlo na extrémně malou plochu vede k vysokým hustotám výkonu, dosahujícím až $10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ v kontinuálním režimu. Pro lasery s pulzním režimem, které pracují s extrémně krátkými pulzy, mohou být dosažené hustoty výkonu ještě vyšší, což je výhodné zejména pro aplikace jako mikroobrábění či povrchové úpravy. [3]

Jednou z nejdůležitějších vlastností laserového světla je jeho monochromaticnost. To znamená, že laserový paprsek má velmi úzké spektrální rozložení a vyzařuje světlo téměř jediné vlnové délky nebo frekvence. Laserové světlo však není v praktických podmínkách nikdy dokonale monochromatické. Aby bylo skutečně monochromatické, muselo by přetrvávat navždy, což v reálném světě není možné. Emisní spektrální čára, ze které laserové světlo vychází, má vždy určitou konečnou šířku. Tato šířka je ovlivněna Dopplerovým jevem. Přesto je šířka frekvenčního rozsahu laseru mnohem menší ve srovnání s běžnými světelnými zdroji, což z něj činí zdroj světla s velmi vysokou monochromaticností. Obr. 2 vlevo ukazuje rozklad bílého světla na barevné spektrum při průchodu skleněným hranolem, přičemž jednotlivé barvy odpovídají různým vlnovým délkám. Vpravo je zobrazeno monochromatické světlo, které díky své jednotné vlnové délce projde hranolem bez rozkladu. [4; 5; 6]

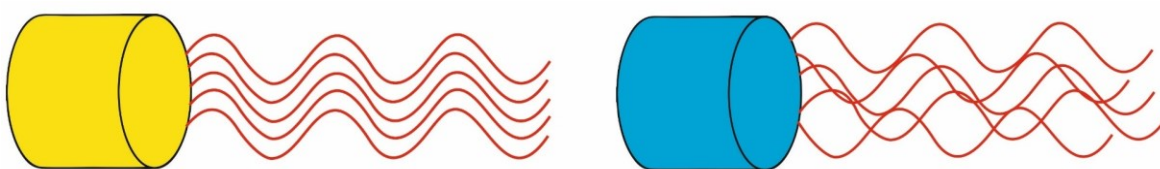


Obrázek 2 Monochromaticnost

(zdroj: [7])

Další klíčovou vlastností je koherence laserového záření. Tento pojem označuje míru uspořádanosti elektromagnetických vln z hlediska jejich fáze. Laserové světlo vzniká prostřednictvím stimulované emise, při které nově vyzářené fotony mají stejnou frekvenci, směr a fázi jako foton, který tuto emisi vyvolal. Výsledkem je záření, jehož jednotlivé vlny jsou ve vzájemně pevně definovaném fázovém vztahu, a proto se označuje jako koherentní.

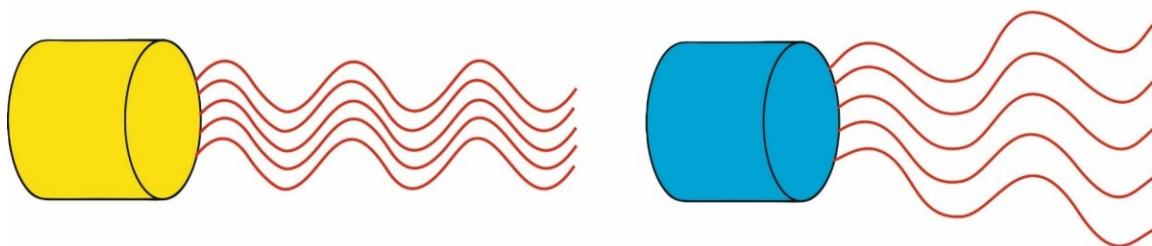
Koherenci lze rozdělit na časovou a prostorovou. Časová koherence popisuje, do jaké míry si světelné vlny zachovávají stálý fázový vztah v čase na jednom konkrétním místě. Prostorová koherence říká, jak dobře jsou světelné vlny uspořádány na různých místech v prostoru v daném okamžiku. Díky těmto vlastnostem se laserové světlo zásadně liší od světla běžných zdrojů, u nichž fotony vznikají náhodně a bez jakéhokoliv fázového vztahu. Na Obr. 3 vlevo je znázorněn koherentní zdroj záření s paprsky, které jsou usměrněné, zatímco vpravo lze vidět nekoherentní zdroj s neusměrněnými paprsky stejné vlnové délky. [4]



Obrázek 3 Koherentnost

(zdroj: [7])

Směrovost laserového paprsku je další významnou vlastností. Zrcadla umístěná na koncích rezonátoru umožňují paprsku opakovaně cestovat tam a zpět. Tento proces zvyšuje intenzitu světla díky stimulované emisi dalších fotonů na stejné vlnové délce, což vede k zesílení, protože paprsek prochází aktivním médiem vícekrát. Opakované odrazy uvnitř dutiny navíc zajišťují, že pouze světlo, které se pohybuje téměř rovnoběžně s osou dutiny, zůstane součástí paprsku. Pokud se paprsek jen nepatrně odchýlí od optické osy, ztratí se, protože není schopen se dále odrážet mezi zrcadly. Rezonátor tak udržuje pouze ty vlny, které se šíří přesně podél její osy. Opakem směrovosti je divergence, ta popisuje rozbíhavost paprsku, tedy úhel, pod kterým se paprsek rozšiřuje. Nízká divergence je důsledkem vysoké směrovosti. Na levé straně Obr. 4 je zobrazeno směrové světlo s rovnoběžnými paprsky, zatímco na pravé straně se paprsky od zdroje postupně rozbíhají. [4; 5]

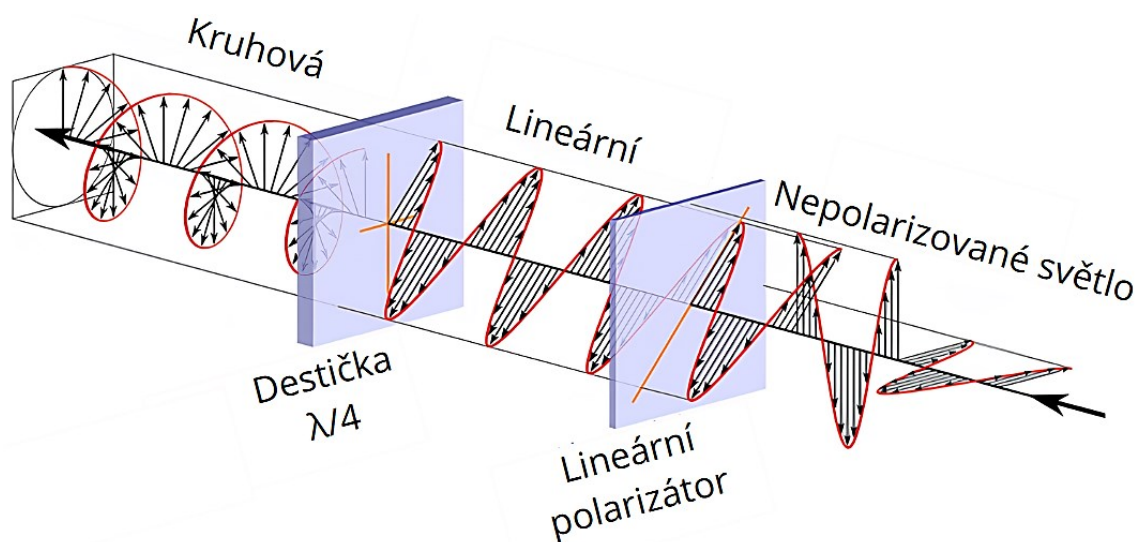


Obrázek 4 Směrovost

(zdroj: [7])

Difrakce má klíčovou roli při stanovení velikosti laserové bodu, který lze zaměřit na určitou vzdálenost. Světelný paprsek v rezonátoru laseru prochází mnohonásobnými odrazy, což vytváří úzký a směřovaný paprsek. Po opuštění rezonátoru se však paprsek začne rozbíhat pod určitým úhlem, který závisí na konstrukci rezonátoru, velikosti výstupního otvoru a difrakčních jevech. Tyto difrakční jevy vznikají, když světelné vlny procházejí malým otvorem. Difrakce omezuje, jak malý může být průměr světelného bodu, který projde optickým systémem. [4]

Polarizace laserového paprsku popisuje směr, ve kterém kmitá elektrické pole světelné vlny. Některé lasery emitují paprsek s definovanou polarizací už při výstupu z rezonátoru, ale u mnoha typů, zejména u vláknových laserů, může být polarizace náhodná. V praxi se proto používají polarizační prvky, které umožňují požadovanou polarizaci nastavit. Nejčastěji se setkáváme s lineární polarizací, kdy elektrické pole kmitá v jednom směru, nebo s kruhovou polarizací, kde elektrické pole opisuje kružnici. Pro řízení polarizace se využívají vlnové destičky $\lambda/2$ a $\lambda/4$, které mění směr nebo typ polarizace podle potřeby dané aplikace. [8]



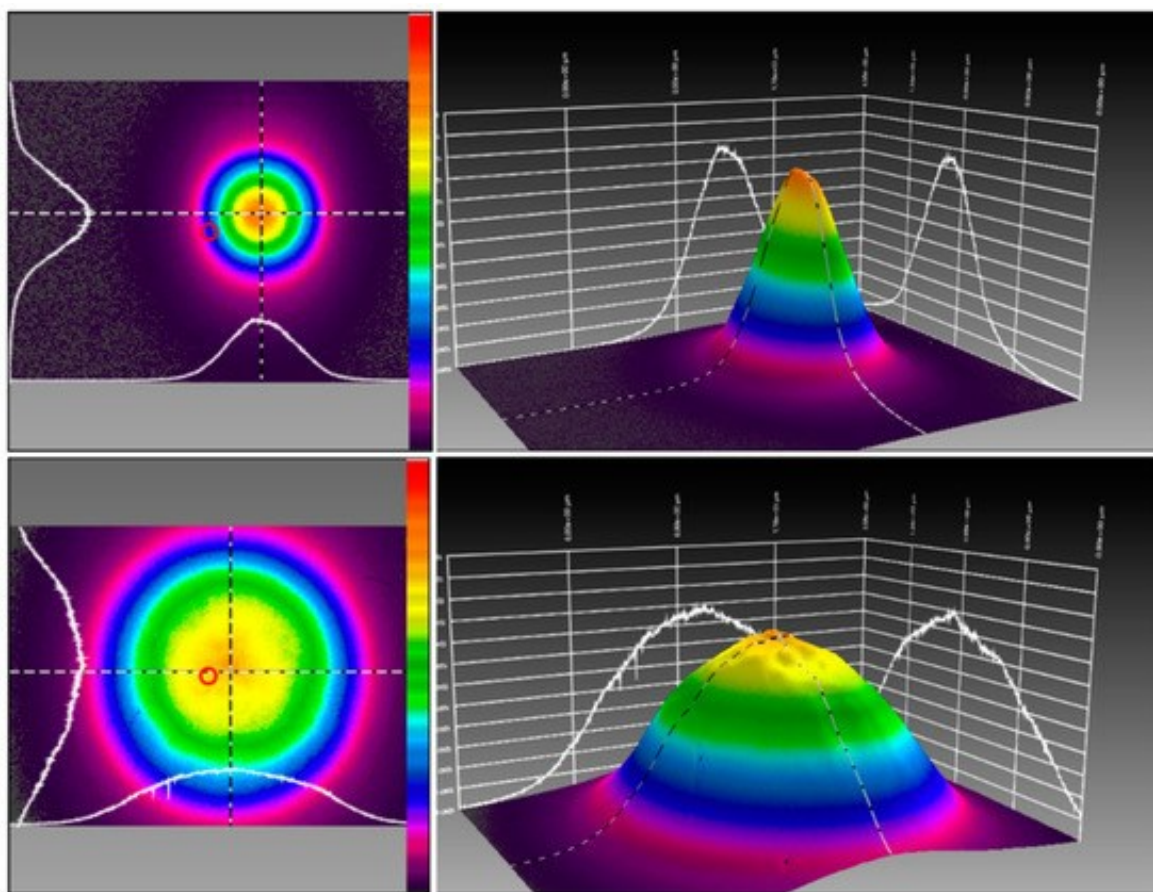
Obrázek 5 Schématické znázornění polarizace

(zdroj: [8])

3.1 Módy – příčné rozložení intenzity záření

Rozložení intenzity laserového paprsku v horizontálním i vertikálním směru se popisuje pomocí transverzálních elektromagnetických módů (TEM). Určitou podobu módu lze zjistit dvěma způsoby. Jednou z možností je nasměrování nezaostřeného paprsku na akrylátový blok, v jehož objemu dojde k lokální změně struktury materiálu. Vypálená stopa pak

poskytuje orientační informaci o tvaru a kvalitě záření. Přesnější metodou je však využití detekčního zařízení, které snímá profil laserového paprsku a převádí jej do digitální podoby. [9; 10; 11]



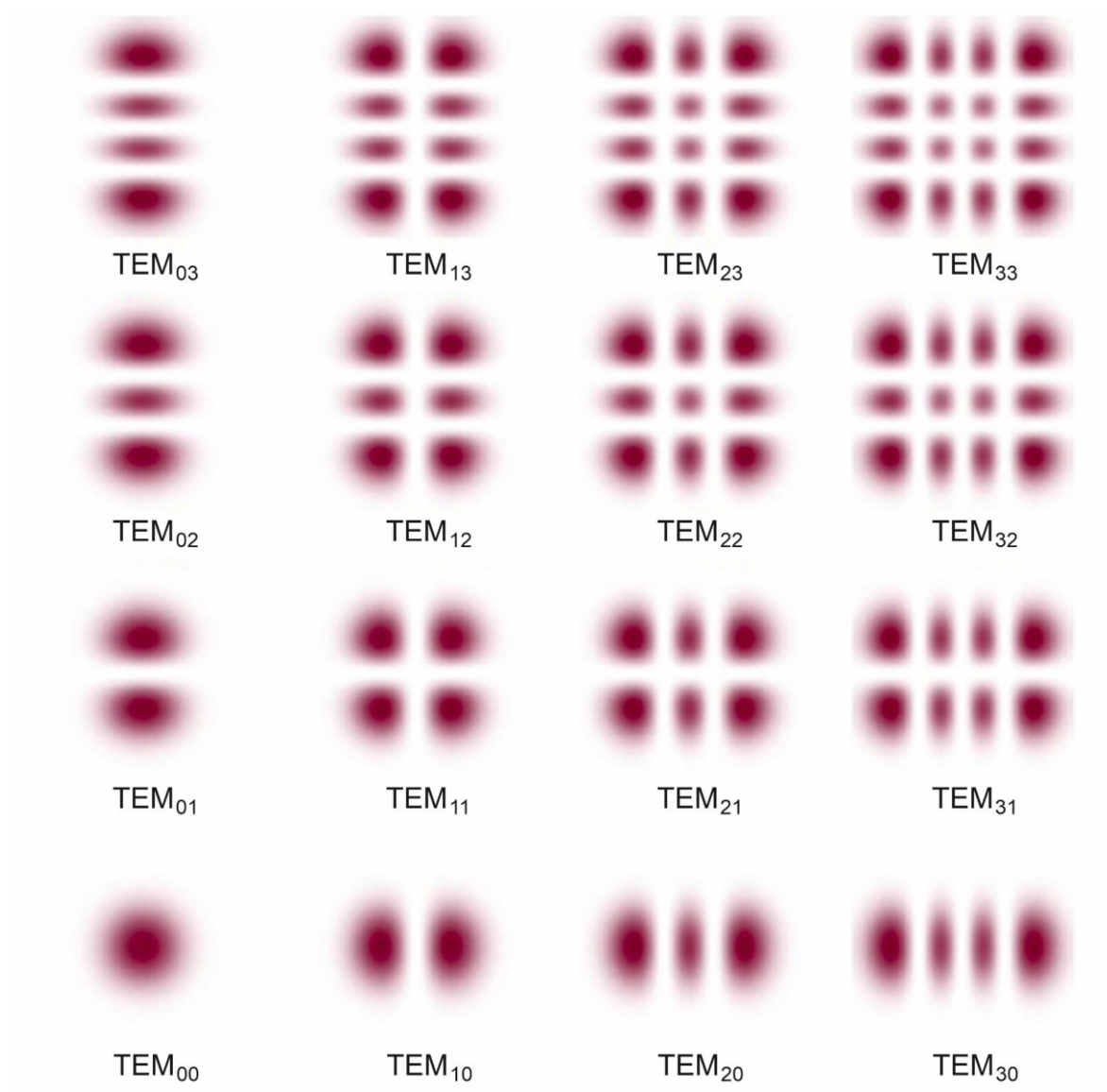
Obrázek 6 Mód TEM_{00} zobrazený pomocí PC

(zdroj: [12])

Základní mód TEM_{00} je nejjednodušší a zároveň nejčastěji používaný mód laserového paprsku. Jeho intenzita je nejvyšší přímo na ose paprsku a postupně klesá směrem od osy, což odpovídá Gaussovu rozložení. Tento mód je ideální pro aplikace vyžadující vysokou přesnost a energii soustředěnou do malého bodu, jako je laserové řezání. U CO_2 laserů se tento mód nejčastěji vyskytuje při výkonech v rozmezí 700 až 3500 W. Na rozdíl od toho mód TEM_{01} vykazuje nulovou intenzitu nejen na ose paprsku, ale i v určité vzdálenosti od ní, čímž vzniká prstencový vzor intenzity. Tento mód je vhodný pro povrchové úpravy, jako je vrtání a řezání. Typický je pro lasery s výkonem 3 až 7 kW. [10]

Při ještě vyšších výkonech se pak často objevuje Multimód (MM), který vzniká překrýváním několika jednotlivých módů vyššího řádu. Tento typ režimu je typický

pro výkonné lasery s výstupními výkony v rozsahu přibližně 8 až 20 kW. CO₂ lasery tento režim běžně používají především pro svařování nebo povrchové úpravy materiálů, kde je důležitá vysoká energie, nikoliv přesnost zaostření. [10]

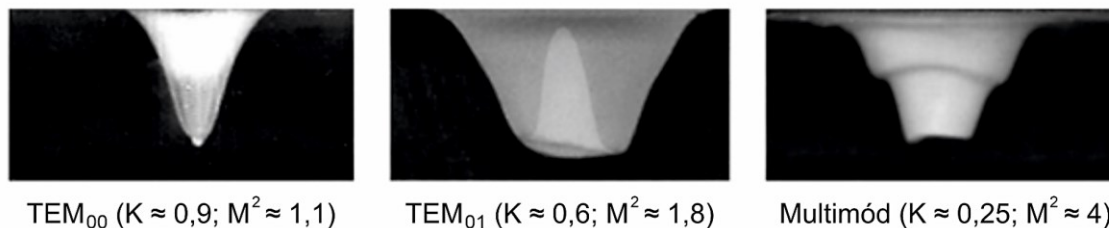


Obrázek 7 Módy laseru

(zdroj: [13])

Mezi určující parametr paprsku patří taky faktor kvality paprsku (M^2). Vyjadřuje, do jaké míry se vlastnosti konkrétního laserového paprsku odchylojí od ideálního paprsku se základním módem. Tento faktor, v kombinaci s optickým výkonem, stanovuje zářivost laserového paprsku. Hodnoty faktoru M^2 jsou vždy větší nebo rovno 1. Hodnoty nižší než 1 nejsou fyzikálně možné, protože právě hodnota $M^2 = 1$ odpovídá ideálnímu Gaussovu

paprsku. Převrácenou hodnotou M^2 je číslo K , které se pohybuje v hodnotách od 0 do 1. Čím blíže je hodnota K k 0, tím kvalitnější je paprsek. [10]



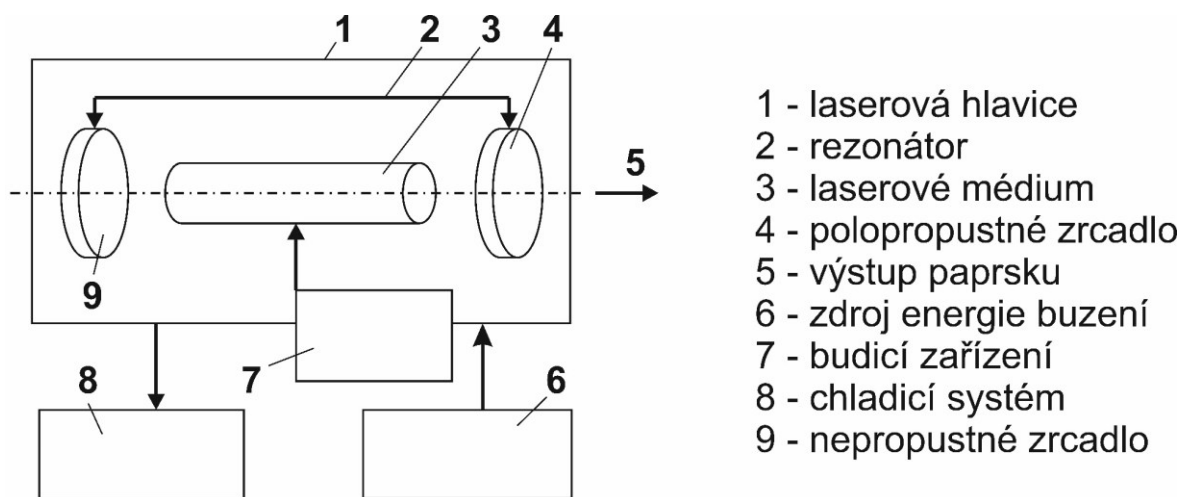
Obrázek 8 Druhy rozložení intenzity v laserovém paprsku

(zdroj: [10])

Z hlediska celkových vlastností laserového paprsku hraje výběr módu klíčovou roli. Zatímco základní mód TEM₀₀ zajišťuje nejvyšší kvalitu paprsku a přesné zaostření, přítomnost více módů může vést ke zvýšení rozbíhavosti, zhoršení koherence a snížení spektrální čistoty. Proto je při konstrukci laserů důležité kontrolovat a optimalizovat módy paprsku tak, aby byly vhodné pro své použití a zajišťovaly co nejlepší výsledky. [14]

4 ZÁKLADNÍ ČÁSTI LASEROVÉHO ZAŘÍZENÍ

Laserové zařízení je komplexní systém, jehož funkce závisí na spolupráci několika komponentů. Mezi základní části patří aktivní prostředí, rezonátor, chladicí systém, a zdroj energie, který dodává potřebnou excitaci. Tyto základní komponenty společně tvoří funkční celek.



Obrázek 9 Schéma laserového zařízení

(zdroj: [9])

4.1 Aktivní prostředí

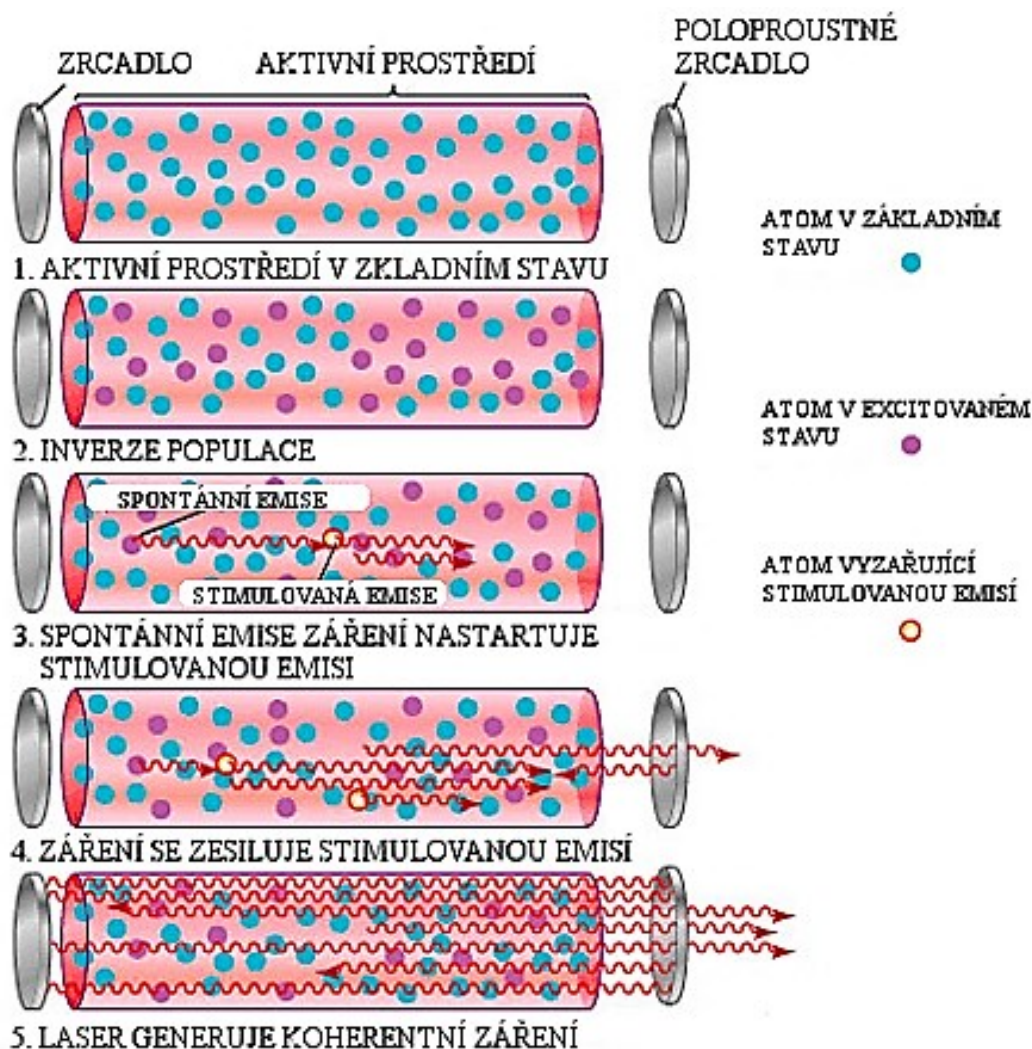
Aktivní prostředí představuje klíčovou součást každého laserového zařízení. Jedná se o látku, jejíž elektronová struktura umožňuje vznik a zesílení záření prostřednictvím stimulované emise. Podle skupenství a fyzikální podoby lze aktivní prostředí rozlišit na plynné, pevnolátkové, polovodičové a kapalinové. Každý z těchto typů se vyznačuje specifickými vlastnostmi, které určují jeho vhodnost pro určité aplikace. Podrobnější charakteristika jednotlivých typů aktivních prostředí je uvedena v kapitole 5.1. [15]

4.2 Rezonátor

Rezonátor tvoří druhou zásadní součást laserového zařízení, která umožňuje zesílení záření a má zásadní vliv na výsledné parametry laserového paprsku, jako jsou koherence, intenzita a pravidelnost. Konstrukčně se skládá ze dvou zrcadel umístěných kolmo k optické ose laseru. Tato zrcadla vytvářejí optickou dutinu, ve které dochází k opakovaným odrazům světla, čímž vzniká rezonance. Nejčastěji jsou použita rovinná zrcadla, avšak pro optimalizaci výkonu a charakteristik laserového paprsku mohou být využita také zakřivená

zrcadla, jako jsou konkávní (vydutá) či konvexní (vypuklá). Zakřivení a průměr těchto zrcadel zásadně ovlivňuje divergenci a rozložení intenzity. [9; 16; 17]

Vedle tvaru zrcadel hraje významnou roli také jejich optická propustnost. Jedno ze zrcadel je zcela odrazivé, zatímco druhé je polopropustné. Plně odrazivé zrcadlo, často označované jako dielektrické, bývá vyrobeno z precizně leštěného kovu. [16; 17]



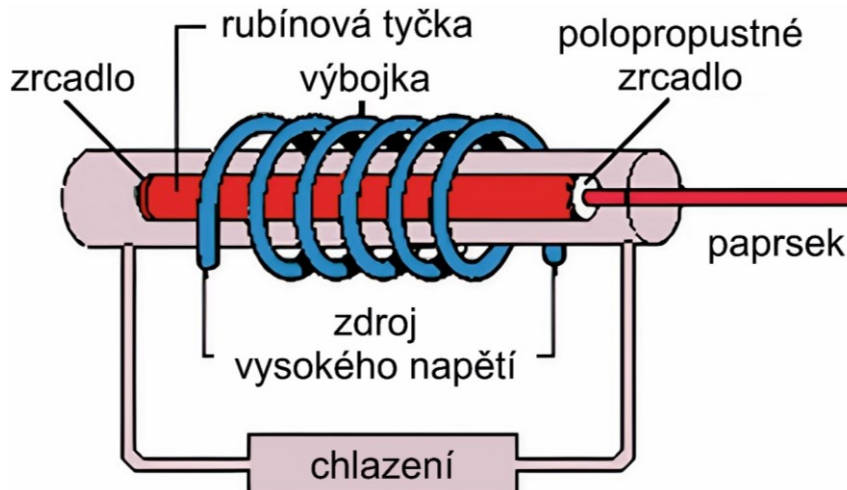
Obrázek 10 Princip funkce rezonátoru

(zdroj: [18])

Princip činnosti rezonátoru je založen na opakovaných odrazech fotonů mezi zrcadly. Foton, jehož směr není rovnoběžný s osou rezonátoru, po několika odrazech opustí aktivní prostředí. Naopak foton pohybující se přesně podél osy rezonátoru zůstává uvnitř dutiny a jeho odrazy vedou ke stimulované emisi dalších fotonů. Jakmile foton dosáhne požadované energetické hladiny, polopropustné zrcadlo jej propustí ve formě laserového paprsku. [16; 17]

4.3 Zdroj laserového záření

Třetí důležitou součástí laserového zařízení je zdroj záření, který představuje specifický typ síťového napáječe. Jeho úkolem je dodávat energii elektronům v aktivním prostředí, aby mohly přecházet z nižších energetických hladin na vyšší. [9]



Obrázek 11 Zdroj laserového záření

(zdroj: [19])

4.4 Chladicí systém

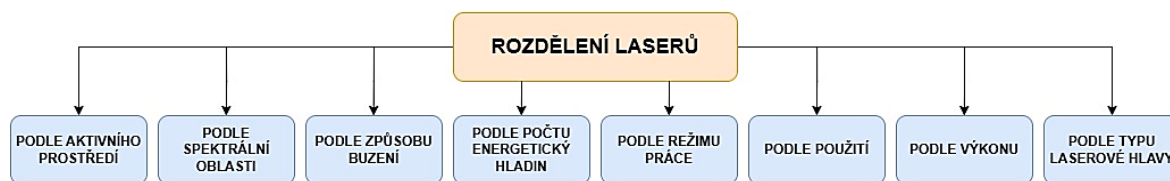
Mezi další části laseru lze zařadit chladicí systém, ten zajišťuje odvod přebytečné energie, která nebyla přeměněna na laserové záření a zůstala ve formě tepla. Efektivní chlazení je klíčové pro stabilní a dlouhodobý provoz laseru, protože přehřátí by mohlo způsobit snížení výkonu nebo poškození komponent. [9]

Vodní chlazení je nejčastěji používaným typem chladicího systému u laserových zařízení. Jeho funkce spočívá v cirkulaci ochlazené vody kolem laserového zdroje a dalších součástí citlivých na přehřátí. Během provozu voda absorbuje přebytečné teplo a následně prochází chladicí jednotkou, která toto teplo odvádí, než se voda vrátí zpět do oběhu. Díky vysoké účinnosti a přesné kontrole teploty jsou vodní chladiče ideální volbou pro použití v systémech s vysokými nároky na výkon. [9; 20]

Kromě vodního chlazení nabízejí někteří výrobci i speciální chladicí systémy využívající vzduch. Systémy chlazení vzduchem využívají ventilátory nebo dmychadla k proudění vzduchu přes součásti, které produkují teplo. Přestože jsou méně efektivní než vodní chladiče, jejich výhodou je jednodušší konstrukce a nižší náklady na instalaci. Tento typ chlazení je obvykle integrovaný do menších laserových zařízení. [9; 20]

5 ROZDĚLENÍ LASERŮ

Lasery lze rozdělit podle různých kritérií, což umožňuje jejich přesné zařazení a pochopení jejich vlastností. Hlavními kategoriemi jsou typ aktivního média, režim provozu a spektrální oblast záření.



Obrázek 12: Rozdělení laserů podle kritérií

(zdroj: vlastní)

5.1 Podle aktivního prostředí

Jedním ze základních způsobů klasifikace laserů je rozdělení podle skupenství aktivního prostředí. Aktivní prostředí může být plynné, pevné, kapalné nebo polovodičové, přičemž každý z těchto typů se vyznačuje odlišnými fyzikálními vlastnostmi, konstrukčním řešením a oblastmi využití.

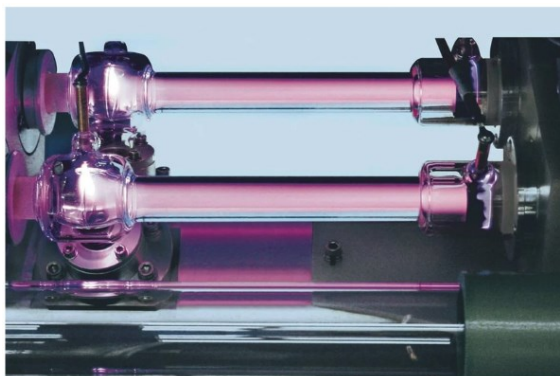
5.1.1 Plynové lasery

Plynové lasery patří mezi zařízení, která využívají ke generování laserového záření plynné aktivní prostředí. To bývá uzavřeno ve skleněné trubici, která je naplněna směsí plynů, jako je helium, neon, dusík nebo oxid uhličitý. Buzení aktivního prostředí se zajišťuje vysokonapětovým doutnavým elektrickým výbojem, přičemž elektrody musí odolávat vysokým proudovým intenzitám. [21]

Z hlediska složení aktivního prostředí se plynové lasery dělí na atomární, iontové a molekulární. Mezi nejznámější atomární lasery patří helium-neonový laser, který vyzařuje červené světlo o vlnové délce 633 nm. Díky stabilnímu a přesnému paprsku se využívá především v měřicích systémech. Iontové lasery, jako je argonový, generují záření v modré a zelené oblasti spektra a nacházejí uplatnění ve vědě a medicíně. Molekulární lasery, mezi které spadají excimerové lasery, produkují ultrafialové záření a používají se v oblastech, kde je vyžadována vysoká přesnost, jako je litografie nebo dermatologie. [8; 21]

Plynové lasery jsou ceněny pro svou schopnost generovat stabilní a úzce směřovaný paprsek s velmi nízkou divergencí. Homogenní složení aktivního prostředí zajišťuje

dlouhodobě stálou frekvenci záření a vysokou kvalitu paprsku. Nižší objemová hustota excitovaných částic v plynném médiu však omezuje dosažitelný výkon, což si vyžaduje delší aktivní zónu, a tedy větší rozměry zařízení. [8]



Obrázek 13: Excimerový laser

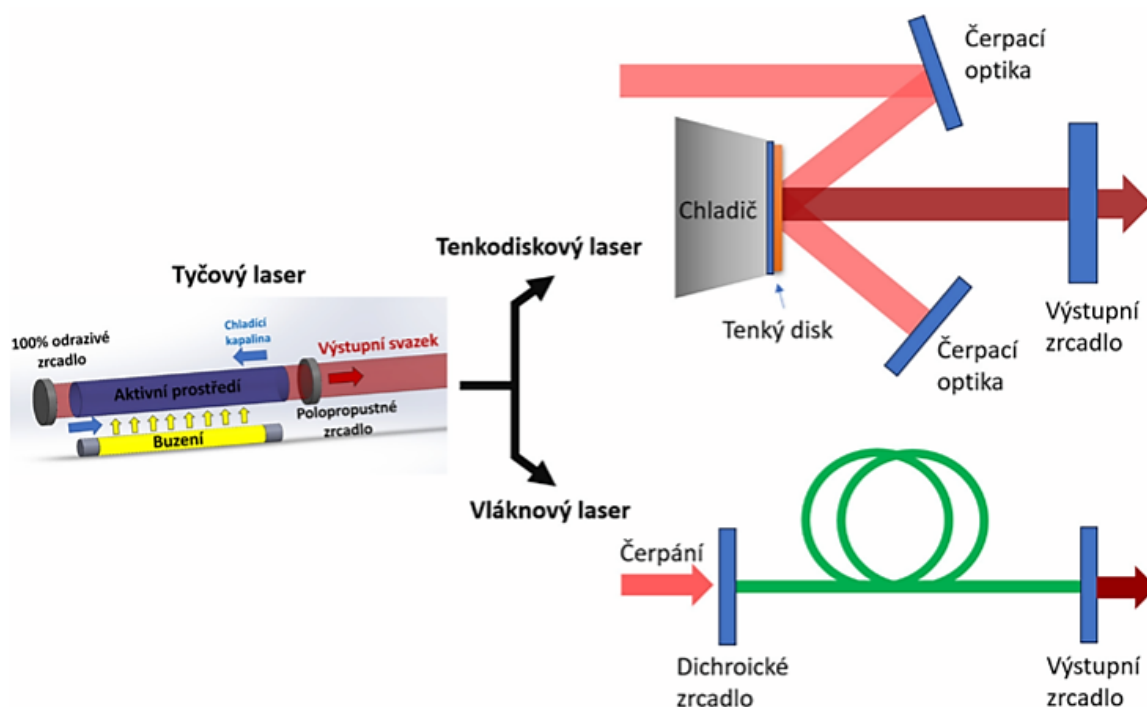
(zdroj: [8])

5.1.2 Pevnolátkové lasery

Pevnolátkové lasery patří mezi široce využívaný typ laserů, kde je aktivním prostředím dielektrikum, které se skládá z matrice a aktivátoru. Matrice má za úkol zajistit požadované technické vlastnosti aktivního prostředí, zejména co se týče optické průhlednosti a homogenity. Mezi běžné materiály matrice patří krystaly, sklo nebo keramika. Aktivátor tvoří atomy nebo ionty umístěné v matrici. Obvykle jde o ionty vzácných zemin, které se vyznačují silnou absorpcí budicího záření. [8]

Podle geometrie aktivního prostředí se pevnolátkové lasery dělí na několik základních typů. Mezi nejběžnější patří tyčové lasery, které využívají válcový krystal a jsou rozšířené především v průmyslové praxi. Dále se uplatňují tenkodiskové lasery s tenkou aktivní vrstvou připevněnou k chladicímu prvku, slabové lasery využívající tenké vrstvy, ve kterých se světlo šíří podobně jako ve vlnovodech, a vláknové lasery, jejichž aktivní prostředí tvoří dopované optické vlákno. Každá z těchto konstrukcí má odlišné vlastnosti z hlediska chlazení, kvality svazku a dosažitelného výkonu. [8]

Nejčastěji se využívají v oblasti infračerveného záření, přičemž mezi nejznámější zástupce patří Nd:YAG, Yb:YAG, rubínový nebo Ti:Sa laser. Výkonové spektrum těchto zařízení sahá od několika desítek wattů až po jednotky kilowattů. Právě tato flexibilita v kombinaci s vysokou stabilitou a kvalitou svazku zajišťuje jejich využití v průmyslovém značení, mikroobrábění, chirurgii i vědeckém výzkumu. [8]



Obrázek 14 Dělení pevnolátkových laserů podle tvaru aktivního prostředí

(zdroj: [8])

5.1.3 Kapalinové lasery

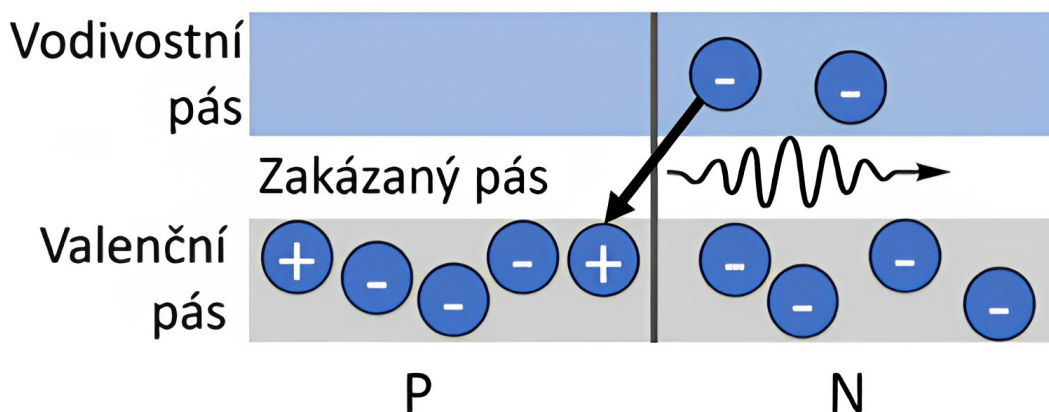
Kapalinové lasery využívají jako aktivní prostředí roztoky organických barviv a vyznačují se schopností generovat záření v širokém spektru vlnových délek. Typicky se používají barviva jako rhodamin, fluorescein, alizarin nebo jiné látky, které se rozpouštějí v lihu či destilované vodě. Významnou výhodou těchto laserů je možnost ladění výstupní vlnové délky, obvykle v rozsahu od 300 do 1500 nm. [21]

Buzení aktivního prostředí se provádí pomocí jiného světelného zdroje, například dusíkového laseru nebo výbojky. Barviva mohou být umístěna do rezonátoru podobně jako u jiných typů laserů, přičemž v případě buzení jiným laserem se uspořádání mírně liší. Využití kapalinových laserů se soustředí zejména na vědecké aplikace. V průmyslu nejsou příliš rozšířené, a to především kvůli degradaci aktivního prostředí způsobené vneseným teplem a intenzitou buzení. [21]

5.1.4 Polovodičové lasery

Mezi nejčastěji využívané typy laserů v průmyslu patří ty polovodičové. Jejich aktivním prostředím je polovodičový materiál, ve kterém dochází k vyzařování světla při rekombinaci elektronů a děr. Tento jev probíhá v oblasti PN přechodu. Při přiložení napětí se elektrony

z vodivostního pásu polovodiče typu N pohybují směrem k přechodu, kde se setkávají s dírami ve valenčním pásu polovodiče typu P. Při jejich rekombinaci dojde k přechodu elektronu ze stavu s vyšší energií (vodivostní pás) do stavu s nižší energií (valenční pás), přičemž se uvolní energie ve formě fotonu. Tato energie odpovídá velikosti zakázaného pásu. Při splnění podmínek inverze populace a vhodném uspořádání rezonátoru může vzniklé záření zesilovat a vést ke generaci koherentního laserového svazku. [8]



Obrázek 15 Princip generace záření polovodičových laserů

(zdroj: [8])

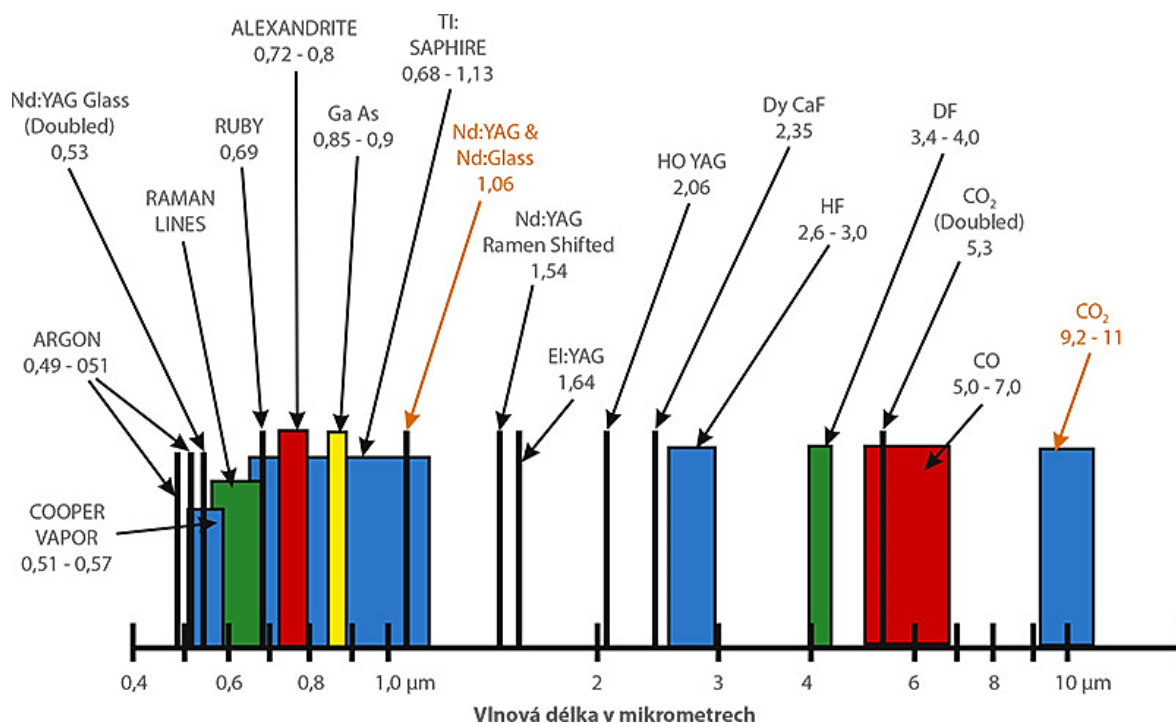
Ne všechny polovodičové lasery však musí být založené na klasických laserových diodách. Mezi jiné varianty patří kvantově kaskádové lasery, které nevyužívají přechod mezi valenčním a vodivostním pásmem. Tyto lasery pracují s řadou kvantových vrstev, mezi nimiž dochází k přechodům elektronů. Díky tomuto principu lze generovat záření v širokém spektru vlnových délek, a to zejména v oblasti infračerveného záření. Jiným řešením jsou VCSEL lasery, které se odlišují tím, že světlo vyzařují kolmo na povrch polovodičové struktury. [8]

Využití těchto zařízení je široké. Uplatňují se v telekomunikačních zařízeních, výpočetní technice, tiskařských systémech a čtečkách. V průmyslu se využívají při značení, navádění a nastavování. Objevují se i v aplikacích, kde je vyžadován kompaktní a výkonný zdroj světla. [8]

5.2 Podle spektrální oblasti

Laserové záření lze rozdělit do několika kategorií podle spektrální oblasti, ve které laser pracuje. Nejčastěji se lasery využívají v těchto oblastech vlnových délek:

- submilimetrové,
- infračervené (790 nm–1 mm),
- viditelné světlo (360 nm–780 nm)
- ultrafialové (10 nm–360 nm),
- rentgenové (10 nm–1 pm). [21]



Obrázek 16 Přehled vlnových délek vybraných laserových systémů

(zdroj: [21])

5.3 Podle způsobu buzení

Pro zajištění funkce laseru je nezbytné dodat aktivnímu prostředí energii potřebnou k dosažení inverze populace. Tento proces, označovaný jako buzení, může být realizován různými způsoby v závislosti na konstrukci a typu laseru. Mezi základní způsoby buzení patří:

- optické záření,
- elektrické pole nebo výboj,
- chemická reakce,
- elektronový svazek,

- tepelné změny,
- rekombinace,
- injekce nosičů náboje. [21]

5.4 Podle počtu energetických hladin

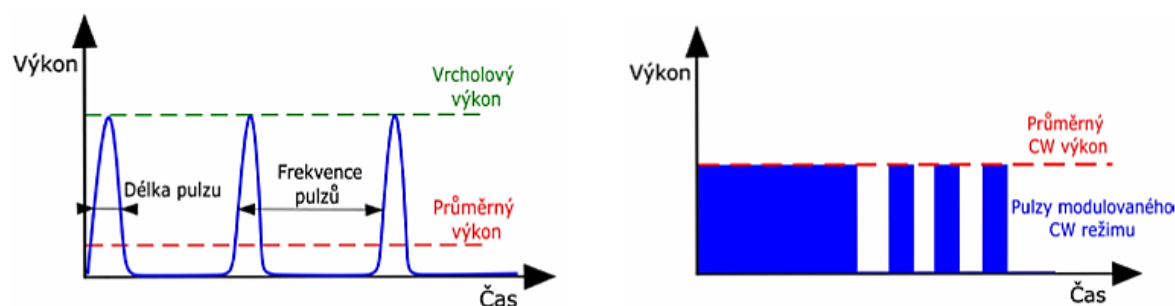
Lasery lze rozdělit také podle počtu energetických hladin, mezi nimiž dochází k přechodům při generaci záření. V závislosti na tom, kolika hladin se tento proces účastní, rozlišujeme:

- dvou, tří, vícehladinové,
- molekulární,
- elektronové,
- jaderné. [21]

5.5 Podle režimu práce

Dalším kritériem rozdělení je časový režim, ve kterém laser funguje. Tento režim provozu ovlivňuje nejen konstrukci zařízení, ale především výsledné parametry laserového svazku. Základními režimy jsou:

- pulzní (PW),
- kontinuální (CW),
- impulsní (Qs). [21]



Obrázek 17 Časové průběhy výkonu při pulzním (vlevo) a kontinuálním režimu (vpravo)

(zdroj: [8])

5.6 Podle použití v průmyslu

Lasery hrají klíčovou roli v moderním průmyslu díky své schopnosti přesně a spolehlivě zpracovávat různé materiály. Díky vysokému výkonu, směrovosti a všestrannosti nacházejí uplatnění v široké škále aplikací jako je:

- řezání,
- svařování a pájení,
- značení,
- vrtání,
- mikroobrábění,
- kalení,
- zaměřování. [21]

5.7 Podle výkonu

Při klasifikaci laserových zařízení je důležitým kritériem také jejich výstupní výkon. Na základě tohoto parametru se lasery dělí do dvou základních skupin:

- malé výkony (3 W–100 W),
- velké výkony (100 W–100 kW). [21]

5.8 Podle typu laserové hlavy

Typ laserové hlavy je jedním z faktorů, který určuje vlastnosti a možnosti využití laserového zařízení. Laserové hlavy se liší svou konstrukcí, přizpůsobením k různým aplikacím a schopností manipulace s paprskem. Mezi nejběžnější typy patří:

- pevná hlava a pohyblivý stůl,
- skenovací hlava,
- pohyblivá hlava. [21]

6 ZÁKLADNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÉ PRO ZNAČENÍ

Při průmyslovém značení se využívá několik základních typů laserů, které se liší aktivním prostředím, konstrukcí i oblastí použití. Mezi nejčastější patří CO₂ lasery, Nd:YAG lasery a polovodičové lasery, jejichž vlastnosti byly popsány již v kapitole věnované této skupině. Vláknové lasery jsou vzhledem k zaměření této bakalářské práce popsány samostatně, protože právě jejich použití při značení je hlavním předmětem zkoumání.

6.1 CO₂ lasery

CO₂ lasery jsou nejčastěji používaným plynovým laserem v průmyslu. Jejich aktivní prostředí je tvořeno směsí oxidu uhličitého, dusíku a helia, která je uzavřena ve skleněné trubici. K buzení této směsi dochází pomocí doutnavého elektrického výboje. Stimulovaná emise záření zde probíhá na vibračně-rotálních energetických hladinách molekul CO₂ a výsledné laserové záření má vlnovou délku okolo 10,6 μm , což odpovídá infračervené oblasti spektra. Za podmínky účinného chlazení může zařízení dosáhnout výkonu až 20 kW, přičemž energetická účinnost se pohybuje v rozmezí 10 až 20 %. Pro méně náročné aplikace, jako je značení, se však využívají výkony obvykle mezi 10 a 30 W. [8; 22]

Paprsek vycházející z rezonátoru má čtvercový nebo obdélníkový průřez a optická soustava ho pak převádí na téměř kruhový profil s nejvyšší intenzitou ve středu. Rezonátor se sestavuje z plochých i vypuklých zrcadel, přičemž výsledný paprsek může být polarizovaný nebo s náhodnou polarizací. Kvalitu paprsku určuje nejen samotný zdroj, ale také uspořádání dutiny a zvolené zakřivení zrcadel. Formovací optika pak upraví průměr a rozbíhavost tak, aby vznikl buď rozšířený, nebo naopak velmi úzký a soustředěný paprsek. Na výstupu bývají čočky ze selenidu zinku, který je pro člověka neprůhledný, ale paprsek jím prochází s minimálními ztrátami. Díky této soustavě lze paprsek zaostřit až na bod přibližně 0,2 mm. [22]

CO₂ lasery se v praxi osvědčují při gravírování a značení mnoha nekovových materiálů, jako je dřevo, sklo, textil, plasty a kůže. Na kovových površích však jejich paprsek nezanechává dostatečně kontrastní stopu, takže pro kovy se běžně volí vláknové lasery. Pořizovací náklady CO₂ systémů jsou zpravidla nižší, ale optická soustava se zrcadly a plynová trubice vyžadují pravidelnou údržbu a časem i výměnu, což provoz prodražuje. Konstrukce bývá rozměrnější a zpracování je pomalejší než u vláknových laserů. [23]



Obrázek 18 Trubice CO₂ laseru a plotrový řezací systém využívající CO₂ laser

(zdroj: [8])

6.2 Nd:YAG lasery

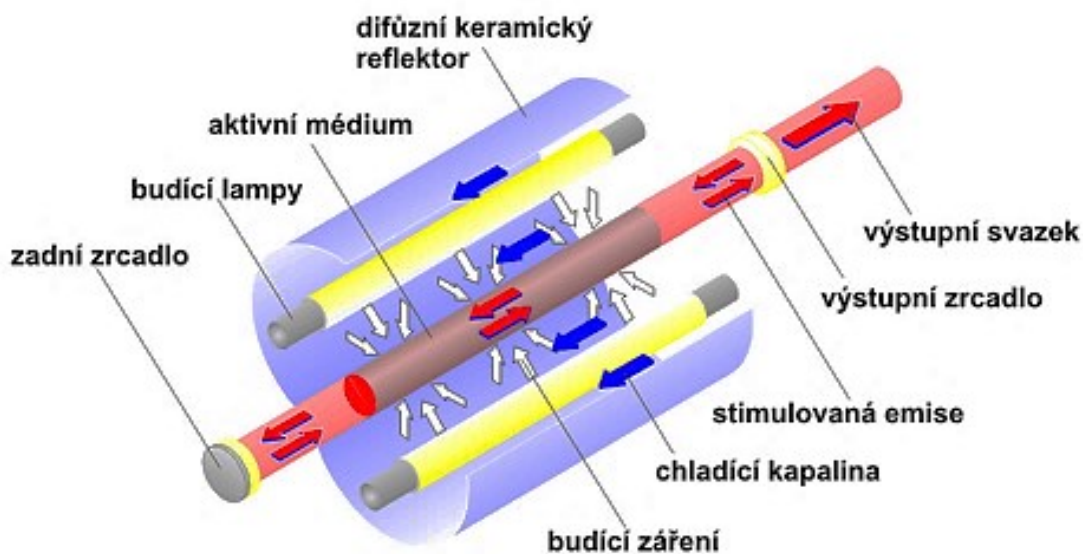
V dnešní době je Nd:YAG nejrozšířenějším typem pevnolátkového laseru. Aktivní prostředí tvoří izotropní krystal yttritohlinitého granátu, známý pod zkratkou YAG, který je dopovaný ionty neodymu. Tento krystal má bezbarvý charakter, kubickou strukturu a často je obracován do tvaru tyče. Vedle neodymu lze využít i jiné ionty vzácných zemin, například erbium nebo holmium. [24]

Buzení Nd:YAG laseru se realizuje buď kryptonovou výbojkou, nebo polovodičovou diodou. Lasery buzené výbojkou dosahují životnosti až 5 000 hodin, zatímco diodové systémy mohou dosáhnout i 20 000 hodin provozu. Výběr způsobu buzení ovlivňuje vlastnosti svazku a provozní parametry laseru. Laser je možné provozovat jak v pulzním, tak i v kontinuálním režimu, a jeho účinnost se pohybuje mezi 2 % a 30 %. [24]

Nd:YAG lasery i vláknové lasery pracují na identické vlnové délce 1064 nm, avšak jejich provozní charakteristiky se významně liší. Vláknové lasery dosahují vyšší účinnosti a jejich životnost může činit až 150 000 hodin. Naproti tomu Nd:YAG lasery jsou méně efektivní, a proto se jejich použití ne vždy ukazuje jako výhodné. I přes mnohé výhody nemusí být vláknový laser náhradou, protože třeba při značení plastů může dojít k výraznému rozdílu v kontrastu. [24]

Kromě základní vlnové délky existují i varianty Nd:YAG laserů, které využívají vyšší harmonické. Pomocí nelineárních procesů lze generovat druhou harmonickou s vlnovou

délkou 532 nm (zelená oblast spektra) a třetí harmonickou s vlnovou délkou 355 nm (ultrafialová oblast). [21]



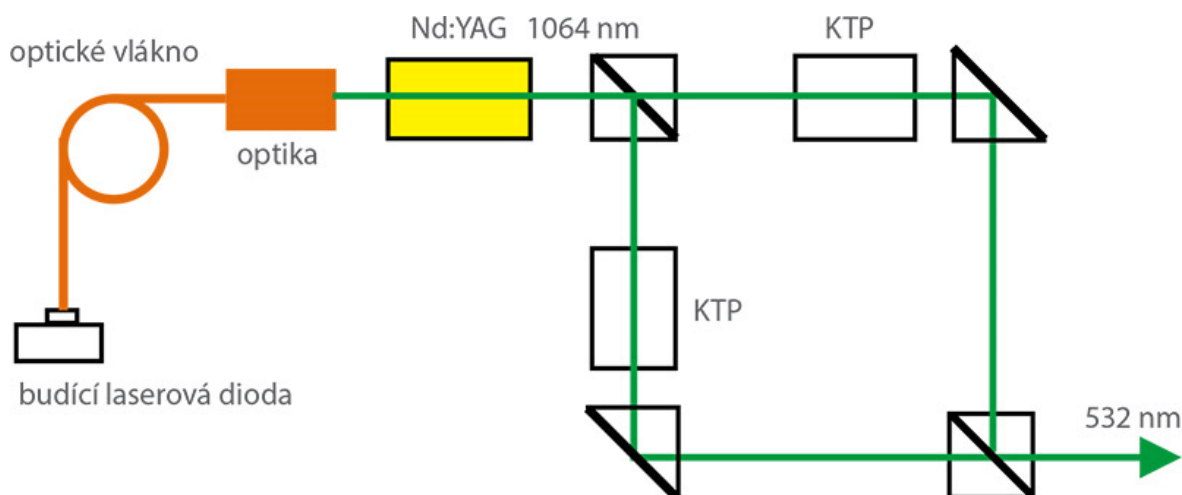
Obrázek 19 Schéma částí Nd:YAG laseru

(zdroj: [25])

6.2.1 Druhá harmonická – zelené lasery

Zelené lasery využívají princip druhé harmonické, kdy dochází ke zdvojení frekvence původního záření a vzniku světla o vlnové délce 532 nm. Tento proces umožňuje přeměnu infračerveného záření do viditelné zelené oblasti spektra pomocí nelineárních optických prvků. Generování zeleného světla vyžaduje pečlivou konstrukci optického systému, který zahrnuje polarizační rozdělovače paprsku, speciální filtry a KTP krystaly pro frekvenční zdvojení. [26]

Díky svým vlastnostem jsou tyto lasery vhodné pro jemné značení křemíkových destiček, paměťových karet a plastových dílů. Zároveň umožňují efektivní popis vysoce reflexních kovů, například mědi a zlata, které běžně odrážejí většinu infračerveného záření. Lepší absorpce zeleného světla pomáhá minimalizovat tepelné poškození a dosáhnout kontrastního značení i u tenkostěnných materiálů. [26]



Obrázek 20 Princip zeleného laseru

(zdroj: [26])

6.2.2 Třetí harmonická – UV lasery

UV lasery pracují s vlnovou délkou 355 nm, která odpovídá třetí harmonické. Díky kratší vlnové délce umožňují velmi čisté značení pomocí fototermálních a fotochemických procesů. Nedochozí přitom k ohřevu povrchu ani odpařování materiálu, což se označuje jako studené značení. UV světlo je ve vzduchu částečně pohlcováno, a proto tyto lasery dosahují lepších výsledků při práci ve vakuu, které je běžné zejména ve vědeckých aplikacích. V průmyslovém prostředí se vakua využívá jen výjimečně. [27]

Studené značení UV laserem zajišťuje vysoký kontrast a minimalizaci tepelného poškození okolního materiálu. Díky vysoké přesnosti odstranění vrstev v rozsahu mikrometrů se tyto lasery využívají při mikrovrtání, pokovování tenkými vrstvami, čištění povrchů a fotochemickém značení. Výroba stabilního a spolehlivého UV laseru je technicky náročnější než u zelených laserů, což souvisí s vyššími požadavky na stabilitu při provozu. [27]



Obrázek 21 Přeměna záření Nd:YAG laseru na 532 nm a 355 nm

(zdroj: [26])

7 VLÁKNOVÉ LASERY

Kořeny vláknových laserů sahají až do roku 1963, kdy americký fyzik Elias Snitzer představil koncept cladding-pumped laserů. Tento první model používal skleněné vlákno s jádrem dopovaným neodymem a generovalo záření na vlnové délce 1,06 μm . Laser byl čerpaný výbojkou, kolem které bylo vlákno spirálovitě obtočeno. [28; 29]

Objev cladding metody je však připisován Valentinu Gapontsevovi a Igoru Samartsevovi ze společnosti IRE Polus v Moskvě. Přestože byl princip vláknových laserů znám, trvalo ještě dvě desetiletí vývoje, než byly v roce 1980 komerčně představeny veřejnosti. [28]

V 90. letech došlo k významným milníkům ve výkonu těchto laserů. V roce 1990 byl uveden erbium dopovaný vláknový laser s výkonem 4 W. Následně v roce 1996 představila společnost IPG Photonics průmyslový laser s výkonem 10 W. Dalším významným krokem bylo zavedení laserů s výkonem 100 W v roce 2000, opět zásluhou společnosti IPG Photonics. V současnosti dosahují vláknové lasery výkonů v desítkách kW a stále častěji nahrazují Nd:YAG lasery. [28]

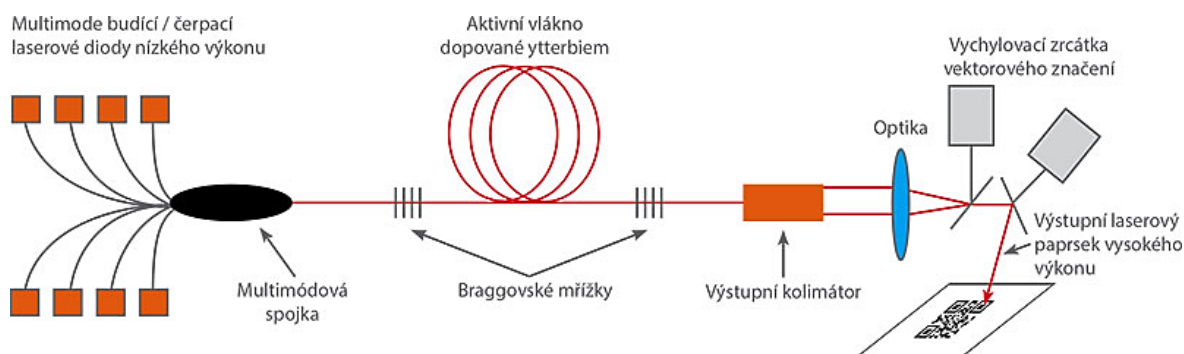
7.1 Princip činnosti

Vláknový laser využívá optické vlákno jako klíčový prvek pro vznik koherentního paprsku a plní tak roli, kterou v jiných pevnolátkových konstrukcích zastává krystal. Aktivní prostředí tvoří úzké jádro vlákna obohacené ionty lanthanoidů, nejčastěji erbia, ytterbia nebo praseodymu. V klidovém stavu se většina iontů nachází na nejnižší energetické hladině a jejich rozložení odpovídá Boltzmannovu rozdělení. [28; 29]

Budící diody pracují na vlnové délce 980 nm nebo 1480 nm. Záření je nejprve vedeno do vlákna s větším průměrem a následně absorbováno v dopovaném jádře, kde dodává energii iontům. Tím se umožní zesílení vstupního signálu o vlnové délce přibližně 1550 nm. Pro specifické účely lze výkon zvýšit pomocí samostatného optického zesilovače, který dokáže malý světelný signál přeměnit na mnohonásobně silnější paprsek, aniž by došlo ke změně jeho základních vlastností. [28; 29]

Na rozdíl od ostatních laserů, které pro tvorbu rezonátoru využívají dvě rovnoběžná zrcadla, vláknové lasery používají Braggovy mřížky. Tyto mřížky jsou vytvořeny přímo v jádře vlákna pomocí ultrafialového záření. UV záření upravuje strukturu optického vlákna,

což vytváří specifické oblasti, na kterých se pak paprsek odráží. Průřez aktivního vlákna může být čtvercový, obdélníkový nebo jinak tvarovaný. [28]



Obrázek 22 Schéma vláknového laseru

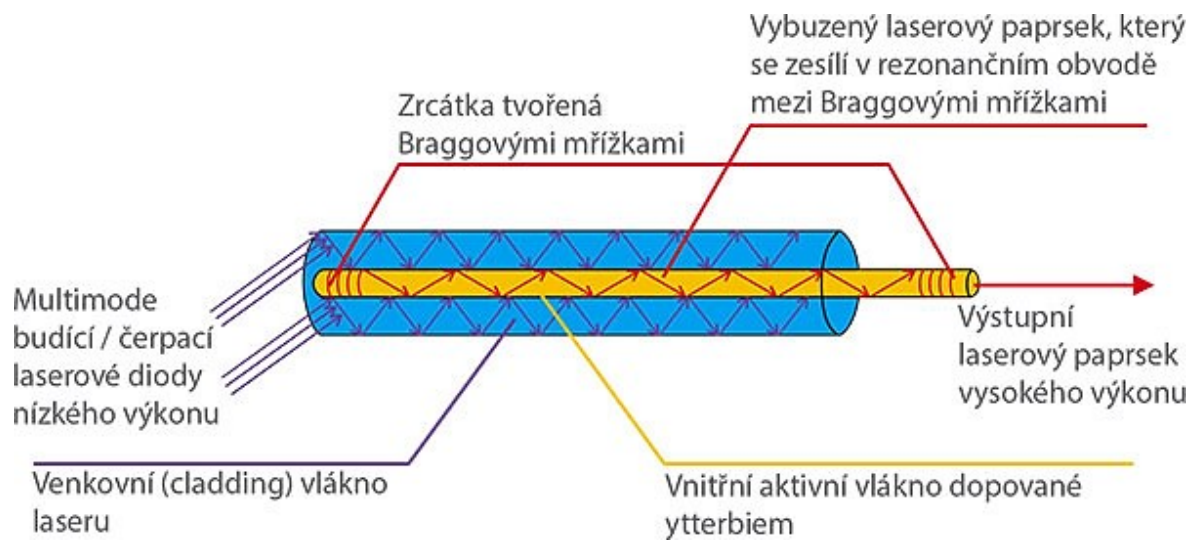
(zdroj: [28])

7.2 Efektivita

Většina běžně používaných vláknových laserů operuje na vlnové délce 1550 nm díky erbium-dopovaným vláknovým zesilovačům. Pro aplikace jako značení se však často používají lasery s vlnovou délkou 1062 nm, které fungují buď v pulzním nebo v kontinuálním režimu. [28]

Vláknové lasery jsou velmi vhodné pro průmyslové využití, hlavně kvůli nepřítomnosti některých mechanických komponentů, jako jsou zrcadla. Ta by jinak vedla ke ztrátám energie ve formě tepla, byla by náchylná na mechanické poškození a citlivá na teplotní změny a vibrace. Díky tomu jsou tyto lasery mechanicky odolné a stabilní. [28]

Jednoduchá konstrukce vláknových laserů zajišťuje vysokou spolehlivost a odolnost proti poškození. Tyto lasery vynikají také kvalitou a koherencí laserového paprsku, což umožňuje jeho zaostření na velmi malé body. Díky použití velkoplošných diod mají vláknové lasery dlouhou životnost, která přesahuje 150 000 hodin provozu, a dosahují účinnosti kolem 25 až 30 %. Nízké energetické ztráty umožňují chlazení vláknových laserů pouze vzduchem, což snižuje náklady na jejich údržbu. Celkově vláknové lasery nabízejí nejnižší provozní náklady a nejvyšší kvalitu laserového paprsku. [28]



Obrázek 23 Princip aktivního vlákna

(zdroj: [28])

7.3 Výhody

- vysoká účinnost,
- vysoká životnost,
- rychlost,
- vysoká kvalita paprsku,
- vysoká spolehlivost,
- nízké náklady,
- možnost použití v pulzním nebo kontinuálním režimu,
- nevyžadují složité chlazení,
- nepotřebují nastavování rezonátoru a speciální optiku,
- nízké požadavky na údržbu,
- prostorová úspornost. [28; 30]

8 MOŽNOSTI ZNAČENÍ

V současné době se laserové značení stalo nepostradatelnou součástí moderní výroby. Tento proces kombinuje rychlost, odolnost a variabilitu. Využívá zaostřený laserový paprsek k vytvoření trvalých značek na různých typech povrchů. Když laserový paprsek dopadne na povrch materiálu, tak dochází ke změně jeho vlastností a vzhledu. Protože je paprsek zaměřen jen na konkrétní oblast, umožňuje to dosáhnout velmi přesných, kvalitních a kontrastních značek. Díky těmto vlastnostem jsou laserové zařízení ideální pro aplikace, kde se vyžaduje vysoká přesnost a trvanlivost značení. [23; 31]

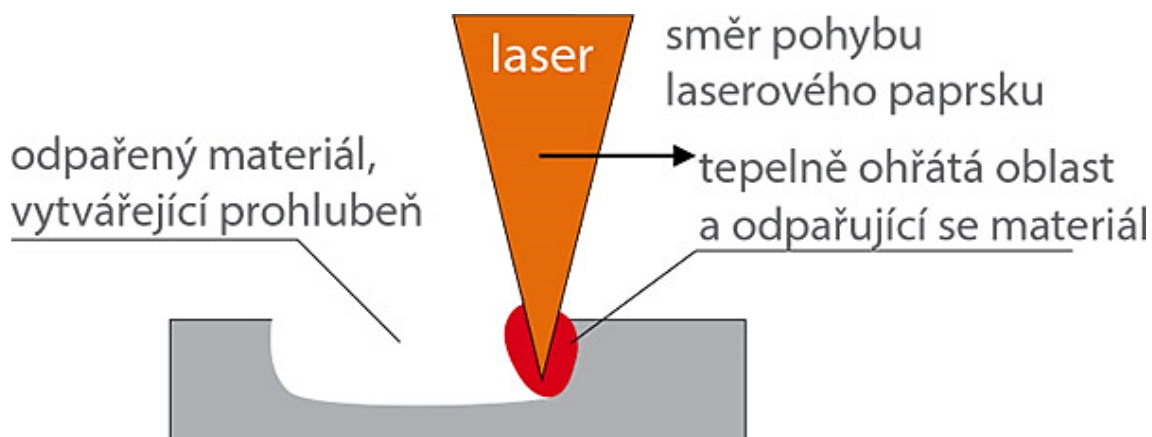
Laserové značení materiálu nabízí několik výhod oproti jiným metodám značení. Protože tento proces využívá nehmotný laserový paprsek pracující s určitou vlnovou délkou a nevyžaduje žádný mechanický zásah, není nutné upínat značený polotovar. To výrazně zkracuje čas potřebný pro nastavení. Navíc lze změnou vlnové délky laseru podpořit efektivnější absorpci paprsku materiálem, což zvyšuje kvalitu značení. [32; 33]

8.1 Procesy laserového značení

Laserové značení zahrnuje několik různých procesů, které umožňují přizpůsobit metodu značení specifickým požadavkům materiálu. Díky variabilitě těchto procesů lze dosáhnout optimální kvality a efektivity značení různých materiálů.

8.1.1 Gravírování

Gravírování je proces, kdy laserový paprsek odstraňuje část materiálu z povrchu což vytváří prohlubeň nebo stopu, tzv. gravuru. Hloubka gravury se pohybuje od 10 až 50 μm . Během tohoto procesu materiál absorbuje teplo z laseru, taví se a odpařuje se. Materiál také reaguje s kyslíkem ve vzduchu, což vede ke změně barvy a zvýrazňuje tak výslednou značku. Protože laserové gravírování nevyžaduje žádné spotřební materiály, jsou provozní náklady této techniky nižší ve srovnání s jinými metodami, které ke gravírování používají vrtáky nebo speciální inkousty. Tento proces je nejběžněji využíván v průmyslu a je vhodný pro širokou škálu materiálů, včetně kovů, plastů, kamene a keramiky. [33; 34; 35]



Obrázek 24 Gravírování

(zdroj: [33])

8.1.2 Žihání

Při žihání laserový paprsek lokálně ohřívá povrch kovu, čímž vytváří požadovanou značku. Toto lokální zahřátí způsobuje strukturální změny v materiálu, které vedou ke změně barvy povrchu. Během tohoto procesu se na povrchu materiálu tvoří vrstvy oxidace, které přispívají k barevnému vzhledu značení. Laserový paprsek proniká do hloubky pouze 20 až 30 μm pod povrch kovu. [34; 36]

Žihací laserové značení poskytuje trvalé a odolné výsledky, které jsou odolné vůči oděru. Tato metoda je široce využívána v různých odvětvích, jako je lékařství, stomatologie a automobilový průmysl. Tento typ značení je nejčastěji aplikován na železné kovy a příkladem použití je vytváření typových štítků pro identifikaci strojů. [34]



Obrázek 25 Barevné značení metodou žihání

(zdroj: [37])

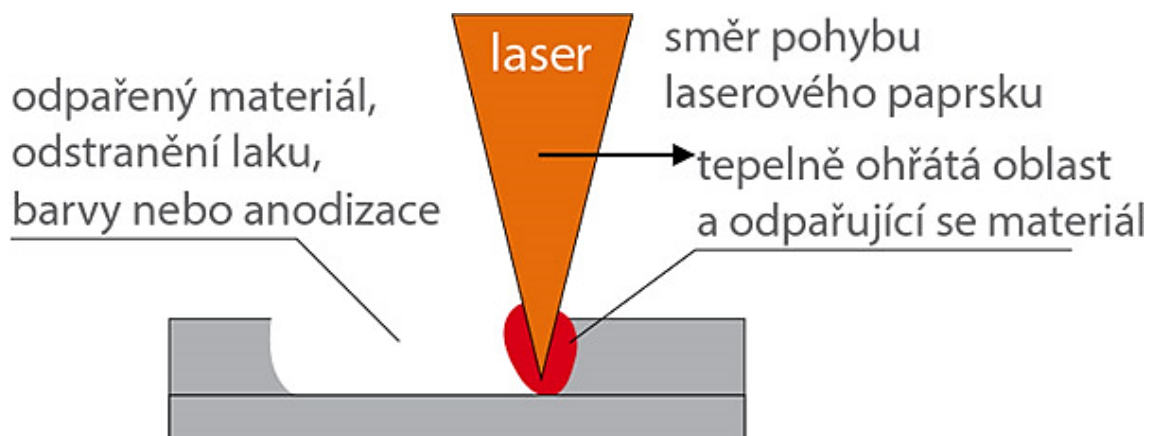
Tabulka 1 Barva získaná laserovým žháním specifickou teplotou.

Světle žlutá		200 °C
Slámově žlutá		220 °C
Zlatě žlutá		230 °C
Žlutohnědá		240 °C
Skořicově hnědá		250 °C
Hnědočervená		260 °C
Červená		270 °C
Fialová		280 °C
Tmavě modrá		290 °C
Chrpově modrá		300 °C
Světle modrá		320 °C
Břidlicově modrá		340 °C
Šedá		660 °C

(zdroj: [36])

8.1.3 Ablace

Ablace je metoda odstraňování materiálu z pevné látky pomocí laserového paprsku. Paprsek je absorbován povrchem materiálu, což vede k odpaření barvy na povrchu a vytváří tak kontrastní označení. Příkladem jsou eloxované štítky, kde se odstraní eloxovaná vrstva a odkryje se čistý hliníkový povrch pod ní. Tuto techniku lze využít různými typy laserů. [33; 38]



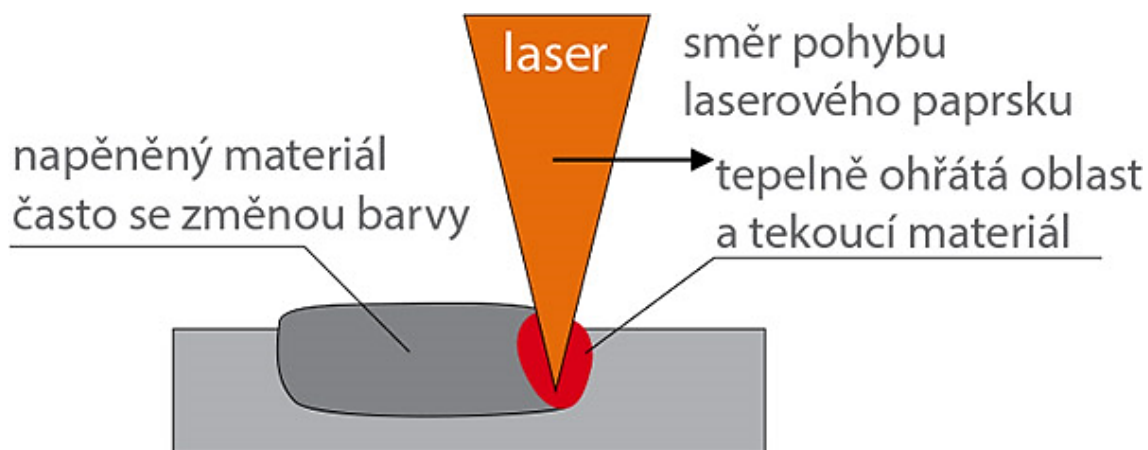
Obrázek 26 Ablace

(zdroj: [33])

8.1.4 Pěnění

Metoda laserového pěnění se používá k označování nejčastěji tmavých plastových materiálů. Laserový paprsek zahřívá materiál lokálně, což způsobuje jeho roztavení a následné uvolňování plynů. Plynové bubliny jsou pak zachyceny v rozteklém plastu a při ochlazení vytvářejí napěněnou strukturu nad povrchem. Bublinky mění vlastnosti lomu světla materiálu, díky čemuž zpracovaná místa vypadají světlejší než okolní materiál. Je důležité si uvědomit, že některé plyny uvolněné během procesu mohou být agresivní, škodlivé či hořlavé. [33; 39]

Laserové pěnění je hojně využíváno v různých průmyslových odvětvích, včetně letectví, automobilového průmyslu, stavebnictví, elektroniky a medicíny. Mezi typické aplikace patří výroba obalových a identifikačních štítků, automobilových dílů, klávesnic a elektronických součástek. [39]

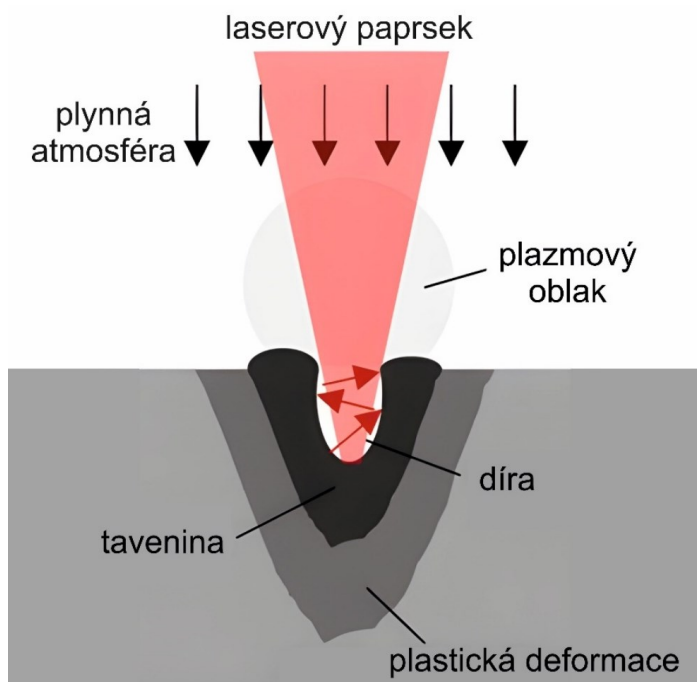


Obrázek 27 Pěnění

(zdroj: [33])

8.1.5 Karbonizace

Karbonizace neboli migrace uhlíku je ideální pro značení syntetických polymerů a organických materiálů. Tepelná energie z laseru při této metodě rozbíjí plastové vazby, což vede k uvolňování kyslíku a vodíku. Reakce má za následek ztmavnutí cílové oblasti a tvorbu šedých až modrošedých značek. Protože výsledná značka je šedá až modrošedá, karbonizace není ideální pro tmavé předměty. Důvodem je nízký kontrast mezi označenou částí a zbytkem materiálu, což může ztěžovat čtení značky. Karbonizace se proto nejčastěji využívá při značení dřeva, papíru a kůže. [34]

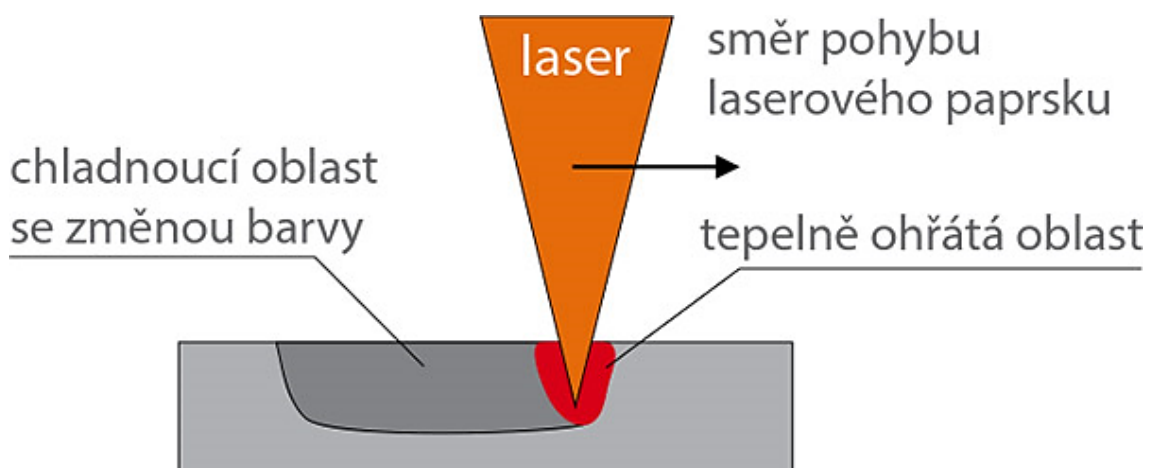


Obrázek 28 Karbonizace

(zdroj: [40])

8.1.6 Fotochemický proces

Při působení laseru dochází ke změně barvy materiálu, aniž by se odpařil nebo napěnil. Mění se pouze jeho barva. Tento jev lze pozorovat jak u plastů, tak u kovů. Například na povrchu nerezové oceli je možné dosáhnout celé palety barev od modré přes červenou až po žlutou. U plastů lze tento efekt zesílit použitím pigmentů náchylných na laserový paprsek. [33]



Obrázek 29 Fotochemický proces

(zdroj: [33])

8.2 Studie zaměřené na laserové značení nerezových ocelí

Při laserovém značení kovových materiálů dochází k působení vysoké teploty, která vyvolává oxidaci povrchové vrstvy. Tento princip umožňuje vytvořit trvalé značení bez přímého kontaktu s obrobkem. Technologie je ceněna zejména pro svou čistotu, rychlost provedení a minimální potřebu lidského zásahu. Výsledné značky jsou trvalé a slouží především k identifikaci výrobků. Z hlediska laserového značení kovů je zásadním požadavkem dosažení čisté a kvalitní značky. [41]

Podle článku od Pandeye a Doloie má největší vliv na intenzitu a šířku značení výkon laseru, který přímo ovlivňuje míru oxidace na povrchu materiálu. Při zvýšení výkonu až na 50 W dochází k přehřívání okolí značené oblasti a k degradaci vizuální kvality značení. Jako optimální se ukázal výkon 20 W v kombinaci s frekvencí 120 kHz a rychlostí značení kolem 30 mm/s. Tato konfigurace byla realizována na povrchu nerezové oceli AISI 304, a to v rámci jednoho průchodu laserového paprsku. Značení bylo hodnoceno jako rychlé, čitelné a s minimálním tepelným ovlivněním okolního povrchu. [41]

Tutins, Adijans, Jankov a Bikovs se ve své studii zaměřili na drsnost povrchu a barevné značení stejného materiálu. Prokázali, že frekvence pulzů výrazně ovlivňuje výsledný barevný odstín značení. Dále došli k závěru, že zvýšení rychlosti vede ke snížení drsnosti povrchu, což se projevuje změnou barevného odstínu značení. Je potřeba podotknout, že uvedené závěry byly dosaženy při rychlostech značení v rozsahu 5–200 mm/s. Nízká frekvence (například 50 kHz) produkovala méně syté odstíny, zatímco zvýšení frekvence až na 300 kHz vedlo k výraznějším, homogenním a kontrastnějším barvám, jako je modrá nebo duhová. [42]

Obě studie potvrzují, že při značení nerezové oceli vláknovým laserem v jednom průchodu lze kvalitu značení výrazně ovlivnit optimalizací výkonu, frekvence a rychlosti skenování. Zvláště vhodné se ukazuje použití výkonu 20W v kombinaci s vyšší frekvencí a střední rychlostí skenování pro dosažení vysoce čitelného, kontrastního nebo barevného značení.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

9 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tato práce si především klade za cíl vizuální hodnocení makroskopické a mikroskopické struktury povrchu ocelových materiálů. V práci byly stanoveny následující dílčí cíle:

- Navrhnout vhodné grafické podklady.
- Provést značení při různých podmínkách nastavení.
- Vyhodnotit získané výsledky.

Praktická část je zaměřena na realizaci experimentu pomocí vláknového laseru a následné zhodnocení kvality značení na různých typech ocelí. Úvodním krokem bylo vytvoření grafických návrhů ve formě matice 5x5 polí, které byl použit jako testovací motiv pro značení. Tento návrh umožnil systematické porovnání vlivu technologických parametrů.

Značení bylo provedeno na třech typech ocelových materiálů – 1.4301, 1.4401 a 1.1730. V každém případě byly použity dvě výkonové úrovně laseru a kombinace různých hodnot frekvence a rychlosti značení. Takto připravené vzorky byly dále analyzovány s cílem vyhodnotit barvu, strukturu, kvalitu a hloubku popisu.

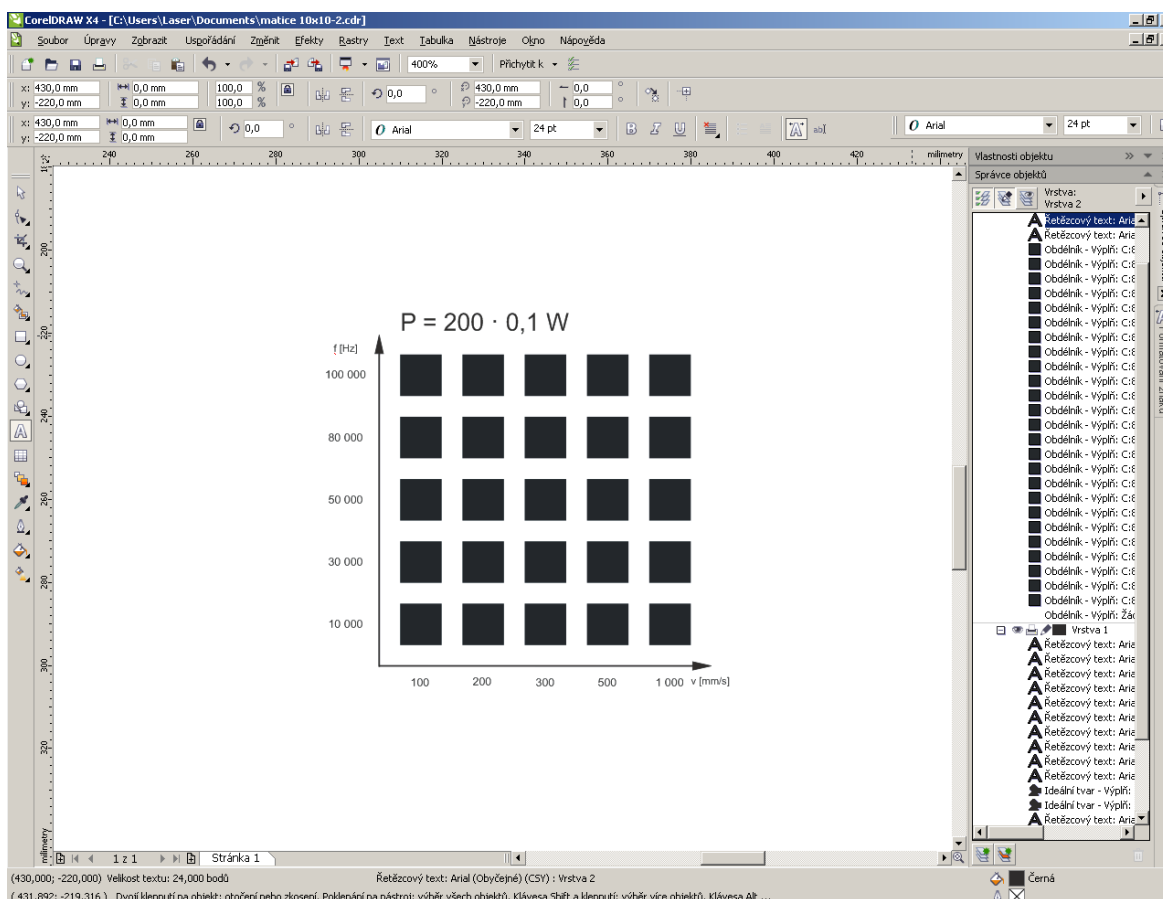
V následujících kapitolách jsou podrobně popsány jednotlivé kroky experimentu, použité zařízení, nastavení parametrů a porovnáním výsledků.

10 NÁVRH GRAFICKÝCH PODKLADŮ

V rámci návrhu a ověřování procesních parametrů laserového popisu byly vytvořeny dvě různé grafické matice ve vektorovém editoru CorelDRAW. Matice slouží jako podklady pro vyhodnocení vlivu rychlosti značení a frekvence pulzů:

- matice o rozměru 100x100 mm pro plechové vzorky (1.4301 a 1.4401),
- matice o rozměru 70x70 mm pro blok nástrojové oceli (1.1730).

Podklady jsou určeny hlavně jako vizuální předloha výsledného značení. Řídící software WMark totiž nepodporuje práci v hladinách ani hromadné přiřazení parametrů skupině objektů. Proto byl každý čtverec z matice importován samostatně a každému z nich byly individuálně přiřazeny hodnoty výkonu, frekvence a rychlosti značení.



Obrázek 30 Pracovní prostředí softwaru CorelDRAW

(zdroj: vlastní)

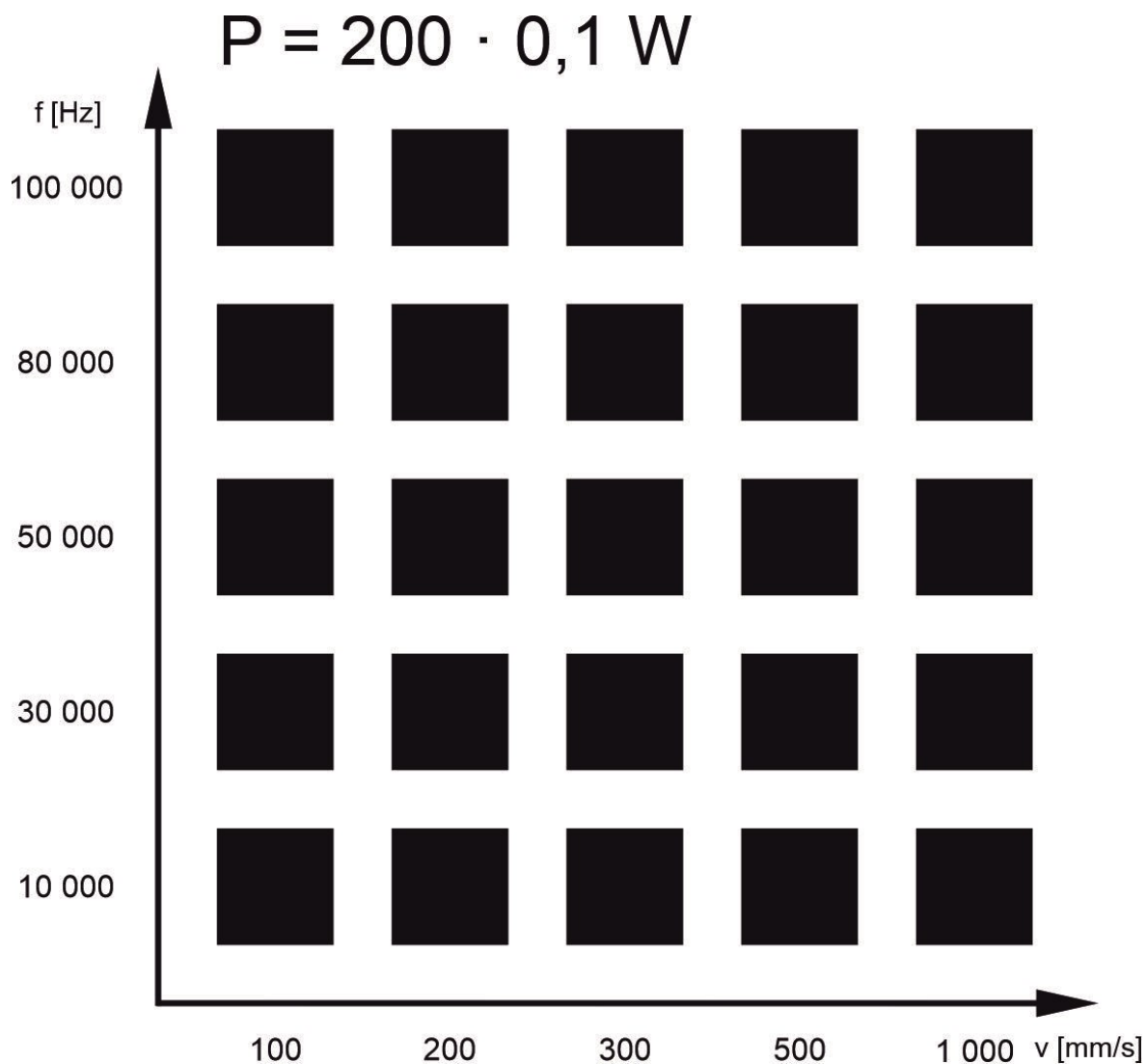
10.1 Vytvoření testovací matice 100x100 mm

Primárně bylo nutné vytvořit dvě samostatné verze matice, a to pro dvě hodnoty výkonu. Po otevření CorelDRAW a založení nového dokumentu v režimu CMYK s milimetrovými jednotkami byly nejprve vytvořeny pomocné osy souřadnic. Osy X a Y byly nakresleny nástrojem **Čára** o tloušťce 0,3 mm, přičemž konce os byly opatřeny šipkami přímo z horní palety **Šipka na konci**. Pomocné osy sloužily k přesnému umístění jednotlivých čtverců matice podle daných parametrů.

Pro vizualizaci byla následně do pracovní plochy vytvořena matice 5x5 čtverců. Každý čtverec o velikosti 10x10 mm byl vytvořen nástrojem **Obdélník** a vyplněn černou barvou. Pomocí příkazu **Kopírovat** byly čtverce duplikovány ve vodorovném i svislém směru a umístěny s odsazením 5 mm. První řada a první sloupec čtverců jsou odsazeny od os o 4 mm, aby vznikl dostatečný prostor.

Popisky byly vytvořeny nástrojem **Text** písmem Arial, výškou znaku 2 mm a černou barvou. Pod sloupce matice byly umístěny hodnoty rychlosti značení (100; 200; 300; 500; 1000 mm/s) a vedle řádků hodnoty frekvence pulzů (10 000; 30 000; 50 000; 80 000; 100 000 Hz), přičemž všechny texty byly zarovnány 2 mm od příslušné osy. Ke každé ose navíc byly vytvořeny popisky f (Hz) na ose Y a v (mm/s) na ose X, umístěné v blízkosti šipek.

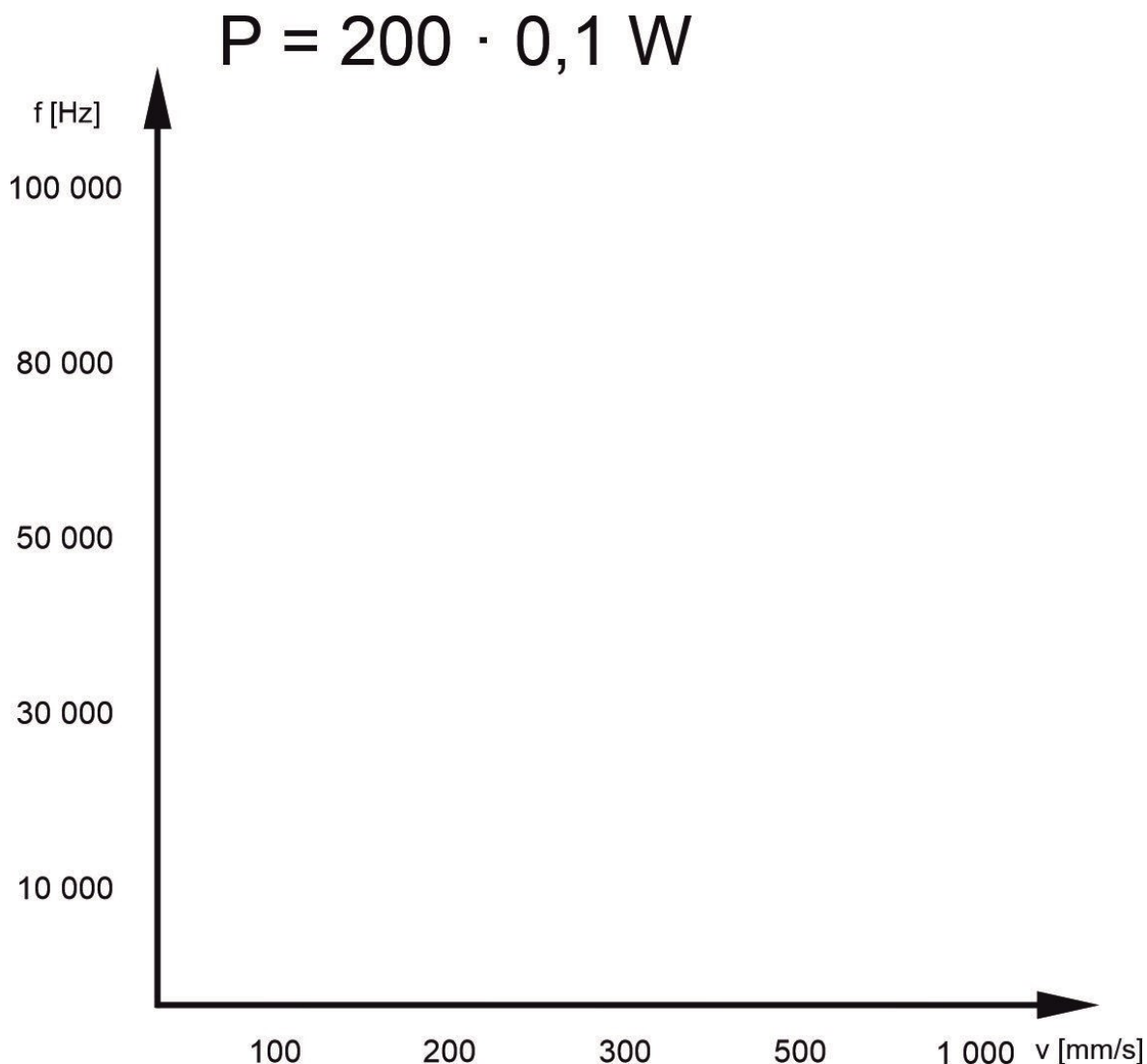
Nakonec byl do hlavičky matice vložen text s hodnotami výkonu. Bylo vybráno písmo Arial s výškou znaku 4 mm a černou barvou. Text byl pak zarovnán 5 mm od osy Y a umístěn 5 mm nad horním řádkem čtverců.



Obrázek 31 Testovací matice 100x100 mm s výkonem pro vizuální představu

(zdroj: vlastní)

Vzhledem k nutnosti vkládat do řídicího softwaru WMark každý čtverec samostatně byly z původních podkladů odstraněny všechny vizuální čtverce a exportovány pouze osy s hodnotami, popisky a údaji o výkonu. Po dokončení tohoto kroku byly soubory pro výkony 20 W a 15 W uloženy do bitmapového formátu BMP s rozlišením 300 DPI pod názvy *matice-10x10-P20.bmp* a *matice-10x10-P15.bmp*.



Obrázek 32 Výsledný grafický podklad exportovaný do BMP

(zdroj: vlastní)

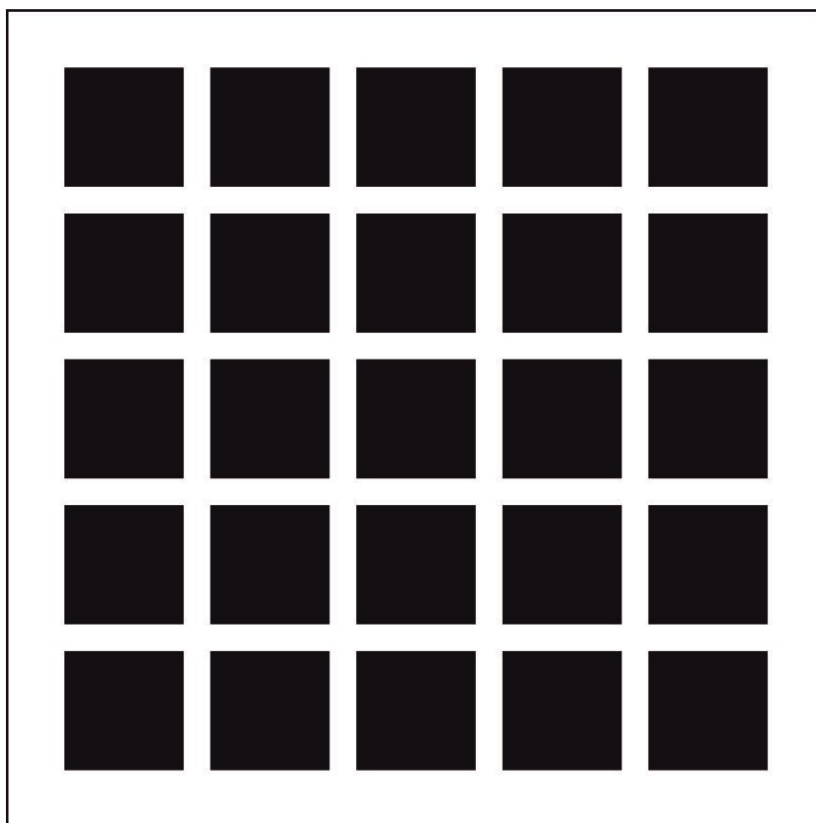
10.2 Vytvoření testovací matice 70x70 mm

Pro blok nástrojové oceli 1.1730 bylo nutné vytvořit samostatnou matici pro rozměr 70x70 mm. Po otevření CorelDRAW a založení nového dokumentu v režimu CMYK s milimetrovými jednotkami bylo nejprve vymezeno pracovní pole.

Matice se skládá z 5x5 čtverců, mezi kterými je vodorovné i svislé odsazení 2,5 mm. Každý čtverec byl nakreslen nástrojem **Obdélník** s černou výplní. Pomocí příkazu **Kopírovat** pak proběhlo duplikování řady čtverců ve vodorovném i svislém směru.

Z důvodu zachování dostatečné velikosti jednotlivých čtverců (10x10 mm) a omezeného prostoru nebyly do této matice přidány osy ani textové popisky frekvence a rychlosti. Tím se zajistilo, že každý čtverec má stejný rozměr a lze porovnávat mezi

ostatními materiály. Tato matice sloužila především pro vizuální představu rozmístění před importem jednotlivých čtverců do řídicího softwaru.



Obrázek 33 Testovací matice 70x70 mm pro vizuální představu

(zdroj: vlastní)

10.3 Vytvoření vzorového čtverce

Jak již bylo zmíněno, řídicí software WMark neumožňuje práci v hladinách, a proto musely být čtverce vkládány jednotlivě. Vzorový čtverec byl vytvořen stejným postupem jako v maticích, a to pomocí nástroje **Obdélník** s rozměry 10x10 mm a černou výplní. Následně byl soubor exportován do formátu BMP s rozlišením 300 DPI pod názvem **vzorek.bmp**.

11 VLÁKNOVÝ LASER (LFQ20-T)

Pro realizaci experimentálního značení byla použita stolní popisovací stanice LFQ20-T vybavená Q-spínaným vláknovým laserem o výkonu 20 W. Zařízení je součástí řady LASERfibre LF-t, která využívá diodami čerpané ytterbiové lasery. Tyto lasery se vyznačují vysokou účinností, nízkými provozními náklady a bezúdržbovým provozem díky vzduchovému chlazení a absenci výměnných dílů. [43]

Stanice má kompaktní provedení a je určena pro manuální vkládání a ustavení dílů. Vybavena je motorizovaným vertikálním posuvem a dvoupolohovým karuselem s kalibrovanými otvory pro přesné umístění přípravků. Pracovní stůl má šířku 520 mm a umožňuje přesné ustavení vzorků v rámci popisovacího pole o rozměru 160x160 mm. [43]

Součástí systému je řídicí software WMark pro nastavování parametrů popisu a návrh grafických objektů v prostředí Windows. Stanice umožňuje vytvářet jemné a přesné popisy, které nacházejí využití jak v průmyslových aplikacích, tak i v reklamní sféře. [43]



Obrázek 34 Vláknový laser LFQ20-T

(zdroj: [43])

Tabulka 2 Technické parametry vláknového laseru LFQ20 – T

TECHNICKÉ PARAMETRY LASERU			
Laser Typ: Vlnová délka: Způsob čerpání: Výkon: Spínání laseru: Energie na 1 puls: Frekvence: MTBF laserových diod:	Vláknový ytter-biový laser 1064 nm Čerpání laserovými diodami Max. 20 W Pulsy 100 ns 1 mJ 2–200 kHz > 100 000 hodin	Vychylovací hlava Princip: Typ: Rychlost popisu: Rozlišení: Opakovatelná přesnost: Fokusační optika Pracovní pole: Šířka stopy: Chlazení	Galvanometrické vychylování svazku v ose X a Y Rychlé vychylovače 0–4000 mm/s 2 µm 25 µm 160x160 mm 0,05 mm Přímé aktivní vzduchové chlazení
TECHNICKÉ PARAMETRY LASERfibre stolní stanice LFQ – 20T			
Řízení systému Interní: Hlavní řídicí PC: Monitor: Síť:	Řídicí systém kontroluje a nastavuje veškeré provozní parametry laseru Průmyslové PC LCD displej, 19“ Ethernet 1000	Vertikální posuv Typ: Řízení: Zdvih:	Lineární posuv, krokový motor Elektronické, výška se zadává v mm Max. 200 mm
Software Operační systém: Návrhový SW: Řídicí SW:	Windows 7 CorelDRAW CZ WMark	Ostatní parametry Napájení: Příkon: Krytí: Rozměry: Rozměry kabiny: Hmotnost: Provozní podmínky:	230 V, 50 Hz 300–600 W IP54 600x640x680 mm 520x305x390 mm 56 kg Teplota 15–33°C, nekondenzující vlhkost

(zdroj: [43])

12 POUŽITÉ MATERIÁLY

V praktické části byly využity tři druhy ocelí, které se běžně uplatňují v technické praxi. Nerezové oceli 1.4301 a 1.4401 byly dodány ve formě nařezaného plechu o rozměrech 200x200 mm, zatímco nástrojová ocel 1.1730 byla použita ve formě bloku. Jednotlivé materiály se liší chemickým složením, strukturou i technologickými vlastnostmi. Každý z nich je dále v této kapitole popsán z hlediska složení, vlastností a oblastí typického využití.

12.1 Nerezová ocel 1.4301

Prvním použitým materiálem pro experimentální značení byla nerezová ocel 1.4301, známá také jako AISI 304 nebo ČSN 17240. Jedná se o austenitickou chromniklovou ocel s dobrou odolností proti korozi v přírodních podmínkách, jako je voda a vlhkost – za předpokladu, že neobsahují sůl nebo chlor. Materiál lze efektivně upravovat pomocí běžných mechanických metod, jako je broušení, kartáčování nebo leštění až do vysokého lesku. [44]

Ocel je nemagnetická a má široké uplatnění napříč různými průmyslovými odvětvími. Běžně se využívá při výrobě kontejnerů, nádrží, dřezů a výfukových systémů. Uplatnění nachází také v nábytkářství, architektuře, strojírenství a chemickém průmyslu. [44]

Tabulka 3 Chemické složení materiálu 1.4301 (dle DIN EN 10088-3)

Prvek	Obsah [%]
C	≤ 0,07
Si	≤ 1,00
Mn	≤ 2,00
P	≤ 0,045
S	≤ 0,030
N	≤ 0,10
Cr	17,5 – 19,5
Ni	8 – 10,5

(zdroj: [44])

Tabulka 4 Fyzikální vlastnosti materiálu 1.4301 (při 20 °C)

Vlastnost	Hodnota
Hustota	7,9 kg/dm ³
Tepelná vodivost	15 W/m·K
Elektrický odpor	0,73 Ω·mm ² /m

(zdroj: [44])

12.2 Nerezová ocel 1.4401

Druhým použitým materiálem pro značení byla nerezová ocel 1.4401, známá také jako AISI 316 nebo ČSN 17346. Jedná se o austenitickou chromnikl-molybdenovou ocel s dobrou korozní odolností v přírodních prostředích a v prostředí s nízkým obsahem chloridů. Materiál je vhodný pro teploty do 550 °C a díky své houževnatosti a kujnosti i pro použití při nízkých teplotách. Není však odolný vůči mořské vodě a mezikrystalové korozi. [45]

Tato ocel se využívá zejména v chemickém, stavebním, potravinářském, automobilovém a strojírenském průmyslu. Uplatnění nachází při výrobě potrubí, nádrží, architektonických prvků, tlakových zařízení nebo součástí, jako jsou hřídele a ventily. [45]

Tabulka 5 Chemické složení materiálu 1.4401 (dle DIN EN 10088-3)

Prvek	Obsah [%]
C	≤ 0,07
Si	≤ 1,00
Mn	≤ 2,00
P	≤ 0,045
S	≤ 0,030
N	≤ 0,10
Cr	16,5 – 18,5
Mo	2,00 – 2,50
Ni	10,0 – 13,0

(zdroj: [45])

Tabulka 6 Fyzikální vlastnosti materiálu 1.4401 (při 20 °C)

Vlastnost	Hodnota
Hustota	8,0 kg/ dm ³
Tepelná vodivost	15 W/m·K
Elektrický odpor	0,75 Ω·mm ² /m
Měrná tepelná kapacita	500 J/kg·K

(zdroj: [45])

12.3 Nástrojová ocel 1.1730

Třetím použitým materiálem byla uhlíková nástrojová ocel 1.1730, známá také pod označením ČSN 19 083. Ocel se vyznačuje dostatečnou tvrdostí základné vrstvy, vysokou houževnatostí a velmi dobrou odolností vůči kalicím trhlinám. V žíhaném stavu má dobrou obrobiteľnosť a při vyšších teplotách také dobrou tvárnosť. [46]

Materiál se běžně používá pro výrobu zámečnického a montážního nářadí, nástrojů pro obrábění dřeva, součástí forem, jako jsou základové desky, pouzdra, sloupky, dorazy či pružící prvky. Vhodná je rovněž pro zemědělské, kovářské a zednické nástroje. [46]

Tabulka 7 Chemické složení materiálu 1.1730 (dle DIN C45W)

Prvek	Obsah [%]
C	0,40 – 0,50
Mn	0,60 – 0,80
Si	0,15 – 0,40
P	≤ 0,035
S	≤ 0,035

(zdroj: [46])

13 EXPERIMENT

V této kapitole je popsán postup laserového značení na dvou typech kovových vzorků. U plechových destiček o rozměru 100x100 mm byly testovány frekvence 10 000; 30 000; 50 000; 80 000 a 100 000 Hz a rychlosti značení 100; 200; 300; 500 a 1 000 mm/s. Masivní blok o ploše 70x70 mm prošel značením při frekvencích 10 000; 20 000; 30 000; 40 000 a 50 000 Hz a rychlostech 100; 200; 300; 400 a 500 mm/s, přičemž každý vzorek byl zpracován při dvou rozdílných výkonech laseru (15 W a 20 W). Různé rozsahy rychlostí a frekvence byly zvoleny kvůli rozdílné tloušťce a tepelné kapacitě vzorků.

13.1 Postup práce s nerezovou ocelí (1.4301, 1.4401)

Nejprve byl ocelový plech nařezán na čtvercové destičky o rozměru 100x100 mm. Následovalo změření tloušťky materiálu. Pro ocel 1.4301 byla naměřena tloušťka 1,5 mm, a pro ocel 1.4401 pak 1 mm. Pro zajištění optimální kvality byly všechny destičky pečlivě odmaštěny technickým lihem, čímž se odstranily veškeré mastnoty a nečistoty, které by mohly ovlivnit práci laseru. Takto připravený vzorek byl pak umístěn na předem vyznačené pole do pracovní oblasti laserového systému.



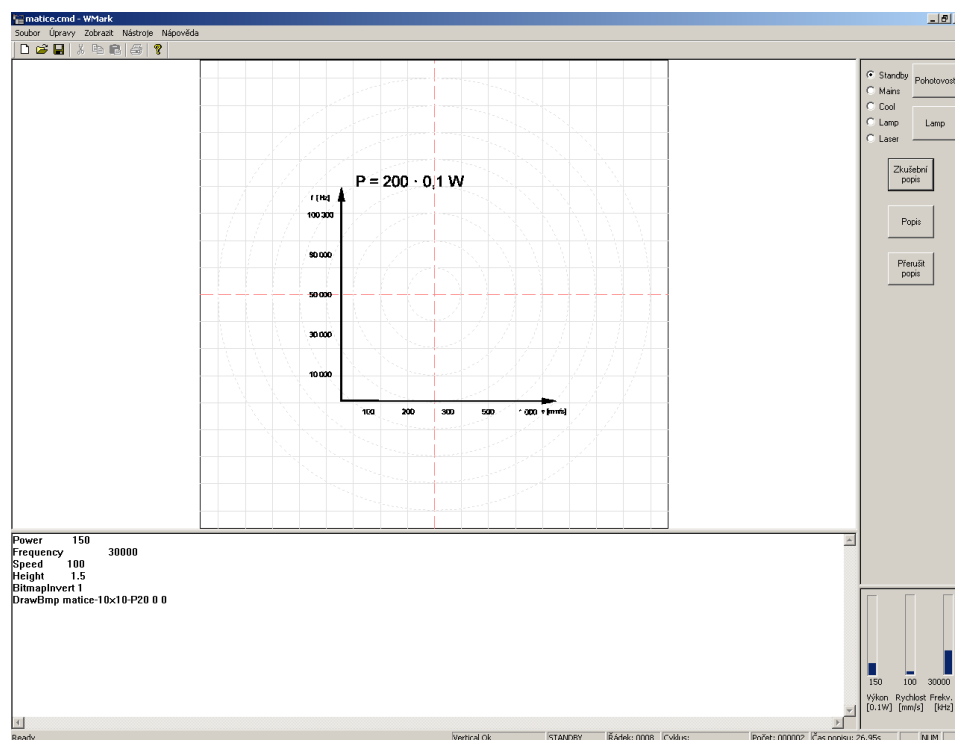
Obrázek 35 Pracovní plocha laseru LFQ20-T

(zdroj: vlastní)

Poté bylo otevřeno prostředí softwaru WMark, kde byl sestaven první řídicí program. V něm bylo třeba zvolit hodnoty výkonu (**Power [0,1W]**), frekvence (**Frequency [Hz]**) a rychlosti značení (**Speed [mm/s]**). Tyto parametry byly zvoleny na základě zkušebních testů tak, aby byla zajištěna co nejlepší viditelnost značek. Následně byla nadefinována výška materiálu (**Height [mm]**). Poté byl aktivován příkaz **BitmapInvert 1**, který zajistil vykreslení černých bodů bitmapy. Vložení bitmapového souboru pak bylo provedeno pomocí příkazu **DrawBMP <název souboru [.bmp]> X Y**, přičemž hodnoty X a Y určují přesnou polohu popisu. Celkový řídicí program pro ocel třídy 1.4301 vypadal takto:

```
# Vykreslení rastrové předlohy ve formátu BMP
Power          150
Frequency       30000
Speed          100
Height         1.5
BitmapInvert    1
DrawBMP        matice-10x10-P20      0      0
```

Po dokončení sestavení řídicího programu bylo nejprve kliknuto na tlačítko **Zkušební popis** pro vizualizaci průběhu značení. Po dokončení zkušebního popisu byl pak program spuštěn tlačítkem **Popis**, přičemž samotné značení trvalo necelých 27 vteřin.



Obrázek 36 Pracovní prostředí softwaru WMark

(zdroj: vlastní)

Tvorba druhého programu proběhla obdobně jako v případě prvního, lišila se však nahrazením bitmapy *matice-10x10-P20.bmp* za jednoduchou bitmapu *vzorek.bmp* zobrazující jediný čtverec. Pro čtverec byly pak zvoleny konkrétní hodnoty výkonu, rychlosti, frekvence pulzů a zároveň upravena jeho pozice v rámci pole. Po zadání parametrů byl program spuštěn tlačítkem **Popis**, čímž došlo k vypálení jednoho čtvercového vzorku na připravenou destičku. Tento cyklus se opakoval s různými kombinacemi frekvence, rychlosti a souřadnic, dokud nebyla vytvořena celá matice o 25 čtvercích.

Po dokončení značení byla destička vyjmuta z laseru. Druhá strana destičky pak byla důkladně odmaštěna a opět umístěna do pracovního pole neznačenou stranou nahoru. V softwaru WMark byl upraven výkon laseru na druhou hodnotu a celý proces značení se zopakoval. Stejný postup byl pak aplikován i na další materiál s odlišnou tloušťkou.

13.2 Postup práce s nástrojovou ocelí (1.1730)

Proces probíhal velmi podobně jako u plechových vzorků. Nejprve byla změřena výška bloku, která činila 17 mm. Poté byl blok očištěn technickým lihem a následně umístěn do středu laserové komory na pracovní pole o rozměrech 70x70 mm.

V prostředí WMark byl sestaven řídicí program, ve kterém byla nastavena výška materiálu, tedy 17 mm a aktivován příkaz **BitmapInvert 1**. Pomocí příkazu **DrawBMP** byl do pracovního pole načten soubor *vzorek.bmp*. Pro každý čtverec v matici pak byla postupně zadána unikátní kombinace frekvence (10 000; 20 000; 30 000; 40 000; 50 000 Hz) a rychlosti (100; 200; 300; 400; 500 mm/s). Zároveň před značením každého čtverce byly upraveny i jeho souřadnice X a Y, aby značení proběhlo na správném místě.

Program se vždy spustil přímo tlačítkem **Popis**, čímž se okamžitě aplikovala zvolená kombinace parametrů. Po dokončení značení 25 čtverců byl blok vyjmut, odmaštěn z druhé strany a znovu vložen do laseru neznačenou stranou nahoru. V dalším kroku se v softwaru změnil výkon a celý postup se zopakoval se stejnou maticí parametrů.

14 VIZUÁLNÍ A MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA POVRCHOVÉHO ZNAČENÍ

Tato kapitola se zaměřuje na porovnání značení provedeného vláknovým laserem na třech typech ocelí. Cílem je porovnat vliv zvolených parametrů na vizuální vzhled povrchu a na mikroskopickou strukturu vytvořeného značení.

14.1 Barva značení

V této části práce je hodnocena barevnost značení. Porovnání probíhá mezi dvěma úrovněmi výkonu, přičemž jsou sledovány rozdíly v intenzitě odstínu, kontrastu a celkové viditelnosti značených ploch.

14.1.1 Porovnání barevného značení na oceli 1.4301

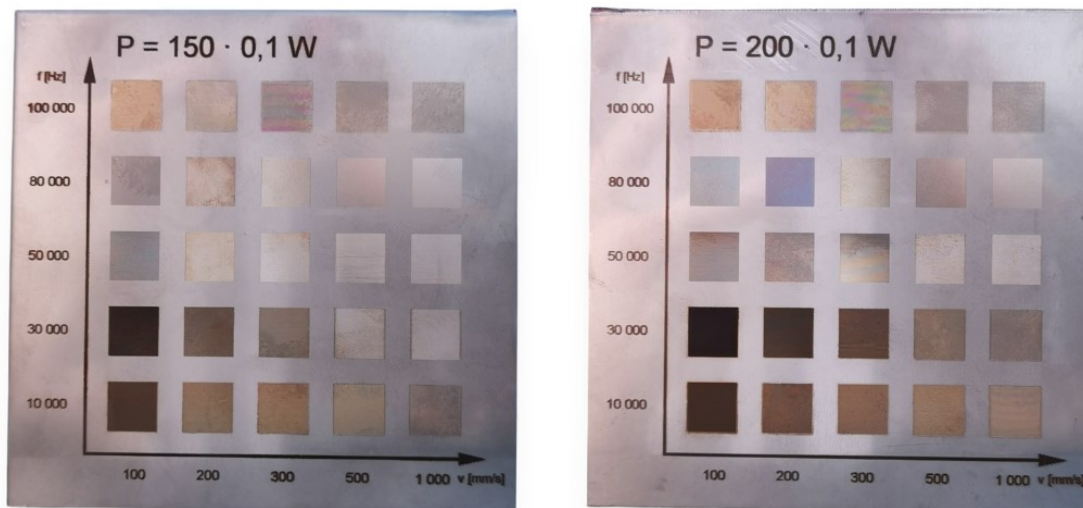
Při frekvenci 10 000 Hz jsou při výkonu 15 W pole převážně světlá s hnědým odstínem. Se zvyšující se rychlostí značení dochází k pozvolnému blednutí odstínu. Při výkonu 20 W jsou čtverce sytější, s teplejším nádechem a lepší viditelností. Barevný rozdíl mezi oběma výkony se nejvíce projevuje ve středních a vyšších rychlostech.

Při frekvenci 30 000 Hz jsou pole u 15 W převážně matná, s jemným nádechem do šeda nebo béžova. Při výkonu 20 W se značení zase projevuje sytějšími a teplejšími barvami.

Frekvence 50 000 Hz vykazuje u výkonu 15 W velmi světlé a méně kontrastní pole. Naopak při 20 W jsou barvy výraznější, s matným vzhledem a znatelnou stříbrnou nebo šedohnědou barvou. Barevné změny jsou zde lépe definované.

Při frekvenci 80 000 Hz je kontrast při 15 W opět velmi slabý a barvy nejsou příliš výrazné. Výkon 20 W přináší matnější stříbrné barvy s nádechem modré.

Nejvyšší frekvence 100 000 Hz vykazuje u 15 W opět jen velmi slabé zabarvení. Pole s nejvyšší rychlostí téměř splývají s povrchem a značení je hůře viditelné. Při 20 W je i zde výsledek tmavší, s jasnějším teplým odstínem a lepší celkovou čitelností. Vliv výkonu je tedy patrný i při vysoké frekvenci.



Obrázek 37 Porovnání vzhledu značení na oceli 1.4301 při výkonech 15 W a 20 W

(zdroj: vlastní)

14.1.2 Porovnání barevného značení na oceli 1.4401

Značení na oceli 1.4401 se celkově projevuje velmi podobně jako u materiálu 1.4401. V obou případech platí, že vyšší výkon 20 W vede k výraznějšímu zabarvení a lepší viditelnosti značených ploch napříč celým rozsahem frekvencí i rychlostí. U nižšího výkonu 15 W jsou odstíny zpravidla světlejší, s nižším kontrastem, a v některých oblastech může být značení málo čitelné nebo málo výrazné. Podobně jako u oceli 1.4301 se rozdíl mezi výkony nejvíce projevuje při frekvencích 30 000 až 80 000 Hz, kde je kontrast u 20 W více zřetelný a barevnost výrazná, zatímco u 15 W značení působí tlumeně.



Obrázek 38 Porovnání vzhledu značení na oceli 1.4401 při výkonech 15 W a 20 W

(zdroj: vlastní)

14.1.3 Porovnání barevného značení na oceli 1.1730

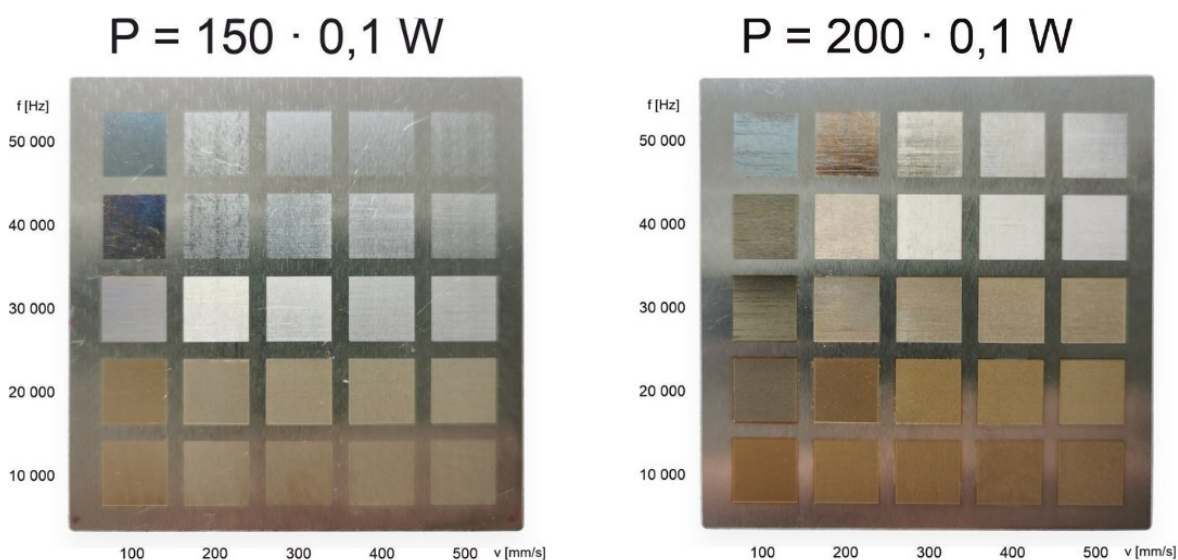
V první řadě (frekvence 10 000 Hz) jsou rozdíly mezi oběma výkony patrné hlavně v barevnosti. Zatímco u 15 W mají pole matnější a světlejší odstín, při 20 W jsou tóny tmavší, s nádechem do zlaté. Rozdíl se zvyšuje s rychlostí.

Ve druhé řadě (frekvence 20 000 Hz) je trend podobný. U 15 W zůstávají pole poměrně světlá, jen s jemnými odchylkami odstínu. Při 20 W už mají čtverce sytější odstíny, hlavně ve střední části (rychlosti 200–300 mm/s), kde značení působí jako rovnoměrně probarvené plochy s lehkým leskem.

Třetí řada (frekvence 30 000 Hz) přináší největší kontrast. U 15 W mají některé plochy výrazný šedý nebo až stříbrný vzhled. U 20 W se ale značení projevuje hlubší barevností, zvláště pole při 300 a 400 mm/s mají tmavě zlatavý až lehce bronzový nádech.

Čtvrtá řada (frekvence 40 000 Hz) vykazuje u výkonu 15 W spíše světlejší odstíny s nízkým kontrastem, přičemž barva působí neutrálně a méně výrazně. Při výkonu 20 W jsou plochy znatelně sytější a mají teplejší odstín. Při tomto výkonu rychlost 100 mm/s vykazuje modré až fialové zbarvení. Rozdíl mezi výkony je v této řadě dobře patrný napříč většinou rychlostí.

Pátá řada (frekvence 50 000 Hz) ukazuje jasný rozdíl. U výkonu 15 W jsou pole velmi světlá a méně nerozeznatelná. Naproti tomu u 20 W mají čtverce zřetelnou tmavší a matnou barvu, zejména v nižších rychlostech značení.



Obrázek 39 Porovnání vzhledu značení na oceli 1.1730 při výkonech 15 W a 20 W

(zdroj: vlastní)

14.2 Mikroskopická struktura značení

Tato část práce se zaměřuje na porovnání mikroskopických struktur povrchu vzniklých při značení vláknovým laserem o výkonech 15 W a 20 W. Výsledné stopy byly zkoumány pomocí optického mikroskopu s přiblížením na 200 μm a vizuálně porovnány z hlediska tvaru, rozložení a celkového dojmu ze struktury. Cílem bylo pozorovat rozdíly ve výsledné struktuře v závislosti na změně výkonu a použití materiálu.

14.2.1 Analýza struktury značení na oceli 1.4301

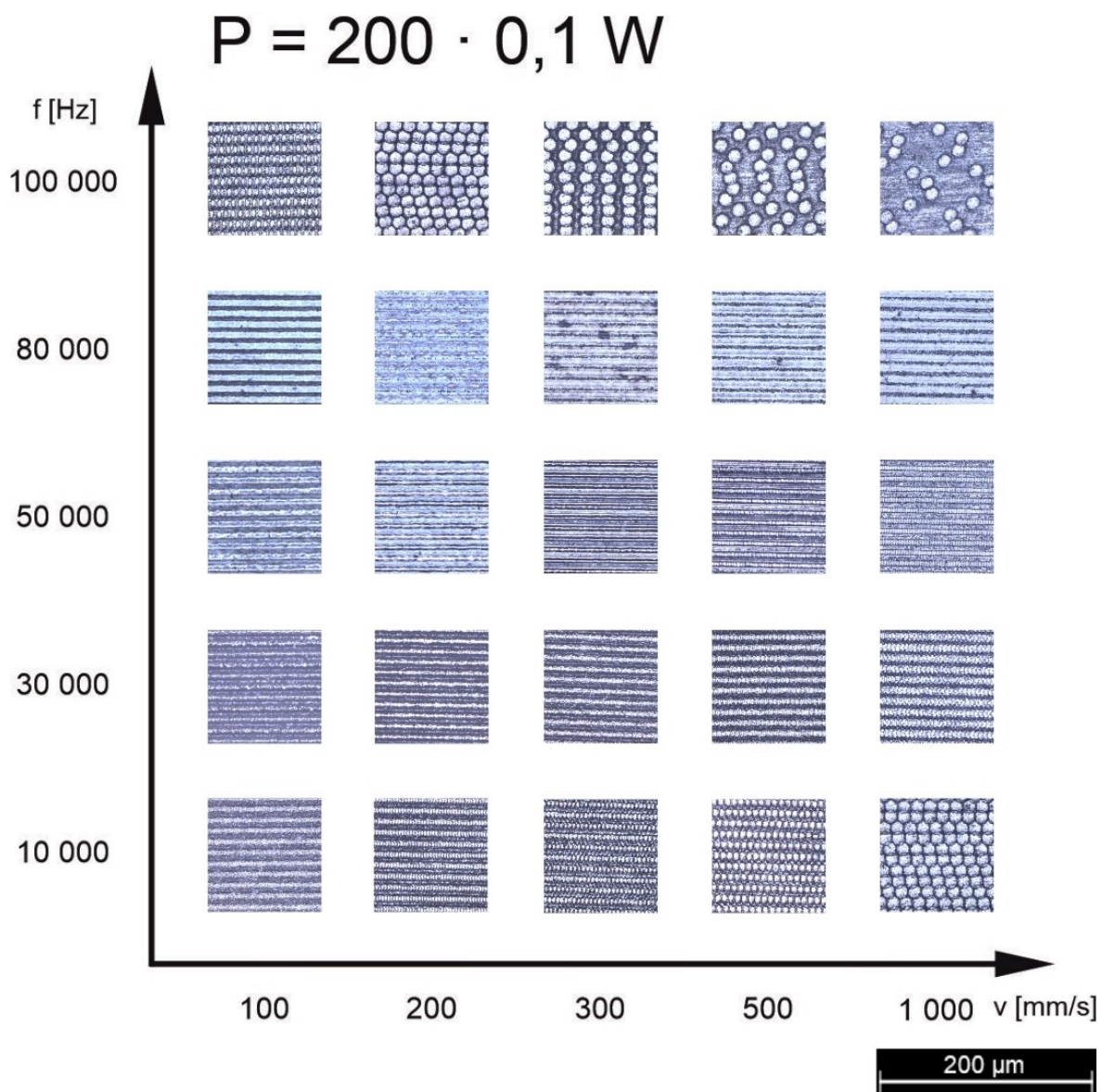
U tohoto materiálu bylo vypořádováno, že při frekvenci 10 000 Hz a nižších rychlostech značení (100–300 mm/s) vznikají pravidelné struktury, kde jednotlivé dráhy laseru zanechávají dobře oddělené stopy. Při výkonu 20 W působí tyto dráhy trochu ostřeji než u výkonu 15 W, což lze přisoudit vyšší energii dodané na povrch. Se zvyšující se rychlostí (500–1000 mm/s) se jednotlivé stopy postupně mění v bodovou texturu. U vyššího výkonu zůstávají body výraznější, zatímco při nižším výkonu dochází k jejich rozostření a ztrátě pravidelnosti.

Při frekvenci 30 000 Hz se zvyšuje hustota pulzů na dráze, což vede k jemnější textuře značení. Při výkonu 20 W je textura celistvější, pravděpodobně v důsledku lepšího překrytí jednotlivých pulzů. Vyšší rychlosti přecházejí opět do bodové struktury.

Při frekvenci 50 000 Hz je rozdíl mezi strukturou značení při výkonech 15 W a 20 W poměrně výrazný, zejména při nižších rychlostech značení (100–200 mm/s). U výkonu 15 W působí textura v tomto rozsahu nejednotně a neuspořádaně. Tento efekt může souviset s tím, že pulzy mají při tomto výkonu nižší energii, která nestačí k vytvoření souvislé linie. Oproti tomu při výkonu 20 W je povrch značení výrazně rovnoměrnější. Při rychlostech 500 až 1000 mm/s se u obou výkonů začíná struktura jemně rozpadat a přechází zpět do bodového charakteru.

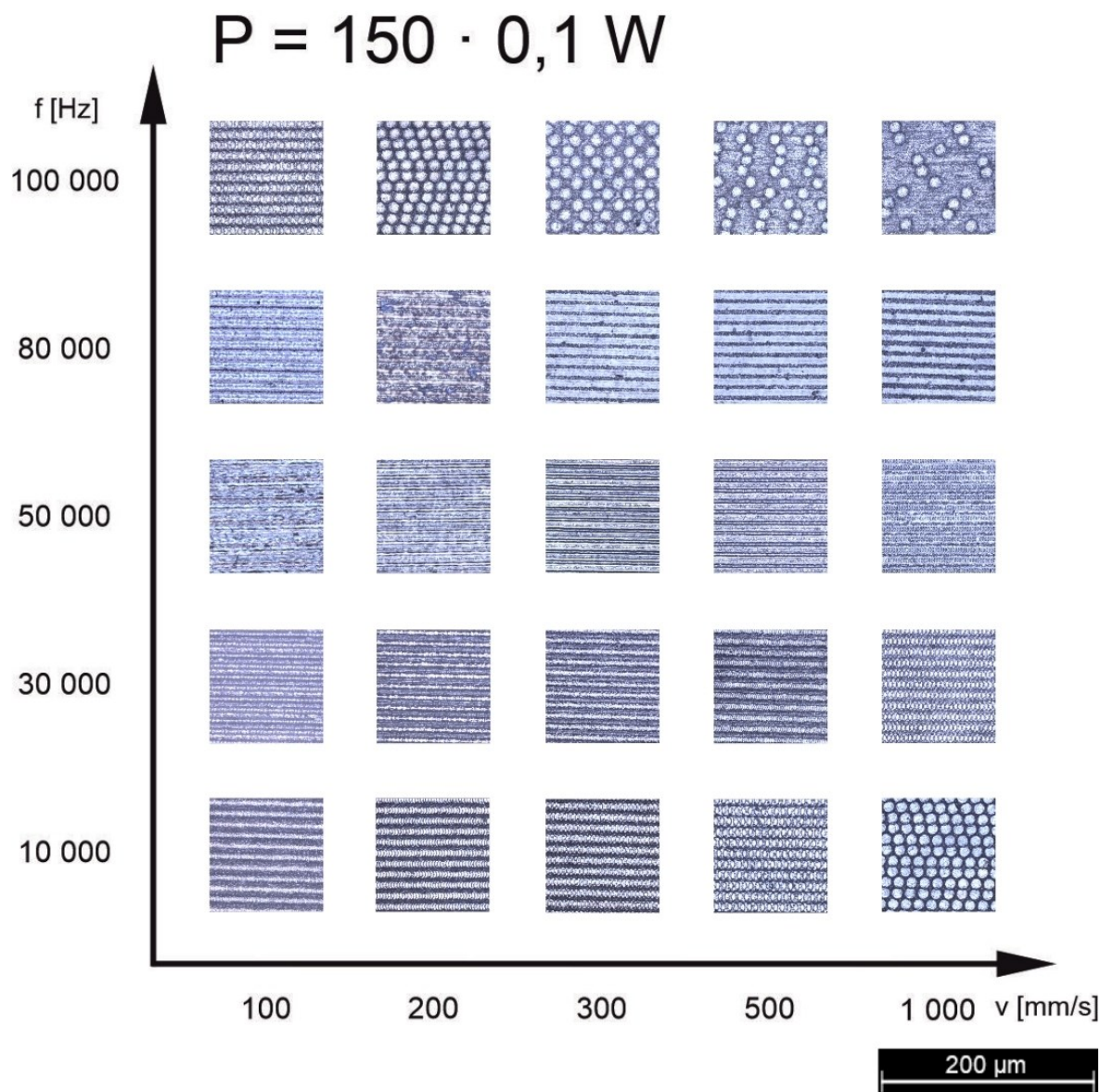
Při frekvenci 80 000 Hz dochází k jemnému narušení ostrosti struktur, zvláště při nižším výkonu. Při výkonu 15 W a nižších rychlostech značení (100–300 mm/s) je povrch nepravidelný, místy rozpitý a působí nejednotně. Značení zde postrádá jasnou strukturu a nelze jednoznačně rozeznat jednotlivé dráhy. Při vyšších rychlostech (500–1000 mm/s) jsou struktury u obou výkonů na první pohled podobné, ale významný rozdíl je v šířce stopy. Zatímco při výkonu 20 W jsou stopy úzké, při výkonu 15 W jsou širší.

Nejvyšší frekvence 100 000 Hz vytváří především bodové struktury, které se liší v závislosti na rychlosti značení a výkonu. Při nižších rychlostech (100–300 mm/s) vznikají pravidelné bodové vzory, které jsou při 20 W ostřejší a výraznější. Při nejvyšší rychlosti značení dochází u obou výkonů k úplnému rozpadu struktury na jednotlivé body. Je taky patrné, že u výkonu 20 W jsou tyto body větší a výraznější než u 15 W.



Obrázek 40 Mikroskopický detail značení pro materiál 1.4301 při výkonu 20 W

(zdroj: vlastní)



Obrázek 41 Mikroskopický detail značení pro materiál 1.4301 při výkonu 15 W

(zdroj: vlastní)

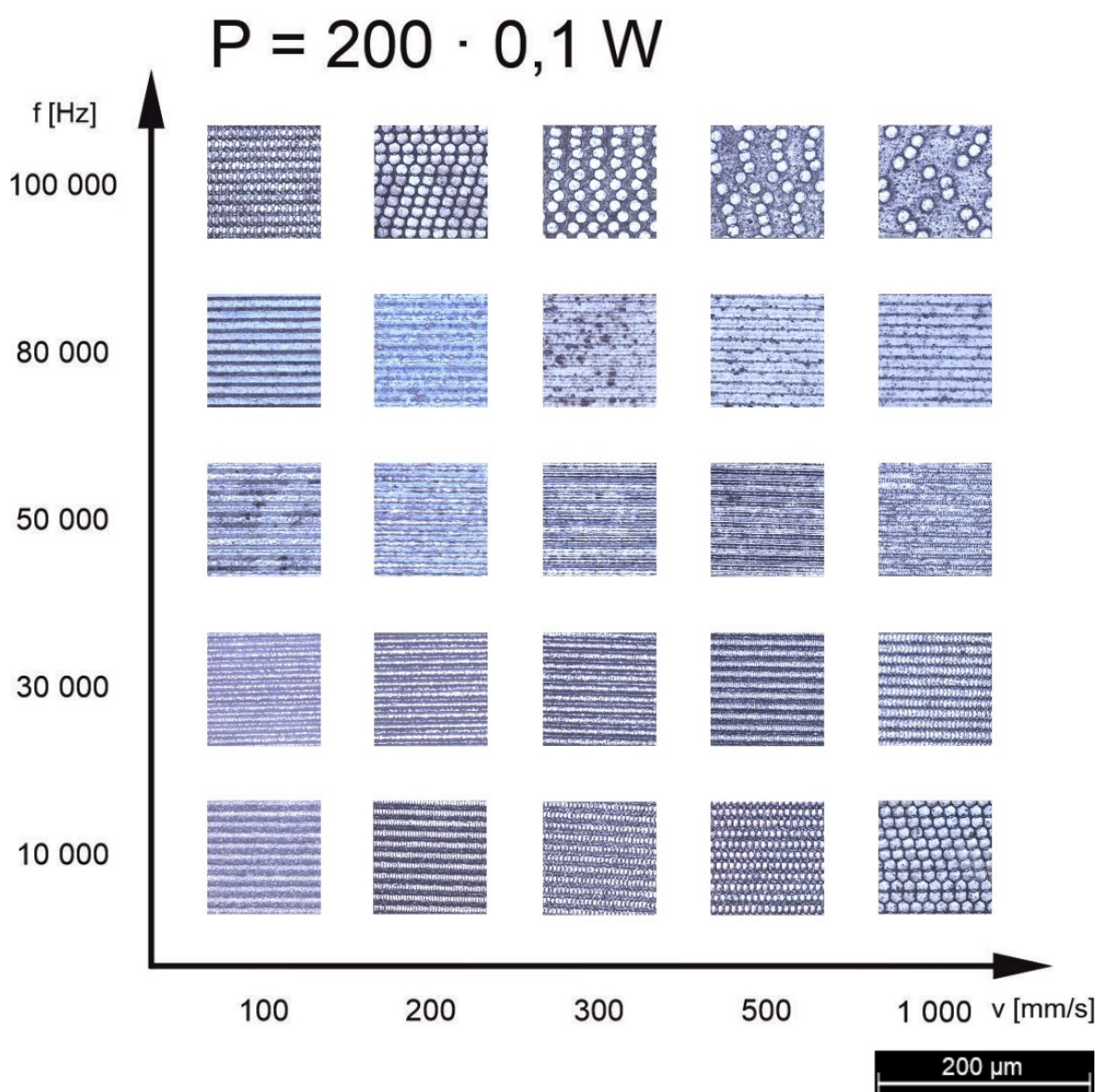
14.2.2 Analýza struktury značení na oceli 1.4401 a srovnání s ocelí 1.4301

U materiálu 1.4401 se při značení projevil velmi podobný průběh jako u 1.4301, avšak s pár rozdíly, které pravděpodobně souvisejí s odlišným chemickým složením a tepelnou vodivostí materiálu. Celkově lze říct, že rozdíl mezi výkony 15 W a 20 W je u tohoto materiálu mírně výraznější, ale v určitých oblastech se projevil zřetelněji než u 1.4301.

Při nízkých frekvencích (10 000–30 000 Hz) a nižších rychlostech (100–300 mm/s) působí značení při 15 W méně ostře než u materiálu 1.4301. Při výkonu 20 W zůstává značení naopak velmi ostré a pravidelné, dokonce čistší než u 1.4301. Vyšší výkon má tedy u tohoto materiálu pozitivní vliv, zatímco nižší výkon častěji vede ke ztrátě ostrosti.

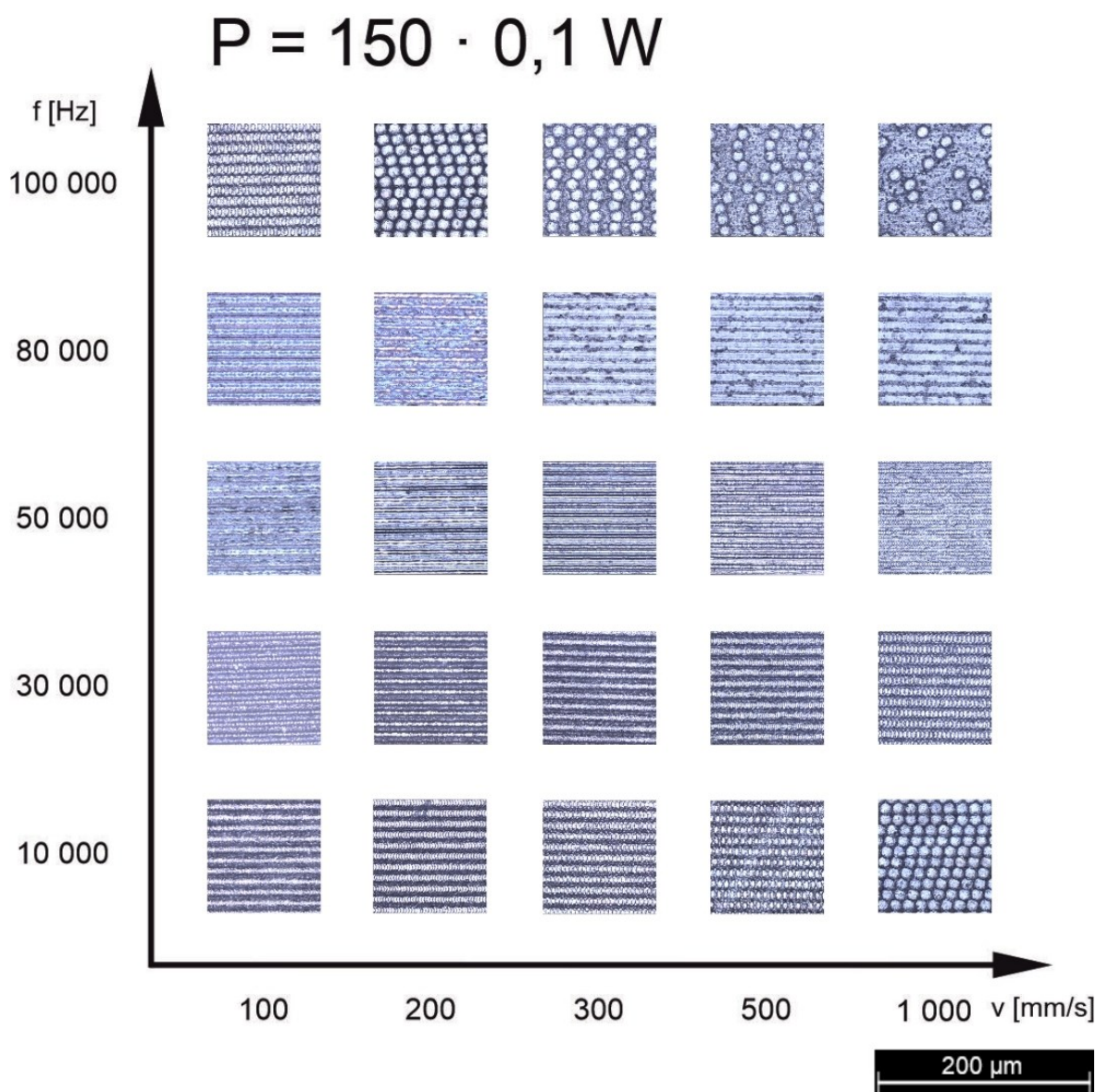
Při frekvenci 50 000 Hz je podobný výsledek jako u předchozího materiálu. Značení při 15 W je v oblasti nižších rychlostí místy obtížně čitelné. Naopak při 20 W je textura zřetelně ostřejší.

V oblasti vyšších frekvencí vykazuje materiál 1.4401 podobné chování jako ocel 1.4301, avšak s několika odlišnostmi. Při frekvenci 80 000 Hz jsou jednotlivé stopy materiálu užší než u 1.4301, a to jak při výkonu 15 W, tak i 20 W. Naopak při frekvenci 100 000 Hz se kromě bodové struktury začínají na povrchu objevovat drobná zrnka, která lze pozorovat i pouhým okem na neznačených částech materiálu. Pravděpodobně tedy nesouvisejí přímo s působením laseru.



Obrázek 42 Mikroskopický detail značení pro materiál 1.4401 při výkonu 20 W

(zdroj: vlastní)



Obrázek 43 Mikroskopický detail značení pro materiál 1.4401 při výkonu 15 W

(zdroj: vlastní)

14.2.3 Analýza struktury značení na oceli 1.1730 a srovnání s plechy

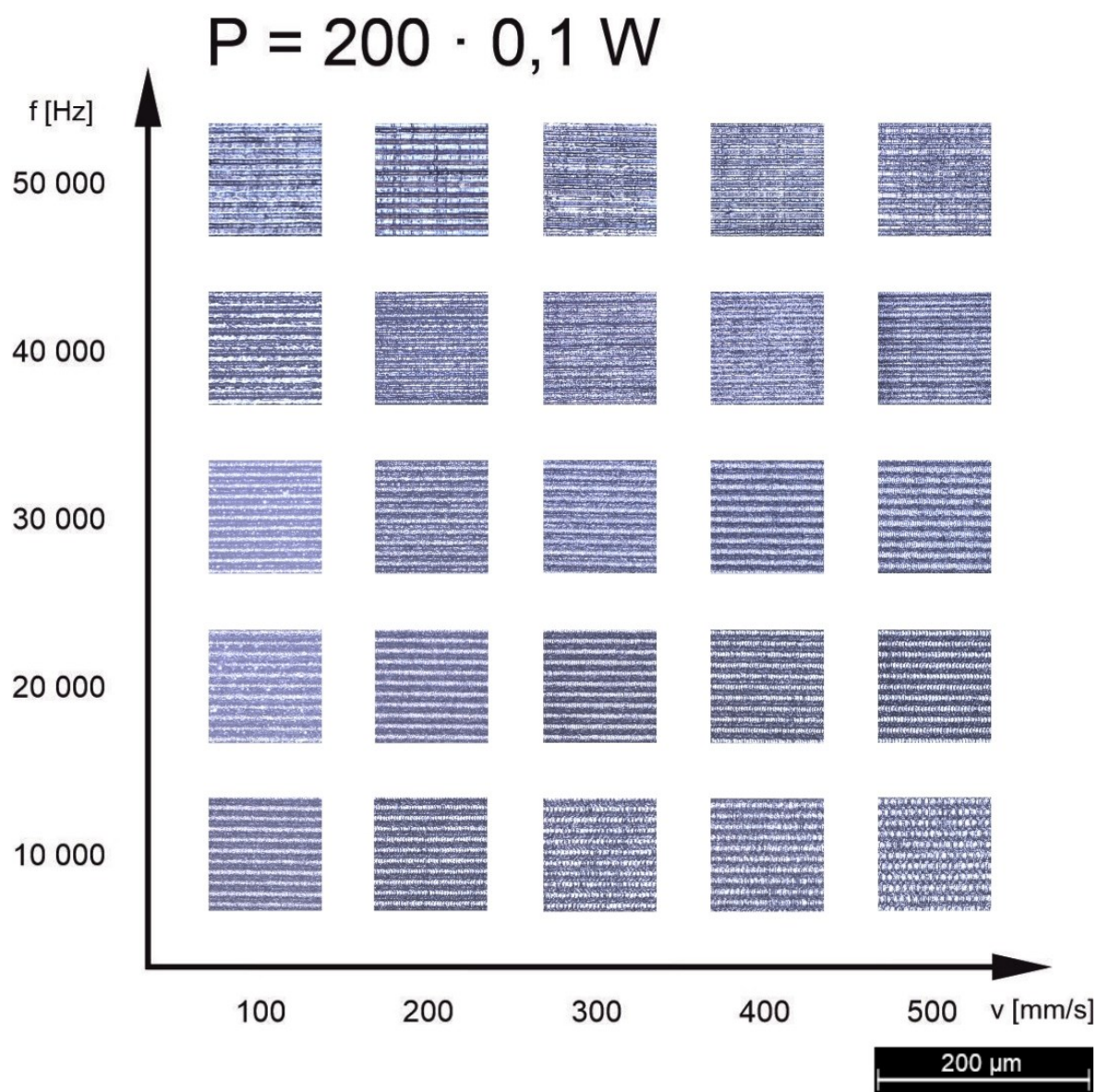
Při frekvenci 10 000 Hz a nižších rychlostech (100–200 mm/s) jsou u obou výkonů vidět výrazné čárové stopy, které se skládají z navazujících bodů. Tento bodový charakter je u 15 W výraznější, zatímco u 20 W jsou jednotlivé body více překryté. S rostoucí rychlostí (od 300 mm/s výše) se při nižším výkonu začínají mezi jednotlivými pulzy objevovat menší mezery. Při 500 mm/s je u 15 W již značení roztrhané a nespojité, zatímco u 20 W si ještě drží čitelnost. Ve srovnání s předchozími materiály působí značení na 1.1730 méně spojitě, zatímco u 1.4301 a 1.4401 je stopa výrazně jemnější a celkově plynulejší.

Při 20 000 Hz je značení při nižších rychlostech (100–300 mm/s) stále tvořeno navazujícími body, ale působí už plynuleji než u 10 000 Hz. U 20 W je průběh plynulejší, zejména při rychlosti 300 mm/s. Při 500 mm/s je značení při 15 W méně výrazné, zatímco při 20 W je stopa čitelnější.

Při 30 000 Hz je značení znatelně jemnější a více spojitě. U 15 W je značení při 100 až 300 mm/s pravidelné, ale od 400 mm/s se objevuje slabší rozostření. U 20 W působí značení v celém rozsahu stabilně. I při rychlosti 500 mm/s je u vyššího výkonu zachována pravidelná stopa, která je širší než u nižšího výkonu. Oproti plechům má značení na 1.1730 mírně hrubší texturu a méně kompaktní vzhled.

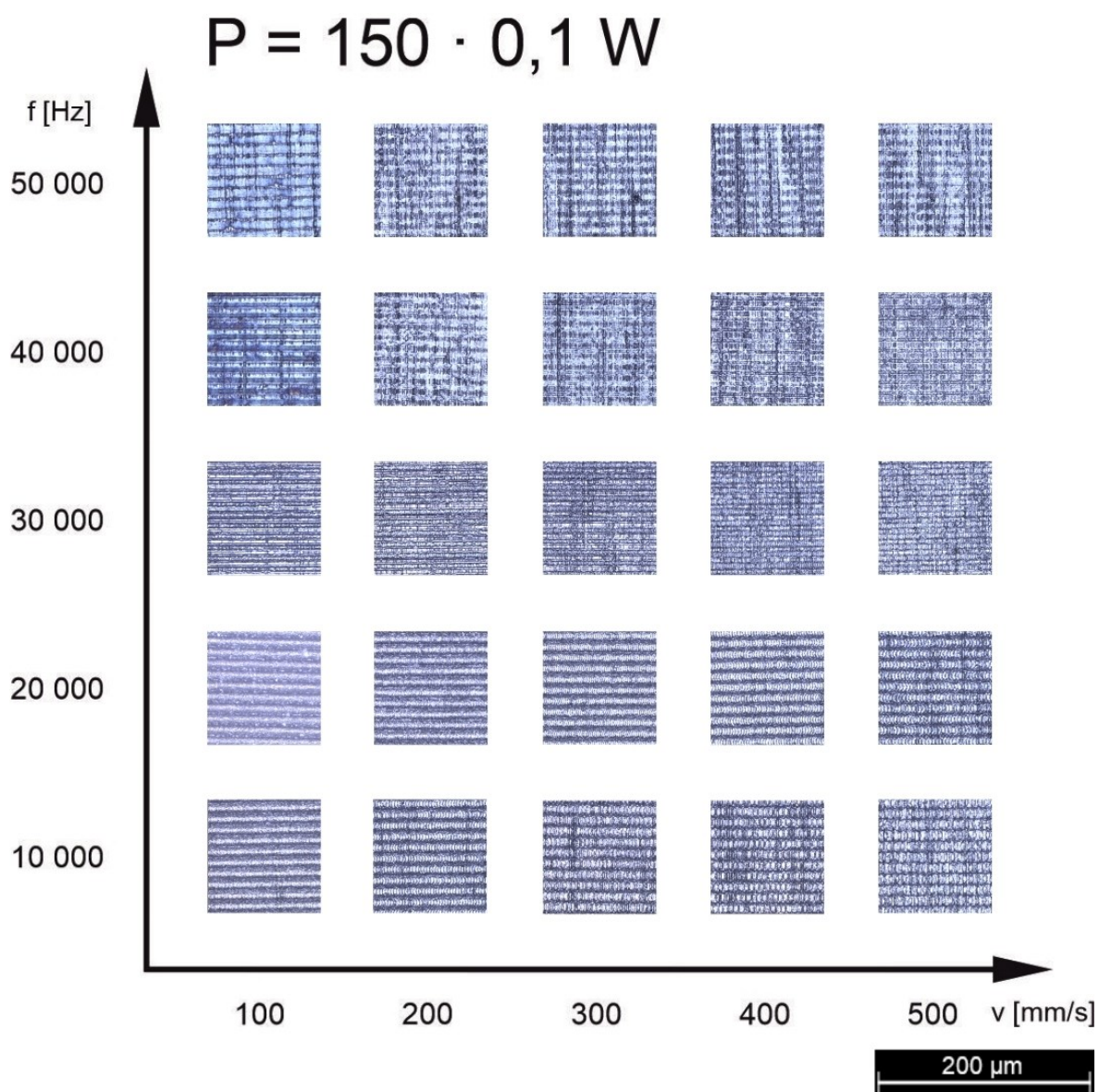
Při frekvenci 40 000 Hz má značení výrazně jemnější charakter než při nižších frekvencích. Při výkonu 15 W a nižších rychlostech (100–200 mm/s) však stopa působí nepravidelně, místy až chaoticky. Tento efekt může být částečně způsoben samotnými parametry značení, avšak s vysokou pravděpodobností na něj měl vliv i stav původního povrchu materiálu. V oblasti, kde značení probíhalo, jsou patrné jemné stopy po předchozím opracování. Při výkonu 20 W je značení ve všech rychlostech výrazně stabilnější. Stopu lze v celém rozsahu popsat jako plynulou, rovnoměrnou.

Při frekvenci 50 000 Hz je značení při výkonu 15 W výrazně nestabilní napříč celým rozsahem rychlostí. Výsledná textura působí roztržštěně, nepravidelně a místy zcela nečitelně. Vzhledem k pozorovanému stavu povrchu materiálu nelze vyloučit, že se na tomto efektu podílejí také stopy po předchozím opracování, které mohly narušit rovnoměrný průběh značení. Při výkonu 20 W je značení znatelně stabilnější. V celém rozsahu rychlostí si udržuje spojitou a pravidelnou strukturu, která zůstává čitelná i při vyšších rychlostech (400–500 mm/s), bez výrazného rozpadu nebo přerušení. Ve srovnání s materiály 1.4301 a 1.4401 je u tohoto materiálu stopa méně rovnoměrná. Místy dochází k drobným výkyvům v šířce, což může být důsledkem odlišných vlastností, jako je struktura povrchu, tepelná vodivost nebo homogenita materiálu. Výsledná textura tak působí méně stabilně a celkový vzhled značení je vizuálně neklidnější.



Obrázek 44 Mikroskopický detail značení pro materiál 1.1730 při výkonu 20 W

(zdroj: vlastní)

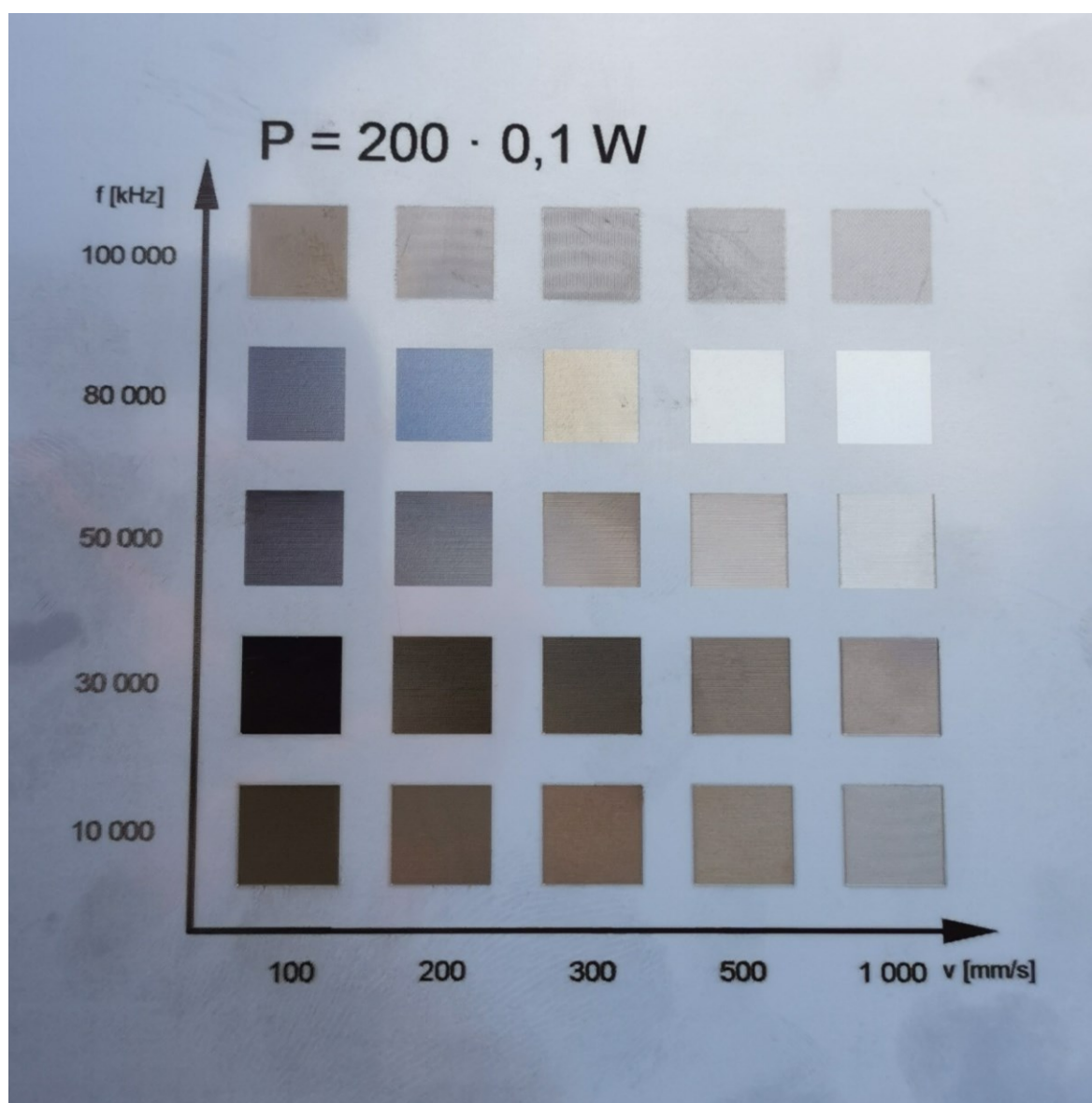


Obrázek 45 Mikroskopický detail značení pro materiál 1.1730 při výkonu 15 W

(zdroj: vlastní)

15 MĚŘENÍ HLOUBKY

Pro vyhodnocení kvality povrchu po laserovém gravírování byl použit lineární výškoměr Mitutoyo LH-600B. U každého jednotlivého pole byla před měřením provedena kalibrace přístroje tak, že se nulová výšková rovina nastavila na povrch materiálu v bezprostřední blízkosti značeného pole. Následně bylo v každém značeném poli provedeno devět bodových měření rozmístěných v rozích, na středových bodech hran i v geometrickém středu pole, aby byl pokryt celý povrch a minimalizovaly se vlivy lokálních nerovností. Měření byla prováděna na plechu z materiálu 1.4301 o rozměrech 200x200 mm.



Obrázek 46 Laserové značení na plechu z materiálu 1.4301 o rozměrech 200x200 mm

(zdroj: vlastní)

Tabulka 8 Naměřené hloubky materiálu 1.4301 s použitým výkonem 20 W

f (Hz)	v (mm/s)	Počet měření (μm)									Průměr (μm)	Odchylka (μm)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
100 000	100	-4	-12	-20	-10	-22	-29	-21	-33	-38	-21	11
	200	-1	-6	-11	-10	-15	-18	-20	-17	-19	-13	6
	300	6	5	6	2	2	0	-7	-7	-8	0	6
	500	4	4	5	-1	-1	-1	-8	-8	-8	-2	5
	1000	6	5	5	2	2	2	-2	-1	-2	2	3
80 000	100	-17	-30	-36	-21	-35	-31	-27	-38	-44	-31	8
	200	-2	-6	-6	-11	-14	-14	-18	-19	-19	-12	6
	300	4	4	5	-2	-3	-1	-6	-7	-5	-1	4
	500	9	12	14	5	7	9	2	3	5	7	4
	1000	1	2	5	-3	-1	1	-6	-4	-2	-1	3
50 000	100	-19	-32	-41	-24	-37	-44	-19	-35	-43	-33	10
	200	-3	-5	-5	-4	-6	-6	-6	-7	-6	-5,3	1,2
	300	2	2	5	-1	-1	1	-2	-1	1	1	2
	500	2	4	6	1	3	6	1	2	4	3	2
	1000	2	4	7	1	2	5	-2	1	4	3	3
30 000	100	-1	-11	-12	2	-10	-15	6	-1	-6	-5	7
	200	9	7	7	13	10	11	18	17	17	12	4
	300	7	8	9	9	10	12	15	15	16	11	3
	500	6	9	11	9	10	14	12	13	15	11	3
	1000	5	6	9	6	8	10	7	9	11	8	2
10 000	100	-3	-12	-22	1	-6	-12	11	1	-4	-5	9
	200	1	-2	-4	9	4	2	17	14	10	6	7
	300	-3	-3	-3	4	3	3	11	9	9	3	6
	500	1	2	2	5	4	5	9	9	9	5	3
	1000	3	5	6	6	6	8	8	8	10	7	2

(zdroj: vlastní)

Z hodnot uvedených v tabulce vyplývá, že naměřená data z daného materiálu jsou nevypovídající a ze statického hlediska nedávají smysl, proto další materiály už nebyly dále měřeny. Příčinou je velmi malá hloubka gravírovaného značení v řádu mikrometrů a nerovnoměrnost plechu. Materiál není dokonale rovinný, vyskytují se lokální deformace a vlnění, která zásadně ovlivňují výsledky hloubkového měření. Naměřené hodnoty tak spíše odrážejí tvar materiálu než výsledné značení.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala problematikou laserového značení. V teoretické části byla popsána historie a vývoj laserových technologií, princip činnosti laserového paprsku, jeho charakteristické vlastnosti a konstrukční uspořádání laserových zařízení. Dále byly popsány základní typy laserů a jejich rozdělení podle různých kritérií, přičemž zvláštní pozornost byla věnována vláknovým laserům. Byly také uvedeny jednotlivé metody značení materiálů včetně jejich principu a praktického využití.

V praktické části byla provedena série experimentů zaměřených na zkoumání vlivu nastavení výkonu, frekvence pulzů a rychlosti značení na výslednou kvalitu popisu. Pro značení byly navrženy dvě testovací matice, které umožnily systematické porovnání různých kombinací parametrů. Jako vzorky byly zvoleny tři typy ocelí.

Výsledky značení byly vyhodnocovány z hlediska barevného kontrastu a struktury, a to jak vizuálně, tak pomocí optického mikroskopu. Z experimentů vyplynulo, že vyšší výkon laseru obecně přispíval k výraznějšímu a kontrastnějšímu značení, zatímco nižší výkon často vedl k méně sytým odstínům a někdy i ke zhoršené čitelnosti výsledného popisu. Uvedené poznatky korespondují s výsledky studií uvedených v kapitole 8.2, které prokázaly, že vyšší frekvence a rychlosti značení v rozmezí okolo 200 mm/s vedou při značení nerezové oceli k výraznému barevnému značení. Zároveň bylo potvrzeno, že výkon 20 W je z hlediska čitelnosti výhodnější. Dále bylo taky zjištěno, že optimální kombinace frekvence a rychlosti značení se lišila v závislosti na použitém materiálu. Značení na nástrojové oceli vykazovalo méně stabilní mikroskopickou strukturu ve srovnání s nerezovými plechy.

Na základě provedených experimentů lze pro značení nerezových ocelí doporučit následující nastavení parametrů. Pokud je cílem dosáhnout vysoce čitelného a kontrastního značení, jako nejvhodnější se jeví použití výkonu 20 W, rychlosti 100 mm/s a frekvence 30 000 Hz. V případě požadavku na barevnější značení s odstíny v oblasti šedé až modré barvy je vhodné zachovat stejný výkon, avšak zvýšit frekvenci na 80 000 Hz a rychlost na 200 mm/s. Tyto kombinace se ukázaly jako nejefektivnější pro značení nerezových ocelí. Pro značení nástrojových ocelí se doporučuje použití nižšího výkonu 15 W, rychlosti 100 mm/s a frekvence 40 000 Hz. Výsledný značený povrch se po dokončení procesu nedoporučuje chemicky ošetřovat nebo otírat agresivními prostředky, neboť může dojít ke snížení barevného kontrastu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LEONARDO TECHNOLOGY. *Historie vývoje laseru*. Online. c2002-2024. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/historie-vyvoje-laseru>. [cit. 2024-12-01].
- [2] MOCEK, Tomáš. *Laser: supernástroj člověka 21. století*. Praha: Academia, 2017. ISBN 978-80-200-2691-0.
- [3] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. Online. Roč. 2010, s. 17. Dostupné z: <https://adoc.pub/laserove-technologie-v-praxi.html>. [cit. 2024-11-30].
- [4] WORLD OF LASERS. *Properties of Lasers*. Online. c2005-2024. Dostupné z: <https://www.worldoflasers.com/laserproperties.htm>. [cit. 2024-11-30].
- [5] SVELTO, Orazio. *Principles of Lasers*. 5. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1301-2.
- [6] GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *Monochromaticity: the spectrum of a laser or other light source*. Online. c2024. Dostupné z: <https://bklein.ece.gatech.edu/laser-photonics/monochromaticity-the-spectrum-of-a-laser-or-other-light-source/>. [cit. 2024-11-30].
- [7] BLABLA, Vít. *GRAVÍROVÁNÍ LASEROVÝM PAPRSKEM*. Bakalářská práce. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2024.
- [8] HAUSCHWITZ, Petr. *Praktický průvodce laserovou technologií*. Online. Praha: Grada, 2024. ISBN 978-80-271-7644-1. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/kniha/prakticky-pruvodce-laserovou-technologie-14482/>. [cit. 2025-04-23].
- [9] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Nekonvenční metody obrábění – 4. díl*. Online. 2008. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil>. [cit. 2024-11-29].
- [10] Laserbearbeitung CO2-Laser. Online. *Technische Information*. S. 156. Dostupné z: [http://hit-karlsruhe.de/hit-info/info-
ws16/universalCNC/dokumente/0203StandDerTechnik_dokumente/TI_Laserbearbeitung
CO2-Laser_Trumpf.PDF](http://hit-karlsruhe.de/hit-info/info-
ws16/universalCNC/dokumente/0203StandDerTechnik_dokumente/TI_Laserbearbeitung
CO2-Laser_Trumpf.PDF). [cit. 2024-11-30].
- [11] SOCHOR, Václav. *Lasery a koherentní svazky*. Academia, 1990. ISBN 80-200-0354-1.

- [12] PÉREZ DE PRADO, Rocío; GARCÍA-GALÁN, Sebastián; MUÑOZ-EXPÓSITO, José Enrique a MARCHEWKA, Adam. *Examples of detected TEM00 intensity with the beam camera in Spiron SP907 at the Telecommunication Engineering Department, University of Jaén*. Online. In: MDPI. 2020. Dostupné z: https://www.mdpi.com/symmetry/symmetry-12-00083/article_deploy/html/images/symmetry-12-00083-g001-550.jpg. [cit. 2025-04-23].
- [13] LEONARDO TECHNOLOGY. *TEM módy laserového paprsku*. Online. In: . Dostupné z: https://www.lt.cz/images/ilearning/laser/laser_22_1.jpg. [cit. 2024-11-30].
- [14] HÁBOVČÍK, Peter. *Lasery a fotodetektory*. Bratislava: Alfa, 1989. ISBN 80 05-00526-1.
- [15] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [16] DOHNAL, Miroslav. *Lasery a jejich aplikace v polygrafii*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. ISBN 978-80-7395-043-9.
- [17] GELETA, Vojtech. *Progresívne technológie obrábania*. Bratislava: STU, 2013. ISBN 978-80-227-3997-9.
- [18] *Princip laseru*. Online. In: MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Průmyslové lasery (1) – princip laseru. 2012. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru>. [cit. 2024-12-06].
- [19] KUSALA, Jaroslav. *Princip laseru*. Online. In: ČEZ. 2004. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/obr/ruby.gif>. [cit. 2025-04-24].
- [20] ADH MACHINE TOOL. *Essential Components of Laser Cutting Machines Explained*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.adhmt.com/laser-cutting-machine-components/>. [cit. 2024-11-29].
- [21] LEONARDO TECHNOLOGY. *Možné dělení typů a druhů laserů*. Online. c2002-2024. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>. [cit. 2024-11-29].
- [22] LEONARDO TECHNOLOGY. *Princip CO2 laseru*. Online. c2002-2024. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>. [cit. 2024-11-29].

- [23] ACCTEK MACHINERY. *Laserové značení: Co je lepší na CO2 laseru nebo vláknovém laseru?* Online. 2023. Dostupné z: <https://www.accteklaser.com/cs/laserove-znaceni-ktere-je-lepsi-nez-co2-laser-nebo-vlaknovy-laser/?srltid=AfmBOoq7XXORwxra-LjXSZ4ZXUoeCaCxjwI2Tu2KcrPmwdML2RsSEHLh>. [cit. 2024-11-29].
- [24] LEONARDO TECHNOLOGY. *Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red.* Online. c2002-2024. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>. [cit. 2024-11-29].
- [25] BUREŠ, Martin. *Využití povrchového leštění s ohledem na vlastnosti povrchu 3D tištěných dílů.* Diplomová práce. Plzeň: ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, 2019/2020.
- [26] LEONARDO TECHNOLOGY. *Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů se zeleným světlem 532 nm.* Online. c2002-2024. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-se-zelenym-svetlem-532-nm>. [cit. 2024-11-29].
- [27] LEONARDO TECHNOLOGY. *Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů na vlnové délce 355 nm - UV spektrum.* Online. c2002-2024. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-na-vlnove-delce-355-nm-uv-spektrum>. [cit. 2024-11-29].
- [28] LEONARDO TECHNOLOGY. *Princip vláknového - FIBER LASERU.* Online. c2002-2024. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>. [cit. 2024-11-29].
- [29] PETERKA, Pavel; HONZÁTKO, Pavel; KARÁSEK, Miroslav; KAŇKA, Jiří; KAŠÍK, Ivan et al. *Jemná mechanika a optika. JMO.* 2010, roč. 55, č. 4, s. 131. ISSN 0447-6441.
- [30] *Vláknové lasery. Věda kolem nás | Objevy.* 2014, roč. 1, č. 11710, s. 24. ISSN 11710.
- [31] NG, T.W. a YEO, S.C. *Aesthetic laser marking assessment using luminance ratios. Optics and Lasers in Engineering.* 2001, roč. 35, č. 3, s. 177-186.
- [32] ACI LASER. *Processes – Laser Marking.* Online. c1999-2024. Dostupné z: <https://www.aci-laser.com/applications/laser-marking/>. [cit. 2024-12-02].
- [33] LEONARDO TECHNOLOGY. *Procesy laserového značení.* Online. c2002-2024. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/procesy-laseroveho-znaceni>. [cit. 2024-12-02].

- [34] FRACTORY. *Laser Marking – Methods, Materials and Applications*. Online. 2019. Dostupné z: <https://fractory.com/laser-marking-methods-materials-applications/>. [cit. 2024-12-02].
- [35] TRUMF. *Co je gravírování laserem?* Online. c2024. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/aplikace/laserove-oznacovani/gravirovani-laserem/. [cit. 2024-12-02].
- [36] NARRAN. *Další využití značícího laseru*. Online. c2024. Dostupné z: <https://narran.cz/vyuziti-znaciho-laseru/>. [cit. 2024-12-02].
- [37] *Annealing*. Online. In: LASIT. C2024. Dostupné z: <https://www.lasitlaser.com/wp-content/uploads/2018/04/annealing-1024x746.jpg>. [cit. 2025-05-09].
- [38] COHERENT. *What is Laser Ablation?* Online. c2024. Dostupné z: <https://www.coherent.com/news/glossary/laser-ablation>. [cit. 2024-12-02].
- [39] FINMARK LASER. *Foaming*. Online. 2020. Dostupné z: <https://finmarklaser.com/services/foaming/>. [cit. 2024-12-02].
- [40] DEVI, Mamta; WANG, Huize; MOON, Sanghwa; SHARMA, Swati a STRAUSS, Volker. *Details are in the caption following the image*. Online. In: Laser-Carbonization – A Powerful Tool for Micro-Fabrication of Patterned Electronic Carbons. 2023. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/cms/asset/e9c86242-c818-42fe-8850-0001f12805a6/adma202211054-fig-0006-m.png>. [cit. 2024-12-06].
- [41] PANDEY, M. a DOLOI, B. Experimental investigation into fibre laser marking on stainless steel 304. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2023, roč. 9, č. 1, s. 15. ISSN 2374-0698.
- [42] ADIJANS, Gatis; DOLOI, Imants; YANKOV, Emil a BIKOV, Artis. INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LASER POWER, SPEED AND FREQUENCY ON SURFACE ROUGHNESS AND COLOR MARKING ON AISI 304. *Rezekne Academy of Technologies*. 2024, roč. 3, č. 3, s. 464. ISSN 2256-070X.
- [43] MEDICOM. *LASERfibre LF-t stolní popisovací stanice s vláknovým laserem*. Online. C2025. Dostupné z: https://www.medicom.cz/userfiles/lfxxt_16454593488939.pdf. [cit. 2025-05-02].

[44] AGST DRAHT & BIEGETECHNIK. *1.4301* | *AISI 304* | *ČSN 17240* | *X5CrNi18-10* | *Austenitická ocel*. Online. [bez data]. Dostupné z: <https://www.agst.de/4301?lang=cs>. [cit. 2025-05-01].

[45] AGST DRAHT & BIEGETECHNIK. *1.4401* | *AISI 316* | *ČSN 17346* | *X5CrNiMo17-12-2* | *Austenitická ocel*. Online. [bez data]. Dostupné z: <https://www.agst.de/4401?lang=cs>. [cit. 2025-05-01].

[46] JKZ. *W. NR. 1.1730. C2025*. [bez data]. Dostupné z: <https://www.agst.de/4301?lang=cs>. [cit. 2025-05-01].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Emise fotonu.....	14
Obrázek 2 Monochromaticnost.....	15
Obrázek 3 Koherentnost.....	16
Obrázek 4 Směrovost.....	16
Obrázek 5 Schématické znázornění polarizace.....	17
Obrázek 6 Mód TEM ₀₀ zobrazený pomocí PC	18
Obrázek 7 Módy laseru.....	19
Obrázek 8 Druhy rozložení intenzity v laserovém paprsku	20
Obrázek 9 Schéma laserového zařízení	21
Obrázek 10 Princip funkce rezonátoru.....	22
Obrázek 11 Zdroj laserového záření	23
Obrázek 12: Rozdělení laserů podle kritérií	24
Obrázek 13: Excimerový laser.....	25
Obrázek 14 Dělení pevnolátkových laserů podle tvaru aktivního prostředí	26
Obrázek 15 Princip generace záření polovodičových laserů	27
Obrázek 16 Přehled vlnových délek vybraných laserových systémů	28
Obrázek 17 Časové průběhy výkonu při pulzním (vlevo) a kontinuálním režimu (vpravo)	29
Obrázek 18 Trubice CO ₂ laseru a plotrový řezací systém využívající CO ₂ laser	32
Obrázek 19 Schéma částí Nd:YAG laseru.....	33
Obrázek 20 Princip zeleného laseru.....	34
Obrázek 21 Přeměna záření Nd:YAG laseru na 532 nm a 355 nm	34
Obrázek 22 Schéma vláknového laseru	36
Obrázek 23 Princip aktivního vlákna.....	37
Obrázek 24 Gravírování.....	39
Obrázek 25 Barevné značení metodou žíhání.....	39
Obrázek 26 Ablace.....	40
Obrázek 27 Pěnění	41
Obrázek 28 Karbonizace.....	42
Obrázek 29 Fotochemický proces.....	42
Obrázek 30 Pracovní prostředí softwaru CorelDRAW.....	46
Obrázek 31 Testovací matice 100x100 mm s výkonem pro vizuální představu	48
Obrázek 32 Výsledný grafický podklad exportovaný do BMP	49
Obrázek 33 Testovací matice 70x70 mm pro vizuální představu	50

Obrázek 34 Vlákenný laser LFQ20-T	51
Obrázek 35 Pracovní plocha laseru LFQ20-T	56
Obrázek 36 Pracovní prostředí softwaru WMark	57
Obrázek 37 Porovnání vzhledu značení na oceli 1.4301 při výkonech 15 W a 20 W	60
Obrázek 38 Porovnání vzhledu značení na oceli 1.4401 při výkonech 15 W a 20 W	60
Obrázek 39 Porovnání vzhledu značení na oceli 1.1730 při výkonech 15 W a 20 W	61
Obrázek 40 Mikroskopický detail značení pro materiál 1.4301 při výkonu 20 W	63
Obrázek 41 Mikroskopický detail značení pro materiál 1.4301 při výkonu 15 W	64
Obrázek 42 Mikroskopický detail značení pro materiál 1.4401 při výkonu 20 W	65
Obrázek 43 Mikroskopický detail značení pro materiál 1.4401 při výkonu 15 W	66
Obrázek 44 Mikroskopický detail značení pro materiál 1.1730 při výkonu 20 W	68
Obrázek 45 Mikroskopický detail značení pro materiál 1.1730 při výkonu 15 W	69
Obrázek 46 Laserové značení na plechu z materiálu 1.4301 o rozměrech 200x200 mm....	70

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Barva získaná laserovým žíháním specifickou teplotou.	40
Tabulka 2 Technické parametry vláknového laseru LFQ20 – T	52
Tabulka 3 Chemické složení materiálu 1.4301 (dle DIN EN 10088-3).....	53
Tabulka 4 Fyzikální vlastnosti materiálu 1.4301 (při 20 °C).....	54
Tabulka 5 Chemické složení materiálu 1.4401 (dle DIN EN 10088-3).....	54
Tabulka 6 Fyzikální vlastnosti materiálu 1.4401 (při 20 °C).....	55
Tabulka 7 Chemické složení materiálu 1.1730 (dle DIN C45W).....	55
Tabulka 8 Naměřené hloubky materiálu 1.4301 s použitým výkonem 20 W.....	71

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

%	Procento
°C	Jednotka teploty
μm	Jednotka délky
BMP	Windows Bitmap
C	Uhlík
CMYK	Cyan Magenta Yellow Key
CO ₂	Oxid uhličitý
Cr	Chrom
CW	Continuous Wave
CZ	Česká republika
DPI	Dots Per Inch
f	Frekvence
Hz	Jednotka frekvence
J/kg·K	Jednotka měrné tepelné kapacity
K	Převrácená hodnota faktoru kvality
kg	Jednotka hmotnosti
kg/dm ³	Jednotka hustoty
kHz	Jednotka frekvence
KTP	Titanylfosfát draselný
kW	Jednotka výkonu
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LCD	Liquid Crystal Display
M ²	Faktor kvality paprsku
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
Max.	Maximální

mJ	Jednotka energie
MM	Multimód
mm	Jednotka délky
mm/s	Jednotka rychlosti
Mn	Mangan
Mo	Molybden
N	Dusík
Nd:YAG	Neodymium Yttrium Aluminum Garnet
Ni	Nikl
nm	Jednotka délky
ns	Jednotka času
P	Výkon
P	Fosfor
PC	Osobní počítač
PW	Pulsed Wave
Qs	Q-switched
s	Jednotka času
S	Síra
Si	Křemík
TEM	Transverse Electromagnetic Mode
Ti:Sa	Titanium:Sapphire
UV	Ultrafialové
v	Rychlost
VSCEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
W	Jednotka výkonu
W/m·K	Jednotka tepelné vodivosti

$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	Jednotka plošné hustoty výkonu
X	Osa X
Y	Osa Y
YAG	Yttrium Aluminum Garnet
Yb:YAG	Ytterbium-doped Yttrium Aluminum Garnet
$\lambda/2$	Půlvlnná destička
$\lambda/4$	Čtvrtvlnná destička
$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	Jednotka elektrického odporu