

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STROJNÍ**  
**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ**  
**A METROLOGIE**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Leštění povrchu pomocí ultra-krátkopulsních laserů**  
**Surface polishing by ultrashort pulse lasers**

AUTOR: Jakub Fousek  
STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství  
VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

**PRAHA 2020**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fousek** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **473690**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojniho inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Leštění povrchu pomocí ultra-krátkopulsních laserů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Surface polishing by ultrashort pulse lasers**

Pokyny pro vypracování:

1. Přehled způsobů leštění povrchů
2. Princip laseru a laserové zařízení
3. Funkce a možnosti UKP laserů
4. Aktuální poznatky o leštění laserem
5. Vlastní experiment leštění povrchu laserem

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Zeman, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS**

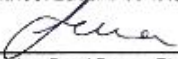
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

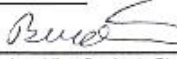
**Ing. Adam Čermák, Ph.D., HOFMEISTER s. r. o.**

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

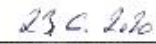
  
Ing. Pavel Zeman, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce


  
Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(sy)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce je zaměřena na technologii leštění pomocí ultra-krátkopulzních laserů. V teoretické části práce je polovina věnována konvenčním metodám leštění, jako je leštění mechanické, chemické a elektrochemické a polovina je věnována laserovým technologiím. Je zde popsán princip laseru, jeho konstrukce, typy a také pracovní režimy.

Experimentální část práce je také rozdělena na dvě části, měření ablačního prahu, které je potřebné pro hlavní experiment této bakalářské práce a samotný experiment leštění pomocí ultra-krátkopulzního laseru. Experiment je vyhodnocen z hlediska drsnosti a plošné drsnosti povrchu vysokolegované oceli pro použití za studena 1.2379 (ČSN 41 9573).

## **Klíčová slova**

Leštění, ultra-krátkopulzní laser, laser, drsnost povrchu

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on polishing technology using ultrashort pulse lasers. A half of the theoretical work is dedicated to conventional methods of polishing, like mechanical polishing, chemical polishing and electrochemical polishing and the other half of the theoretical work is dedicated to laser technologies. There is a description of laser principle, its construction, types and also work regimes.

Experimental section of the work is also divided into two parts, measurement of ablation threshold, which is important for the main experiment of this bachelor thesis and the polishing experiment by ultrashort pulse laser. Experiment is evaluated from the point of view of surface and area surface roughness on high-alloyed steel for cold uses 1.2379 (ČSN 41 9573).

## **Keywords**

Polishing, ultrashort pulse laser, laser, surface roughness

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Tomáši Primusovi za konzultace a cenné rady při jejím vytváření. Dále bych rád poděkoval zaměstnancům firmy Hofmeister, předně Ing. Adamu Čermákovi, Ph.D., kteří mi umožnili experimentální část této práce a pomohli mi s její realizací.

Tato práce vznikla s podporou projektu OPVVV: „Nové nanostruktury pro inženýrské aplikace umožněné kombinací moderních technologií a pokročilých simulací“, CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_026/0008396.

## Obsah

1	Úvod.....	1
2	Teoretická část .....	2
2.1	Technologie leštění.....	2
	2.1.1 Mechanické leštění.....	2
	2.1.2 Chemické leštění .....	4
	2.1.3 Elektrolytické leštění.....	7
	2.1.4 Komparace jmenovaných druhů leštění.....	9
2.2	Laserové technologie .....	9
	2.2.1 Princip fungování laseru .....	10
	2.2.2 Interakce laseru s materiálem .....	12
	2.2.3 Typy laserů .....	13
	2.2.4 Klasifikace laserů dle pracovního režimu.....	19
3	Možnosti leštění laserem .....	23
4	Experimentální část.....	25
4.1	Teoretické podklady experimentu.....	25
4.2	Návrh experimentu.....	26
	4.2.1 Cíle experimentu:.....	26
	4.2.2 Návrh parametrů laseru:.....	26
	4.2.3 Experimentální zjištění ablačního prahu.....	26
	4.2.4 Návrh matice vzorků: .....	27
4.3	Použité přístroje.....	29
4.4	Měření ablačního prahu.....	30
	4.4.1 Popis a vyhodnocení experimentu [50], [49] .....	30
4.5	Experiment leštění UKP laserem .....	34
	4.5.1 Praktická příprava experimentu.....	34
	4.5.2 Provedení experimentu .....	35
	4.5.3 Vyhodnocení experimentu .....	36
4.6	Shrnutí experimentální části .....	46
5	Závěr .....	49
6	Použitá literatura .....	50
7	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	55
8	Seznam obrázků .....	57
9	Seznam tabulek .....	59

# 1 Úvod

První část této práce je věnována problematice leštění z pohledu dnešních konvenčních metod, jako jsou metody mechanické, chemické a elektrochemické. Leštění lze definovat jako dokončovací operaci, při které již nedochází k výrazné změně tvaru či rozměrů součástí. Cílem je dosáhnout vysoké kvality povrchu a případně až zrcadlového lesku. Leštění nemá vliv pouze na konečný vzhled součásti, ale také na její funkčnost. Vysoká kvalita povrchu, konkrétně jeho malá drsnost, je požadovaný výsledek lešticího procesu.

Ve druhé části je rámcově popsán princip laserové technologie, lehký úvod do typů laserů a jejich funkcí. Pro lepší porozumění problematice, je zde uvedené také téma interakce laseru s materiálem a jejich rozdělení na kontinuální, pulzní a ultra-krátkopulzní.

Napříč konvenčními metodami se objevují různé nedostatky těchto typů leštění. Počínaje časovou náročností a nízkou produktivitou práce, až po technická omezení, která jsou například velmi malý leštěný povrch nebo jeho špatná dostupnost. Díky těmto nedostatkům v konvenčních metodách leštění je žádoucí hledat nové možnosti v tomto odvětví. Jedna z těchto možností je právě leštění laserem. Tato práce se v experimentální části zabývá konkrétně leštěním ultra-krátkopulzním laserem, který je potenciálně dobrou volbou. Hodí se pro leštění velmi malých ploch, které nejsou dobře přístupné konvenčním metodám a jeho efektivita práce je vysoká. Nicméně pro tuto laserovou aplikaci je nutná vysoká kvalifikovanost obsluhy zařízení. Výsledky experimentu jsou na první pokus uspokojivé. Drsnost povrchu se v nejlepším případě podařilo snížit o 30 % a pro tuto aplikaci se taktéž podařilo nalézt, alespoň přibližně, optimální nastavení parametrů.



## 2 Teoretická část

### 2.1 Technologie leštění

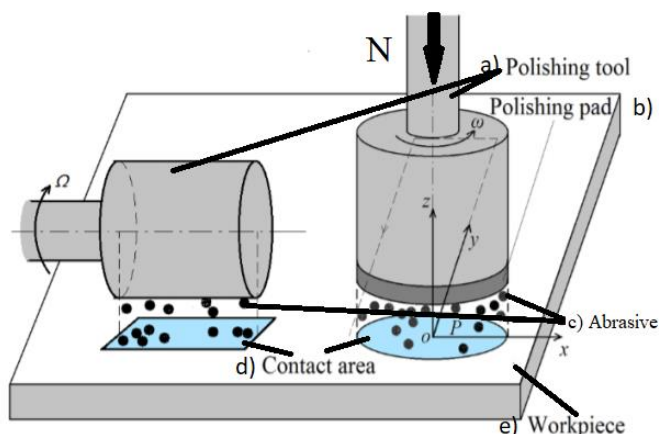
Leštění je dokončovací operace, při které není primárním cílem odstraňování materiálu. Jde o zlepšení povrchu především s ohledem na jeho vzhled. Dále je leštění důležitou operací při výrobě kvůli odstraňování povrchových vrstev oxidů, nečistot a případně jiných chemických sloučenin. V neposlední řadě dochází při leštění k odstraňování stop po předchozích úpravách, a tím se zlepšuje výsledná drsnost povrchu. [1]

Leštění zde bude rozděleno do tří podkategorií na základě toho, jakým způsobem je prováděno.

- a) Mechanické leštění
- b) Chemické leštění
- c) Elektrolytické leštění

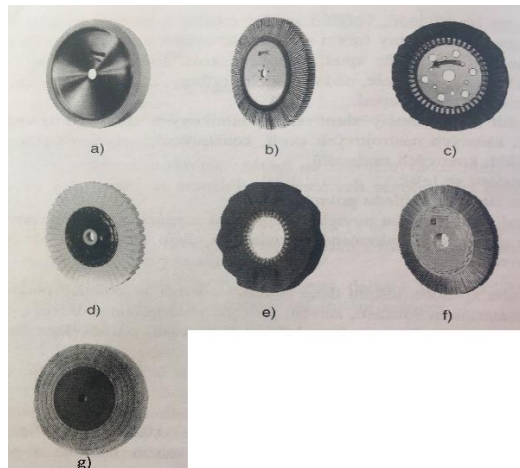
#### 2.1.1 Mechanické leštění

Cílem mechanického leštění je dosáhnout určité drsnosti povrchu za použití mechanických nástrojů a abrazivního materiálu, nejčastěji pasty. [2] Je možné jej provádět mnoha různými nástroji. Mezi ně patří např.: kotouče, kartáče, nebo pásy. Dále je možné k mechanickému leštění využít odstředivé a vibrační mechanismy. Nejrozšířenější z výše uvedených způsobů je kotoučové leštění (znázorněné na Obr. 1). [3]



Obr. 1 – Schéma kotoučového leštění – a) lešticí kotouče, b) podložka, c) abrazivo, d) kontaktní plocha, e) obrobek [4]

Kotoučové leštění probíhá přitlačováním rotujícího kotouče na leštěný povrch. Tento kotouč je opatřen leštícím práškem, pastou, nebo jiným leštícím médiem. Další možností, jak dostat leštící medium na povrch součásti, je jeho implementace do kotouče, ze kterého se během procesu uvolňuje (časté druhy leštících kotoučů jsou na Obr. 2). Pokud je použito některých leštících směsí, je nutné je před opětovným použitím odstranit buď mechanicky, nebo pomocí organických rozpouštědel. [3]



Obr. 2 – Druhy leštících kotoučů dle materiálu – a), b) bavlna, c) guma, d) příze, e) nylonová tkanina, f) nylonová vlákna, g) vlněná tkanina [5]

Na účinnost leštění má vliv přitlačná síla (síla  $F$  na Obr. 1), druh leštícího media, druh kotouče a jeho obvodová rychlost (veličiny  $\omega$  a  $\Omega$  na Obr. 1). Leštící prostředek se skládá z abraziva, které je zodpovědné za vyhlazovací činnost. Často se používá prášek umělého korundu, nebo karbidu křemíku. Dále je v prostředí možné najít příměsi z přírodních i chemických látek a samozřejmě, pokud se jedná o pastu, medium, ve kterém jsou tyto složky obsaženy. Toto medium může být např. parafín, lůj, včelí vosk nebo vazelína. V Tab. 1 jsou uvedeny procentuální složení různých leštících past na hliníkové, mosazné, uhlíkové a nerezové slitiny. [3]

Mechanickým leštěním lze dosáhnout velmi kvalitního povrchu. Výsledkem je ideálně povrch se zrcadlovým leskem a drsností povrchu pod  $0,1 \mu\text{m Ra}$ . [6]

Mechanické leštění má i řadu nevýhod. Pokud je třeba leštit tvarově složité součásti, není mechanické leštění dostatečně variabilní a nedokáže

se dokonale tomuto dílu přizpůsobit a dostat se do všech částí. Abrazivo, které se používá v leštících pastách, může pronikat do struktury leštěného kovu a změnit jeho chemicko-mechanické vlastnosti. Pro tuto možnost leštění je zapotřebí zkušený personál a větší počet opakování jednotlivých etap leštění. Z tohoto důvodu je velmi časově náročné. [7]

Tab. 1 – Složení past na leštění kovových materiálů [3]

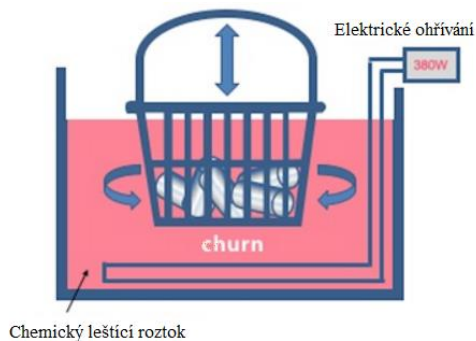
Složení past na leštění kovových materiálů (v procentuálních podílech)																
Název složky	Na hliníkové slitiny				Na mosaze				Na uhlíkové oceli				Na nerezové oceli			
	číslo pasty															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Elektrokorund		80						70			70				72	
Oxid chromitý				74		70			64			35	37	46	60	
Vídeňské vápno	68						73									
Anglická červeň					71							36				
Tripolit			68								65					
Vazelína	26	2		20									13			
Stearin	2	5		2	18	25	23		16	2		23	13	17	30	
Vosk	4		10						10							
Parafin		8	18									2		33		
Lůj		5			9	5	2		5							
Kyselina olejová			4	4								4		4	10	
Oxid olovnatý					2				5							
Cerezín							2			33						
Syntetické mastné kyseliny								30			30				28	
Kaolín													37			

### 2.1.2 Chemické leštění

Chemické leštění probíhá ponořením celé součásti, nebo požadované oblasti, do vany s chemickým roztokem. Chemickou reakcí mezi roztokem a obrobkem dojde k odleptání malé vrstvy na povrchu součásti. Takto se redukuje drsnost tohoto povrchu a součást získá lepší estetické vlastnosti. [3]

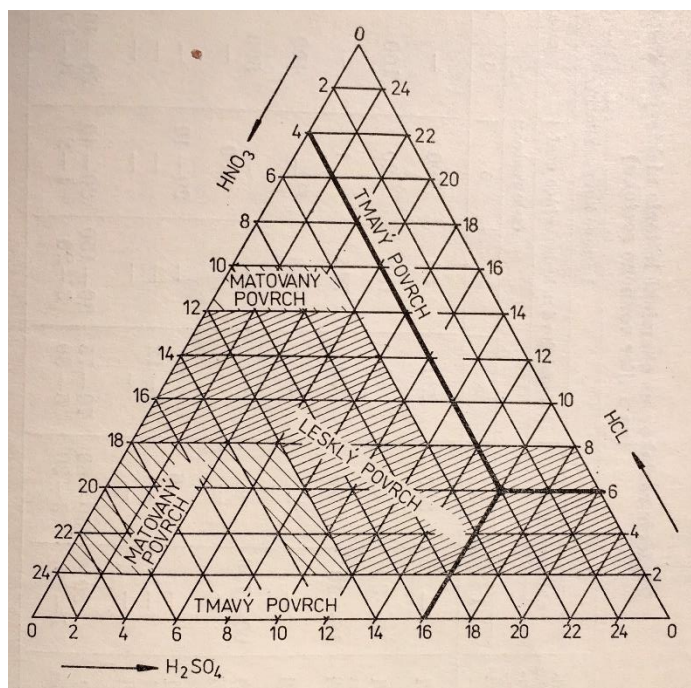
Technologický postup chemického leštění se skládá z několika kroků. Nejprve je třeba součást odmastit. Po odmaštění následuje oplach vodou, aby na součásti nezůstaly zbytky odmašťovacích přípravků. Nyní přijde na řadu samotné chemické leštění, po kterém je dále zapotřebí součást znovu opláchnout a osušit. Schéma operace chemického leštění je viditelné na

Obr. 3. [3] Rotační pohyb leštěných součástí a ohřívání chemické lázně napomáhá ke zrychlení celého procesu a k promíchávání lázně kvůli homogenitě roztoku z hlediska teploty a koncentrace. [8]



Obr. 3 – Schéma chemického leštění [9]

Na různé materiály se používají různé leštící roztoky (jejich možnosti jsou uvedeny v Tab. 2). Často je tento roztok tvořen silnými kyselinami a jejich poměr udává trojúhelníkový diagram koncentrací. Na Obr. 4 je vyobrazen tento diagram pro leštění ocelí (pro každý kov, nebo jiné složení roztoku bude diagram rozdílný). Na stranách trojúhelníku jsou popsány směry nárůstu poměrového čísla jednotlivých složek roztoku. Uvnitř trojúhelníku jsou jednotlivé možnosti o předpokládaném výsledku leštění na základě poměru jednotlivých složek roztoku. Tmavé čáry a bod jimi tvořený určuje optimální poměr látek. V tomto případě se tedy jedná o poměr  $4 : 6 : 16 = \text{HNO}_3 : \text{HCl} : \text{H}_2\text{SO}_4$ . [3]



Obr. 4 – Trojúhelníkový diagram koncentrací  $H_2SO_4 + HCl + HNO_3$  pro chemické leštění ocelí [3]

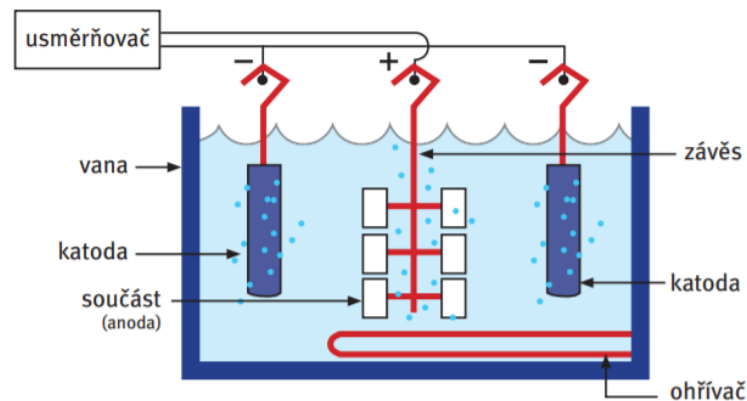
Chemickým leštěním lze dosáhnout drsnosti povrchu  $R_a$  v rozmezí 0,2 až 0,4  $\mu m$ . Působení roztoku je rovnoměrné a odebrání materiálu tedy probíhá na všech místech součásti stejně, a to přibližně rychlostí jeden  $\mu m$  za minutu. Jeho výhodou je poměrně levné provedení samotné operace, nicméně náklady na regeneraci roztoků, tzn. odstranění leštěného materiálu z roztoku a jeho navrácení do oběhu, jsou vysoké. [3]

Tab. 2 – Složení roztoků na chemické leštění některých kovů (na 1 litr vodného roztoku) [3]

Složky roztoku a režim práce	Jednotka koncentrace	Leštěné kovy a slitiny								
		uhlíková ocel			chromniklová		mosaz	nikl	měď	
		číslo roztoku								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kyselina sírová	g/l	<del>15-30</del>	230	230	90	790	<del>100</del>	<del>180</del>	100	250-270
Kyselina dusičná	g/l	15-30	40	40	180	20	100	180	300	250-270
Kyselina chlorovodíková	ml/l	16-40	70	70	725	1	<del>5</del>	<del>5</del>	<del>5</del>	<del>5</del>
Kyselina octová	ml/l	<del>90-150</del>	<del>70</del>	<del>70</del>	56	<del>190</del>	400	230	500	<del>400</del>
Kyselina fosforečná	ml/l	90-150	<del>70</del>	<del>70</del>	<del>725</del>	<del>1</del>	500	585	100	400
Peroxid vodíku (30%)	ml/l	<del>16-40</del>	<del>70</del>	<del>70</del>	<del>725</del>	190	<del>400</del>	<del>230</del>	<del>500</del>	<del>400</del>
Chlorid sodný	g/l	<del>16-40</del>	6	6	<del>725</del>	20-40	<del>400</del>	<del>230</del>	<del>500</del>	<del>400</del>
Kostní klíž	g/l	<del>16-40</del>	<del>70</del>	10-12	<del>725</del>	<del>1</del>	<del>400</del>	<del>230</del>	<del>500</del>	<del>400</del>
Nitrid sodný	g/l	<del>16-40</del>	<del>70</del>	<del>70</del>	<del>725</del>	<del>1</del>	<del>400</del>	<del>230</del>	<del>500</del>	10-12
Teplota roztoku	°C	80	50-80	70-75	80-150	20-40	20-40	55-80	85-95	30-40
Čas leštění	min	1-10	3-30	5-30	3-20	1-2	3-10	5	1	1-3

### 2.1.3 Elektrolytické leštění

Při elektrolytickém leštění dochází k úpravě povrchu materiálu elektro-chemickou reakcí. Tato reakce zapříčiňuje odebrání kovu ve formě iontů pomocí elektrolýzy. [10]

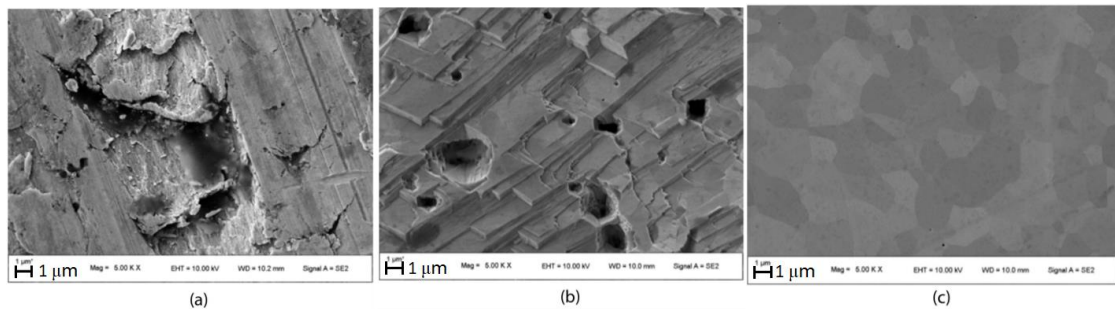


Obr. 5 – Schéma elektrolytického leštění [10]

Upravovaná součást, jakožto anoda, je připojena na kladný pól zdroje pomocí závěsů vyrobených z titanu, mědi nebo bronzu. Katody, které jsou připojeny na záporný pól zdroje, jsou většinou desky vyrobené z olova, mědi, nebo oceli. Celý proces zprostředkovává stejnosměrný elektrický proud (usměrňovač ve schématu na Obr. 5 zajišťuje pouze usměrnění na stejnosměrný proud). Jako prostředník přenosu iontů slouží vodivý elektrolyt, nejčastěji roztok kyseliny sírové či fosforečné. Díky kladnému náboji na leštěné součásti (anodě) se z povrchu uvolňují ionty, které jsou přitahovány k záporně nabitým deskám (katodám). Tento přesun vyvolá rovnoměrné odebrání malé vrstvy na povrchu součásti, a tím ji zbavuje otřepů a jiných nerovností. Většinu takto odebraných iontů pohltí roztok elektrolytu. Zbytek z nich doputuje až na katodu, na které se tvoří povlak. Z tohoto důvodu se musejí katody čistit, aby nedocházelo ke snižování účinnosti elektrolytického leštění. Mezi parametry ovlivňující intenzitu leštění patří velikost procházejícího proudu, čas, po který reakce probíhá a čistota použitého elektrolytu. U elektrolytického leštění je potřeba předčištění a dokončovací úpravy součásti. Před operací je třeba součást odmastit a očistit od zoxidované vrstvy a po operaci je nutné se zbavit

zbytků elektrolytu na součásti. Proces elektrolytického leštění trvá v rozmezí od dvou do dvaceti minut. [10]

Studie zabývající se chemickým leštěním wolframu (obsah wolframu v materiálu > 99,99 %) na Obr. 6 znázorňuje, jak vypadá základní povrch (a), leštěný povrch po dobu tří minut (b) a leštěný povrch po dobu dvaceti minut (c). [11]



Obr. 6 – Porovnání fotografií před a po elektrolytickém leštění – (a) neleštěný povrch, (b) 3 minuty elektrolytického leštění, (c) 20 minut elektrolytického leštění [11]

Tab. 3 – Výsledné hodnoty drsnosti v závislosti na parametrech elektrolytického leštění vzorku z materiálu Ti-13Nb-13Zr [12]

Vzorek č.	Proudová hustota [ $A \cdot dm^{-2}$ ]	Čas [min]	Náboj [A·h]	Drsnost Ra [ $\mu m$ ]
1	40	5	0,12	0,15
2	50	4	0,12	0,17
3	60	3,5	0,12	0,16
4	50	2,9	0,08	0,27
5	50	3,4	0,11	0,21
6	50	4,4	0,14	0,19
7	50	6,2	0,17	0,17

Data z Tab. 3 jsou výsledkem experimentu elektrolytického leštění slitiny titanu. Výchozí hodnotou drsnosti povrchu bylo  $Ra = 27 \mu m$ . Nejlepšího výsledku bylo dosaženo na vzorku č. 1, kde byla dosažena drsnost  $0,15 \mu m$ . Nicméně tento vzorek nevykazoval zrcadlový lesk, a tedy co do lesku, bylo nejlepších výsledků dosaženo na vzorku č. 6. [12]

Tvar při elektrolytickém leštění nehraje významnou roli, což je velkou výhodou. Dále také nedochází k tepelnému ovlivnění a zanesení pnutí do součásti. Výsledná drsnost povrchu může být stejná, jako při leštění

mechanickém, ale rozdíly se projeví na mikrodrsnosti, kde po elektrolytickém leštění nebudou zaneseny zbytky leštící pasty, ani viditelné škrábance po pohybech nástroje. [10]

#### 2.1.4 Komparace jmenovaných druhů leštění

Tab. 4 srovnává všechny výše zmíněné druhy leštění a uvádí jejich výhody a nevýhody. Lze v ní vidět komparaci metod na základě geometrie leštěné součásti, tedy její geometrické složitosti, negativní materiálové změny, které metoda na součásti zanechá po její aplikaci, potřebnou velikost prostoru pro jejich provádění reprezentovanou řádkem potřebná výrobní oblast a další srovnávané aspekty jednotlivých metod. Pojem jakost povrchu je zde myšlen parametr Ra, tedy drsnost povrchu.

Tab. 4 – Porovnání jednotlivých druhů leštění [3], [6], [12], [13]

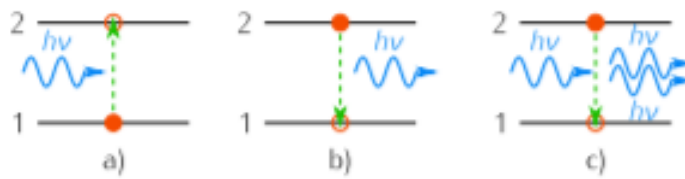
	Mechanické leštění	Chemické leštění	Elektrochemické leštění
Produktivita	Průměrná	Nízká	Průměrná
Geometrická omezení	Jednoduchý profil	Komplexní profil	Komplexní profil
Materiálové změny	Možnost implementace náhodných částic do materiálu	Leptání	Špatné pro ploché povrchy
Možnosti automatizace	Žádné	Žádné	Možné
Potřebná výrobní oblast	Malá	Střední	Střední
Ekologická úroveň	Nízká	Nízká	Nízká
Spotřeba energie	Střední	Nízká	Vysoká
Potřebná kvalifikace pracovníků	Vysoká	Střední	Střední
Jakost povrchu	Velmi dobrá	Průměrná	Průměrná

## 2.2 Laserové technologie

K leštění laserovými technologiemi je třeba přistoupit od začátku, a to samotným popisem laseru. Laser je akronym anglického názvu „light amplification by stimulated emission of radiation“, který ve své podstatě vystihuje celé fungování laserového systému. Volně lze tento název přeložit jako zesílení světla pomocí stimulované emise záření. [14]



### 2.2.1 Princip fungování laseru



Obr. 7- Spontánní a stimulovaná emise [15]

Excitace (Obr. 7 vlevo) je jev, kdy se elektronu na nižší energetické hladině dodá energie o přesné velikosti (tomuto jevu se říká absorpce) aby byl schopen přejít na energeticky vyšší hladinu. [14]

Tato energie se bude rovnat součinu Planckovy konstanty a frekvence uvolněného vlnění podle rovnice:

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1 = \Delta E \quad (2.1)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta a  $\nu$  je frekvence uvolněného vlnění. [15]

Dále, jelikož elektron neseťvá v této vyšší hladině, dojde k emisi energie ve formě fotonu. Tato emise může být spontánní (Obr. 7 uprostřed), nebo stimulovaná (Obr. 7 vpravo). Jde-li o spontánní emisi, tak elektron samovolně přejde z excitovaného stavu do stavu základního a emitovaný foton nebude mít předem určený směr. Doba života (čas, po který zůstává elektron v excitovaném stavu) se pohybuje v řádech mikrosekund až nanosekund. Ale bude-li se jednat o emisi stimulovanou, což znamená, že se elektronu dodá tatáž energie, která byla potřebná k jeho excitaci, dojde k emisi dvou fotonů o stejné energii a stejném předem určeném směru. Tyto vyzářené fotony způsobí lavinový efekt na dalších excitovaných elektronech v aktivním prostředí laseru a vzniká tím kýžené „světelné zesilování“. [14]

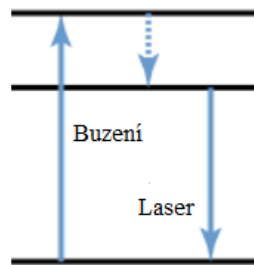
K zesílení dojde ale pouze za podmínky, kterou je tzv. inverze neboli inverzní populace hladiny. Tento jev popisuje rovnice 2.2.

$$\frac{N_m}{N_n} > 1 \quad (2.2)$$

Kde  $N_m$  je počet elektronů na vyšší energetické hladině a  $N_n$  je počet elektronů na nižší energetické hladině. Pokud světlo prochází prostředím, ve

kterém platí rovnice 2.2, dochází ke světelnému zesilování. Tento jev se nazývá inverzní populací. [16]

Při použití dvouhladinového systému stimulované emise laseru se jen těžko dosahuje inverzní populace z důvodu stejné energie čerpání laseru a emitovaných fotonů. Proto jsou běžné vícehladinové systémy (tří a čtyřhladinové). Schéma tříhladinového systému je na Obr. 8. [17]



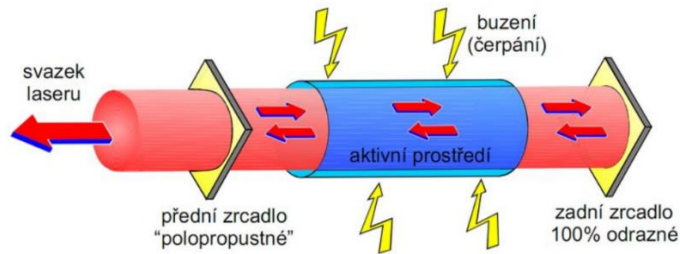
Obr. 8 – Schéma tříhladinového laserového systému [18]

Principem tříhladinového systému je budit aktivní prostředí vyšší energií, než má výsledný emitovaný foton. Tímto buzením se elektron dostane do třetí energetické hladiny, která je velice nestabilní, a proto rychle padá do hladiny druhé, která je nazývána metastabilní. Na této hladině elektron setrvává déle a je zde delší čas pro proběhnutí stimulované emise. [17]

Výše popsaného principu se využívá v konstrukci laserů, kde je nejdůležitějším členem rezonátor. Ten se skládá, v té nejjednodušší formě, z jednoho nepropustného zrcadla, aktivního prostředí laseru a jednoho polopropustného zrcadla, které začíná propouštět fotony až při určité intenzitě záření. Schéma rezonátoru je na Obr. 9. V konstrukcích lze použít mnoho typů aktivního prostředí, které ovlivní výsledné parametry laseru. Dalším prvkem každého aktivního prostředí laseru je buzení neboli čerpání. Aktivní prostředí, ze kterého jsou emitovány všechny fotony výsledného svazku, je třeba uvést do stavu inverzní populace. Přesně k tomuto účelu slouží buzení, jež je možné realizovat mnoha způsoby. Například existuje buzení výbojkami, chemickou reakcí, nebo elektricky. [19]

Po tomto procesu má laserový svazek unikátní vlastnosti a lze s ním dále pracovat pomocí zrcadel a fokusovat ho. Výsledné záření je

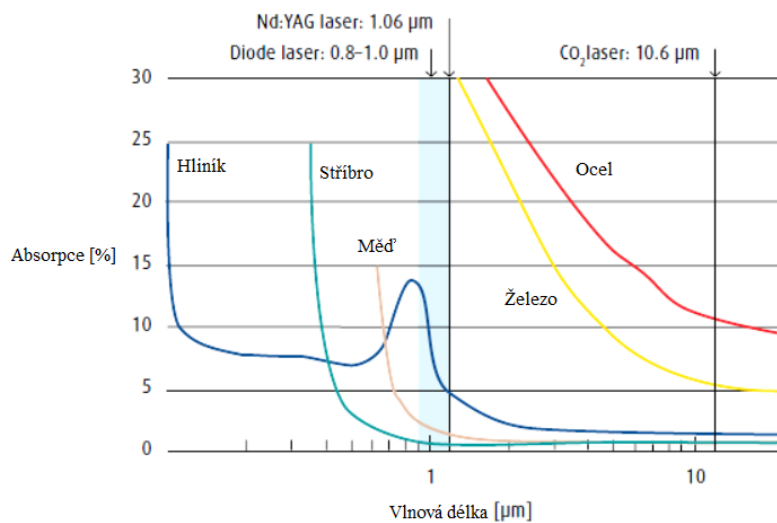
monochromatické, koherentní a kolimované. To znamená, že obsahuje pouze velmi úzké pásmo vlnových délek, jeho vlnění je „ve fázi“ (jednotlivé vlny oproti sobě nejsou nijak posunuté) a nerozbíhají se (mají stejný směr). [19]



Obr. 9 – Schéma konstrukce otevřeného rezonátoru [19]

## 2.2.2 Interakce laseru s materiálem

Interakci laseru s materiálem lze popsat několika faktory. Jedním z nich je absorpce. Absorpce záření je vlastnost materiálu pohltit energii záření. Udává se v procentech. Jedním z faktorů, které ji ovlivňují, je vlnová délka záření. Každý materiál absorbuje některé vlnové délky méně a některé více (jak je zobrazeno na Obr. 10). Čím vyšší je procento absorpce daného materiálu, tím více energie záření je předáno materiálu při jeho interakci. Tímto ukazatelem je důležité se řídit při výběru vlnové délky laseru k určitému typu materiálu. Na Obr. 10 je graf absorpce v závislosti na vlnové délce. [20]



Obr. 10 – Absorpce záření v závislosti na materiálu [21]

Absorpce je velmi úzce spojena s odrazivostí materiálu. Pokud je uvažován neprůhledný materiál, je možné popsat vztah mezi absorpcí  $A$  a odrazivostí  $R$  podle rovnice 2.3. [22]

$$A = 1 - R \quad (2.3)$$

Interakce laseru s materiálem se podle rovnice 2.3 skládá čistě z absorpce a odrazivosti. Toto tvrzení platí pouze za předpokladu neprůhledného (netransparentního) materiálu. Pokud se jedná o materiál transparentní, je tedy nutné uvažovat také vliv transmise  $T$  (průchod záření materiálem) a rovnici 2.3 přepsat do tvaru 2.4. [22]

$$A = 1 - (T + R) \quad (2.4)$$

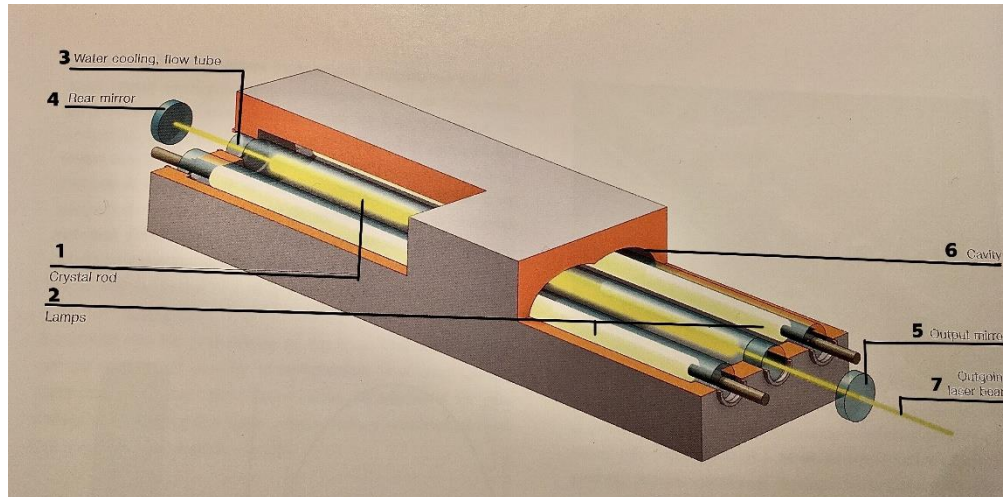
### 2.2.3 Typy laserů

Existuje mnoho parametrů, podle kterých je možné lasery rozdělit do kategorií. Nejvíce nasnadě je ale druh aktivního prostředí. Podle něj je možné uvádět lasery pevnolátkové, kapalinové a plynné. [23]

**Lasery pevnolátkové** se dále vyskytují ve čtyřech tvarech aktivního krystalu, a to jako tyčové, diskové, deskové a vláknové. [24] Všechny tyto lasery byly dříve buzeny opticky, např. za použití obloukových lamp. Nyní je tato varianta částečně nahrazena také buzením diodovým a za pomoci diodových laserů. [25] Nejčastěji jsou použity jako aktivní prostředí krystaly z materiálů s názvy Nd:YAG a Yb:YAG, kde YAG znamená, že se jedná o směs yttria, hliníku a granátu a Nd, či Yb určuje jejich příměs. V tomto případě neodym, nebo yterbium. [14] Tyto prvky, tedy prvky vzácných zemin jsou dobře použitelné, protože jejich valenční vrstva je nezaplňená a lze je dobře přivést do excitovaného stavu. [26]

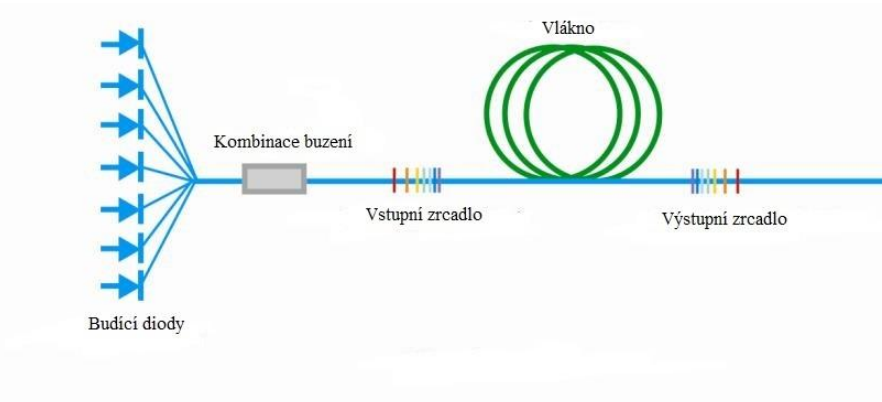
**Tyčový pevnolátkový laser** (znázorněn na Obr. 11) je historicky první typ laseru. Nevýhodou těchto laserů je jejich přehřívání v důsledku tepelných energetických ztrát v rezonátoru, a proto musí být v konstrukci vždy umístěno chlazení, což ale způsobuje nerovnoměrné rozložení teplot v závislosti na průměru tyče. Čím větší je rozdíl teplot mezi obvodem a osou

tyče, tím je laserový svazek méně kvalitní. Tyčové pevnolátkové lasery se dají řadit sériově za sebe, a proto je jejich výkon dobře korigovatelný. [14] Jejich účinnost je však velmi nízká. Dosahuje pouze 2 až 3 %. [23]



Obr. 11 – konstrukce pevnolátkového tyčového laseru, kde pod číslem 1 je aktivní krystal, 2 jsou obloukové lampy, 3 je trubice pro vodní chlazení, 4 je nepropustné zrcadlo, 5 je výstupní zrcadlo, 6 je dutina pro umístění jednotlivých částí laseru a 7 je výsledný svazek. [14]

**Vláknové pevnolátkové lasery** naproti tomu nepotřebují vodní chlazení, jelikož disipace tepla do okolí je dostatečná pro jeho odvod. Jejich konstrukce je poněkud složitější než u tyčových laserů. Problematické je zde především buzení. Je těžké a nákladné dostat buzení rovnoměrně podél jeho délky, která je mnohonásobně větší než jeho průměr. Toto buzení se proto obstarává pomocí diodového laseru (schéma vláknového laseru na Obr. 12). [14]

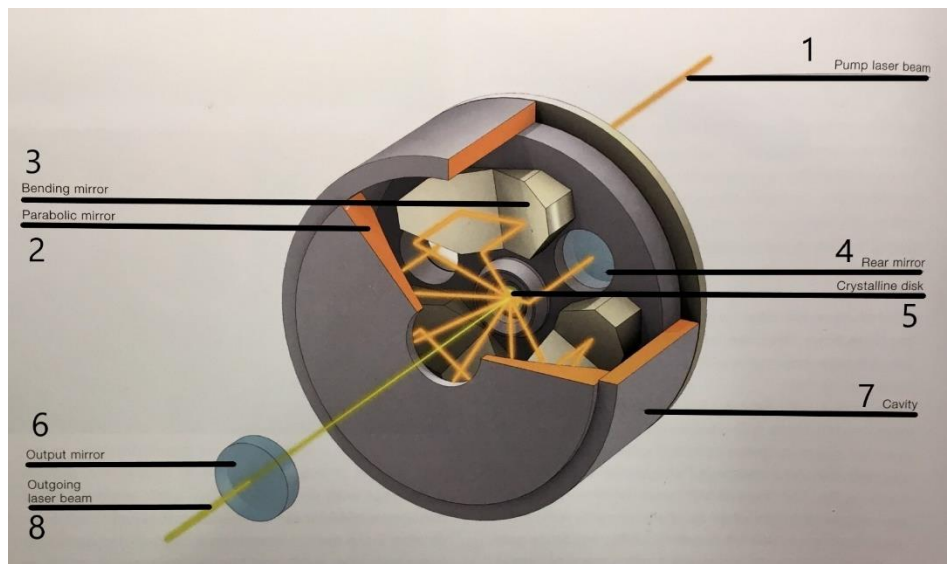


Obr. 12 – Schéma vláknového laseru [27]

Aktivní prostředí vláknového laseru je trojvrstvé. Vnitřní vrstva je aktivní jádro, kolem nějž je vrstva zprostředkovávající účinné buzení. Vnější opláštění má za úkol zajistit kvalitní odrazivost světla dovnitř vlákna a zároveň chránit celý systém zvenčí. [14]

Vláknové lasery vykazují nejvyšší účinnost ze všech typů laserů. Ta dosahuje 25 % až 35 % u komerčně využívaných přístrojů. [28] Výkony těchto laserů se v poslední době velmi zvýšily a dosahují až 20 kW. [29]

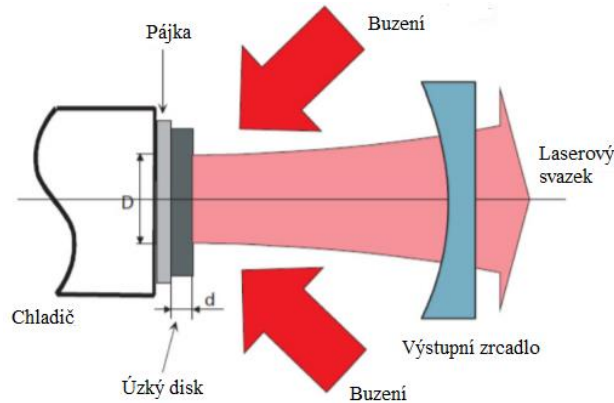
**Diskové pevnolátkové lasery** jsou nejmodernější z výše uvedených. Jejich aktivní prostředí je ze stejného materiálu (např. Yb:YAG), ale má odlišný tvar, a to tvar disku, který může mít průměr kolem patnácti milimetrů a tloušťku dvou desetín milimetru. Na Obr. 13 je zobrazena jeho konstrukce. [14]



Obr. 13 – Konstrukce diskového pevnolátkového laseru, kde po číslem 1 je budící svazek, 2 je parabolické zrcadlo, 3 jsou ohýbací zrcadla, 4 je zadní zrcadlo, 5 je krystalový disk, 6 je výstupní zrcadlo, 7 je dutina pro umístění systému a 8 je výstupní laserový svazek [14]

Rezonátor má u tohoto typu laseru pozměněnou podobu. Budící svazek od diodového laseru, který je nastaven na průměr až několika milimetrů, projde zadní stěnou na parabolické zrcadlo, odkud se odrazí na disk, který absorbuje jen část záření. Díky parabolickému, zadnímu a ohýbacím zrcadlům projde svazek skrz disk celkem šestnáctkrát. Až nakonec dopadne kolmo na disk, kterým projde a opustí rezonátor skrz výstupní zrcadlo. Záření vykazuje vysokou kvalitu oproti tyčovému laseru,

jelikož disk se zahřívá po celém svém povrchu jednotně, a tak je eliminován teplotní vliv na zakřivení svazku laseru. [14] I přes tuto skutečnost se diskové lasery chladí. Na jejich chlazení se používá chladič, který bývá umístěn na opačné straně disku. Toto umístění je na Obr. 14. [30]



Obr. 14 – Chlazení diskového laseru pomocí chladiče [30]

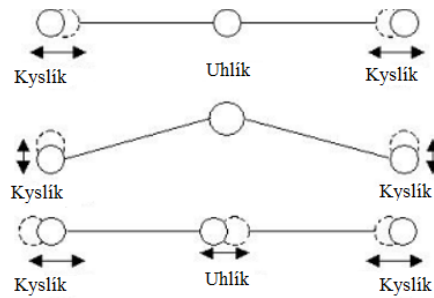
Diskový typ laseru je schopen dosahovat také vysokých výkonů. Jeho účinnost je taktéž velmi vysoká a mnohdy se vyrovná i vláknovým laserům s účinnostmi 30 % až 35 %. [31] Jako extrém lze uvést experiment dle literatury [32], ve kterém bylo dosaženo účinnosti 41 % a 58 % na diskových laserech s aktivním prostředím Tm:YAG a Ho:YAG. [32]

**Plynové lasery** jsou rozdílné od pevnolátkových laserů právě svým aktivním prostředím. Nejčastějším aktivním prostředím je oxid uhličitý, nebo např. kombinace neonu a helia. Stejně jako pevnolátkové lasery, i plynové se dají dále dělit. [33]

Lze je dělit na lasery atomární, molekulové a iontové. Helium-Neonový laser jakožto ukázkový zastupitel atomárních plynových laserů, má aktivní prostředí složené právě z těchto dvou plynů. Neon je zde používán jako složka, ze které se emituje laserové záření, nicméně je zde minoritní složkou. Majoritní složkou je tedy helium, a to v poměru cca. 85 % ku 15 %. Tyto lasery však nejsou příliš výkonné, a tak nejsou využívány v průmyslové praxi na úpravu kovů. Jejich výkon se pohybuje pouze kolem 100 mW. [34]

Molekulové plynové lasery, jako např. CO<sub>2</sub> laser, CO laser, nebo dusíkový laser, nemají jako aktivní medium atomy, nýbrž celé molekuly. Jejich funkce zde bude popsána na laseru s aktivním prostředím

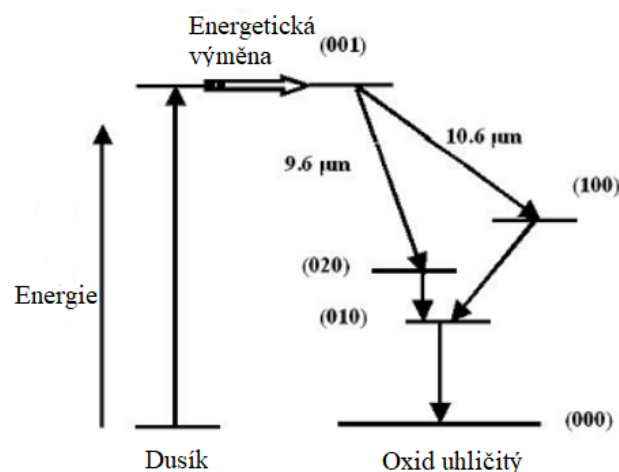
s molekulami CO<sub>2</sub>. Tato molekula má tři základní módy vibrací, do kterých se může po předání energie dostat (Obr. 15). [34]



Obr. 15 – vibrační možnosti CO<sub>2</sub> molekuly nahoře symetrický mód, uprostřed ohýbací mód a dole asymetrický mód vibrace [34]

Při symetrickém módu vibrací molekul oxidu uhličitého dochází k zrcadlovým kmitům kyslíků od nebo k atomu uhlíku a uhlík tak zůstává na stejném místě (Obr. 15 nahoře). U ohýbacího módu (Obr. 15 uprostřed) dochází ke kmitům vertikálním a atom uhlíku se vždy pohybuje proti směru pohybu kyslíků (tedy nahoru nebo dolů) a během asymetrických vibrací se pohybují alespoň část vzdálenosti oba kyslíky ve stejném směru a z tohoto důvodu tedy kmitá i atom uhlíku (Obr. 15 dole). [34]

Složení aktivního prostředí je v poměru 15 % CO<sub>2</sub>, 15 % N<sub>2</sub> a 70 % He. [34] Buzení CO<sub>2</sub> laserů probíhá pomocí doutnavého elektrického výboje. [35] Cílem výboje není přímo excitovat molekuly oxidu uhličitého, ale excitovat molekuly dusíku a nadále se řídit následujícím schématem:



Obr. 16 – Schéma energetické přeměny CO<sub>2</sub> laserů [34]



Způsob emitace fotonů v CO<sub>2</sub> laserech je následující (Obr. 16). Elektrickým proudem dojde k excitaci molekul dusíku, které svým pohybem předají energii molekulám oxidu uhličitého. Tyto molekuly začnou vibrovat asymetrickým způsobem (bod 001 na Obr. 16). Dále se asymetrický způsob vibrací změní buď na symetrický, nebo ohýbací a vyzáří tím energii ve formě fotonu. Na tomto kroku závisí výsledná vlnová délka laseru. Pokud se vibrace změní na symetrický způsob, vlnová délka bude 10,6 μm (posun do bodu 100 na Obr. 16). Změní-li se na ohýbací způsob, vlnová délka se bude rovnat 9,6 μm (bod 020 na Obr. 16). Od této chvíle hraje svou roli ve směsi plynů také helium, které odebere zbylou energii molekulám CO<sub>2</sub> a dostane je zpět do bodu 000 na Obr. 16, aby mohl celý cyklus proběhnout znovu. [34]

Účinnosti těchto laserů se pohybuje od 10 % do 20 % a jejich výkon lze také zařadit do širokého rozmezí, a to mezi pár miliwatt až do řádů kilowatt. Díky vysoké kvalitě svazku, dobré účinnosti a vysokým dosahovaným výkonům se CO<sub>2</sub> lasery využívají v průmyslových odvětvích na řezání, značení, svařování, nebo jiné materiálové úpravy. [34] Díky své vlnové délce 10,6 μm, která je lehce absorbovatelná nekovovými materiály (např. dřevo nebo plasty), je velmi efektivní právě pro jejich úpravu. [36]

Posledním odvětvím plynových laserů zde bude excimer laser. Tyto lasery vyzařují převážně v ultrafialovém spektru, tzn. od 100 do 400 nm. Slovo excimer, a tedy i název této skupiny laserů, je složený ze dvou slov, excitovaný a dimer (molekula dvou atomů). Tento dimer však existuje pouze v excitovaném stavu a ve stavu základním se opět rozpadá. Pokud se jedná o dimer, jakožto aktivní prostředí laserů, je složen vždy z jednoho atomu vzácného plynu (Xenon, Argon, Krypton atd.) a halogenu (Chlor, Fluor, Brom, Jod). Princip laseru je opět stejný, jako u laserů pevnolátkových, s rozdílem, že excitací vzácných plynů umožníme vytvoření jeho molekuly s halogenem (za normálních okolností vzácné plyny netvoří molekuly). Tyto molekuly jsou ale velmi nestálé, a tak velice rychle (v řádech ns) dojde k emisi fotonu. [34] V Tab. 5 je uveden přehled nejpoužívanějších průmyslových laserů v závislosti na jejich vlnové délce, aktivním prostředí a spektru

vyzařovaného světla. V kontextu s kapitolou 2.2.2 dává tabulka obecné informace o použitelnosti laserů pro různé druhy materiálů.

Tab. 5 – Porovnání některých druhů laserů z hlediska aktivního prostředí a vlnových délek [37]

Aktivní prostředí	Vlnová délka [nm]	Poznámka
argon – fluor	193	UV, excimer
krypton – fluor	248	UV, excimer
xenon – chlor	308	UV, excimer
helium – kadmium	325, 442	UV, viditelné
argon	488, 514	viditelné
rubín	694	viditelné
Nd:YAG	532, 1064	viditelné, IČ
helium – neon	543, 594, 612, 633, 1150, 3390	viditelné, IČ
polovodičové diody	630–1600	viditelné, IČ
erbium	1540	IČ
oxid uhličitý	9600, 10600	IČ

#### 2.2.4 Klasifikace laserů dle pracovního režimu

Pracovní režimy laserů je možné rozdělit do několika skupin:

- a) Kontinuální režim
- b) Impulzní režim
- c) Pulzní režim
- d) Ultra-krátkopulzní režim

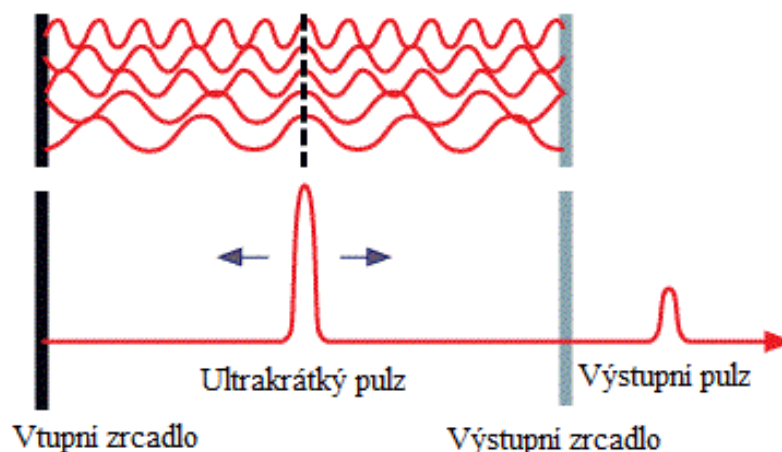
**Kontinuální režim** laseru generuje frekvenci záření, která se rovná frekvenci kvantového přechodu v rezonátoru. Jedná se o nepřerušovaný laserový svazek, který má ovšem své podmínky. Aby bylo záření opravdu kontinuální, je třeba, aby buzení laseru a jeho geometrické vlastnosti byly konstantní (neměnicí se v čase). Toho se dá dosáhnout pouze za předpokladu, že odchylky od ideálního stavu laserového systému jsou co možná nejmenší a nedochází tím tedy ke změně ve výsledném záření. Toho může být dosaženo dobrou konstrukcí, jako např. použitím rezonátoru s nízkou tepelnou roztažností. Výsledkem kontinuálního režimu je tedy

záření o stálé intenzitě, která je dána vlastnostmi aktivního prostředí a ztrátami v samotném rezonátoru. [26]

**Impulzní režim** generuje pouze jeden osamocený impuls laserového záření. Toho je možné docílit ovládním prvků v rezonátoru, nebo buzením aktivního prostředí. [26]

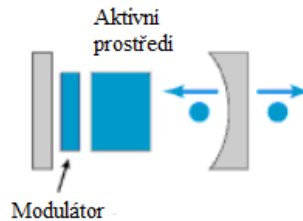
**Pulzní režim** dokáže vytvářet sled pravidelně se opakujících impulsů, které jsou velmi krátké a mají velmi vysokou frekvenci opakování impulsů (kHz – MHz). Délka impulsů dosahuje délek až v řádech pikosekund. Vytvoření těchto impulsů lze dosáhnout například metodou zvanou Q-switching. Ta je založena na kontinuálním buzení aktivního prostředí malou energií, ale rezonátor je přerušen závěrkou. Když množství excitovaných atomů vyprodukované v aktivním prostředí dosáhne určité hladiny, závěrka se otevře a vypustí z rezonátoru impuls laserového záření a celý tento proces se opakuje. [14] Q-switching může být jak mechanický, zprostředkovaný rotujícím zrcadlem, tak na bázi elektrického či akusticko-optického spínání. [38]

**Ultra-krátkopulzní režim** již není možné vytvářet pomocí Q-switchingu. Proto se používá jiná metoda, která se nazývá mode-locking. Jde zde o zfázování jednotlivých vln v rezonátoru s různou frekvencí. Jelikož jsou tyto vlny ve fázi, skládají se většinu času v energeticky nevýznamné záření. Pokud se ale potkají opět ve zfázované části, vyprodukují energetické maximum a vytvoří daný impuls. Tento jev je na Obr. 17. [39]



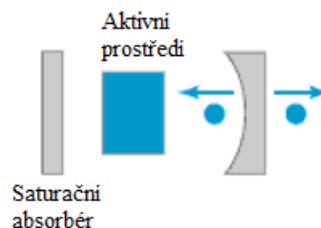
Obr. 17 – Tvorba impulsů při metodě Mode-locking [40]

Mode-locking lze rozdělit na aktivní a pasivní. Při aktivním mode-lockingu je v rezonátoru umístěn modulátor, nejčastěji akusticko-optický nebo elektro-optický, který zapříčiní právě zmíněné fázové „uzamčení“ (schéma na Obr. 18). Tento způsob může produkovat až pikosekundové impulzy. [39]



Obr. 18 – Schéma aktivního mode-lockingu [39]

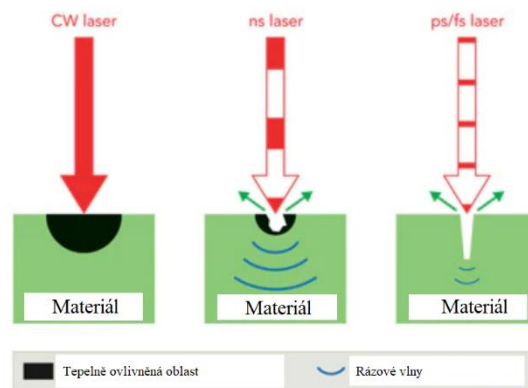
Princip pasivního mode-lockingu spočívá v saturačním absorbéru, který je umístěn v rezonátoru namísto zcela propustného zrcadla (schéma na Obr. 19). [39] Pasivním mode-lockingem lze dosáhnout ještě mnohem kratších pulzů než mode-lockingem aktivním. Nejkratší z těchto pulzů může dosáhnout délky pouhých pět femtosekund. [41]



Obr. 19 – Schéma pasivního mode-lockingu [39]

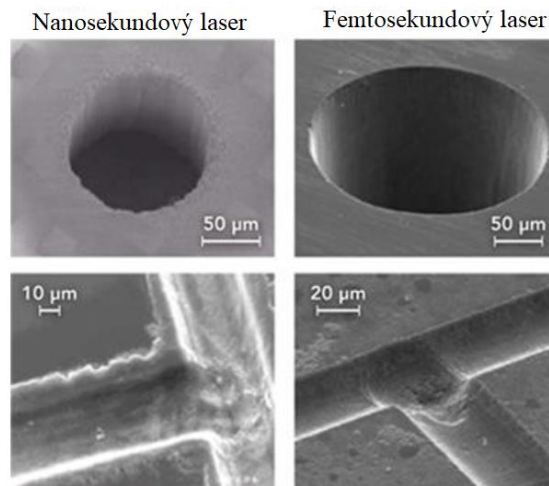
Ultra-krátkopulzní lasery se používají pro úpravu materiálu, kde je nežádoucí tepelně ovlivněná oblast. Důvod je zobrazen na Obr. 20. Jde o princip odebrání materiálu, který je se snižující se délkou impulzů šetrnější k materiálu kolem obráběné oblasti. Princip odebrání materiálu při kontinuálním režimu laseru je v jeho tavení a následném odstranění z řezu. Tímto způsobem dochází k významnému tepelnému ovlivnění. Pokud je použit pulzní režim laseru, dojde k disipaci tepelné energie díky délce trvání jednotlivých impulzů a tepelně ovlivněná oblast se zmenšuje. Je-li použit

ultra-krátkopulzní režim, je ablace materiálu zprostředkována pouze jeho vypařením, a tak se zde tepelně ovlivněná oblast nevyskytne. [42]



Obr. 20 – Teoretické porovnání kontinuálního, nanosekundového a piko/femtosekundového laseru při obrábění [42]

Nanosekundová laserová ablace vzniká současným vytlačováním nataveného materiálu pomocí par z obrobku a zpětným tlakem svazku. Natavený materiál opětovně tuhne, což vede ke špatné kvalitě povrchu v porovnání s femtosekundovou nebo pikosekundovou ablací. U ultrakrátkých pulzů (fs až ps) je délka pulzu kratší, než potřebný čas k přenosu tepla mezi volnými elektrony a krystalickou mřížkou. Tímto způsobem je dosaženo velmi vysokých teplot a tlaků v malé hloubce (např.  $1\mu\text{m}$ ). Ozářený materiál je extrémně rychle zahřátý na teplotu páry, aniž by prošel fází tání. Výsledný povrch je hladký a bez již zmíněné tepelně ovlivněné oblasti. Porovnání těchto dvou jevů je viditelné na Obr. 21. [43]

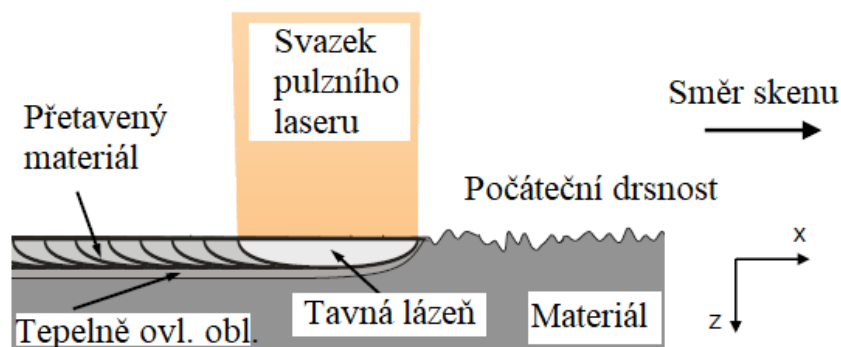


Obr. 21 – Praktické porovnání nanosekundové a femtosekundové ablace [43]

### 3 Možnosti leštění laserem

Mechanické leštění, kterým se doposud leští většina takto upravovaných součástí, má mnoho nevýhod. Pokud se např. jedná o 3D součást se složitější geometrií, je náročné vyhovět požadavkům na vyleštění veškerých ploch součástí. V důsledku toho může vést k nehomogenitě vyleštěného povrchu, jelikož nějaké plochy jsou hůře dostupné. Výsledek tohoto leštění závisí na mnoha faktorech. Materiál, jeho kvalita, i schopnosti pracovníka ovlivňují vyleštěný povrch. Co se týče ekonomického pohledu na věc, je neautomatické leštění poměrně časově náročné, nákladné a jeho výsledky nelze opakovat s vysokou přesností. [44]

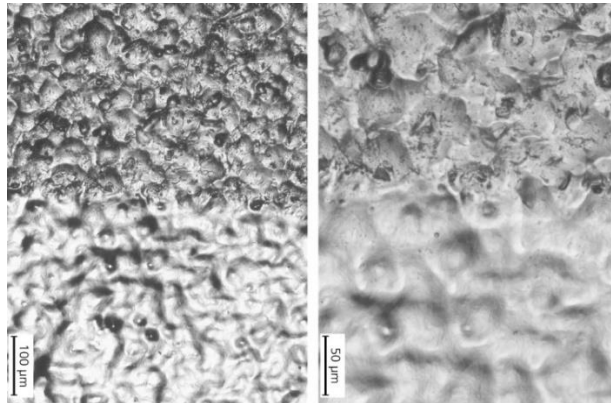
Většinu negativních faktorů, které zde byly jmenovány, lze odstranit právě laserovým leštěním. Je dobře automatizovatelné, rychlé, přesné, opakovatelné a přináší i další výhody. [44]



Obr. 22 – Schéma laserového leštění pulzním laserem [44]

Laserové leštění pomocí delších pulzů (ns) spočívá v natavení tenké vrstvy na povrchu součásti (schéma na Obr. 22). Při pohybu laseru se vytváří tavné lázně o velikosti, která odpovídá průměru laserového svazku. Současně s posuvem svazku v ose x (podle Obr. 22) se postupně povrch přetváří a dochází k jeho vyhlazování. Při této metodě tedy nedochází k žádnému úběru materiálu. [44]

K leštění laserem je možné použít jak kontinuální, tak pulzní režim laseru. Nutno ale podotknout, že pulzní lasery jsou šetrnější k materiálu a při jejich použití nedochází k intenzivnímu vytváření tepelně ovlivněné oblasti. Celý proces se často skládá ze dvou fází, tedy laser na povrch působí dvakrát. V prvním kroku se vyhladí pouze drsnost povrchu, ale vlnitost zůstává a v kroku druhém již dochází k vyhlazení vlnitosti. Dosažené parametry, ke kterým se dospělo v experimentu na slitinách titanu Ti6Al4V jsou  $R_a = 0,08 \mu\text{m}$  a na oceli AISI H11  $R_a = 0,05 \mu\text{m}$ . Laser s vlnovou délkou 1064 nm byl v tomto experimentu nastaven na frekvenci 60 kHz a délku pulzu 220 ns. Příklad, jak vypadá vyleštěný povrch oproti neleštěnému pomocí laseru, je vidět na Obr. 23. V tomto případě není výsledná drsnost rovna  $0,08 \mu\text{m}$ , ale vyšší. [44]



Obr. 23 – Porovnání leštěného a neleštěného povrchu AISI H11 [44]

Pokud je k leštění použit laser s ultra-krátkými pulzy (fs), není tepelně ovlivněná oblast patrná vůbec. Nejde však o výše zmíněný princip natavování materiálu, čímž dochází k vyhlazení, ale k cílenému odebrání materiálu v malém měřítku. K tomuto účelu je nutné použít správné

množství energie laseru. Tato energie musí být blízko energii potřebné ke studené ablacii (ablační práh). [45]

## 4 Experimentální část

### 4.1 Teoretické podklady experimentu

Při rešerši publikací bylo nalezeno dvacet článků na téma leštění laserem s různými parametry. Co se týče materiálu, se nejčastěji laserovým leštěním upravuje povrch ocelí (nástrojová, či nerezová), dále bývají experimenty prováděny na titanových slitinách a slitinách hliníku. Z těchto dvaceti článků se týkalo pouze šest z nich ultra-krátkopulzních laserů. Další články se zabývaly leštěním kontinuálními lasery a lasery s delšími pulzy, kde je podstata leštění odlišná. Jde tam o intenzivní tavení materiálu, který se rovnoměrněji rozprostře a vytvoří tak kvalitnější povrch.

V článku Picosecond laser pulse polishing of ASP23 steel [46] je velký důraz kladen především na strategii šrafování. Výsledky jsou v tomto článku porovnávány pouze na základě určité šrafovací strategie a je vybrána nejlepší z nich. V dalším článku, a to Minimizing the surface roughness for silicon ablation with ultrashort laser pulses [47], je naopak nejdůležitějším parametrem překryv laserového skenování. Autoři hledají optimální nastavení příčného a podélného překryvu pro dosažení co nejnižší drsnosti povrchu. A v článku Surface polishes of the SKD 61 tool steel by a femto pulse laser operating in a wide range of powers [48] je věnována většina prostoru porovnávání vyleštěných povrchů v závislosti na použité intenzitě energie a jejímu vztahu k ablačnímu prahu.

Tyto tři nastíněné články byly hlavním podkladem pro návrh experimentu, který je podrobně popsán v kapitole 4.2. Cílem návrhu bylo postihnout co nejvíce faktorů, které vstupují a ovlivňují proces leštění a výslednou jakost povrchu. Parametry, které budou vstupovat do experimentální části této práce, budou tedy: intenzita energie, překryv laserového svazku a různé šrafovací strategie.



## 4.2 Návrh experimentu

### 4.2.1 Cíle experimentu:

- Stanovení ablačního prahu zvoleného materiálu
  - Nástrojová vysokolegovaná Cr-V-Mo ocel pro práci za studena 1.2379, ČSN 41 9573
- Provedení experimentu leštění
  - Cílem je dosažení co nejnižší hodnoty drsnosti povrchu dle parametru Ra, případně plošné drsnosti povrchu Sa
  - Zároveň je cílem stanovení vlivu parametrů laseru na dosaženou jakost povrchu

### 4.2.2 Návrh parametrů laseru:

Pro tento experiment by dle prostudovaných článků bylo vhodné použít laser s délkou pulzu kratší než 13 ps a vlnovou délkou 1064, nebo 532 nm. Pro další důležitý parametr, a to fluence laseru, je nutné provést samostatné předcházející měření ablačního prahu použitého materiálu.

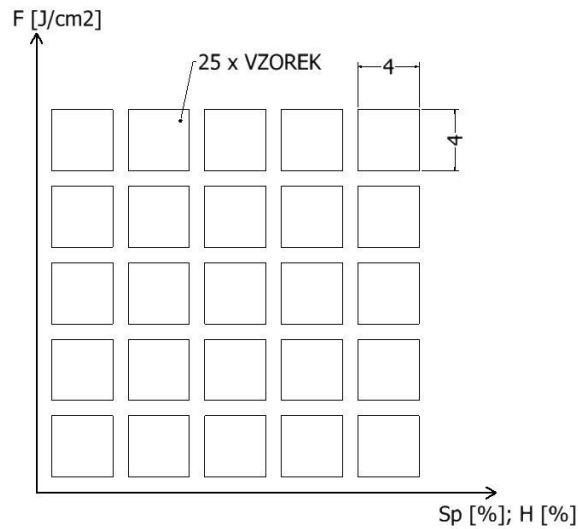
### 4.2.3 Experimentální zjištění ablačního prahu

Pro velmi jemné laserové obrábění, v tomto případě leštění, je nutné se s laserovou intenzitou energie [ $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ] pohybovat v poměrně úzkém rozmezí kolem energie, která je potřebná k minimálnímu úběru materiálu. Tato hodnota se nazývá ablační práh (ablation threshold). [49]

Zjištění ablačního prahu je nezbytné pro navržený experiment, neboť nastavování laserové fluence je na něm závislé. K této problematice se v tomto případě přistoupilo experimentální cestou. Metodika určení ablačního prahu je založena na vypalování bodů do materiálu, jehož ablační práh je třeba zjistit a následném měření průměrů vypálených bodů. Využívá se zvětšování průměru ablovaného bodu se vzrůstající energií v pulzu. [50]

#### 4.2.4 Návrh matice vzorků:

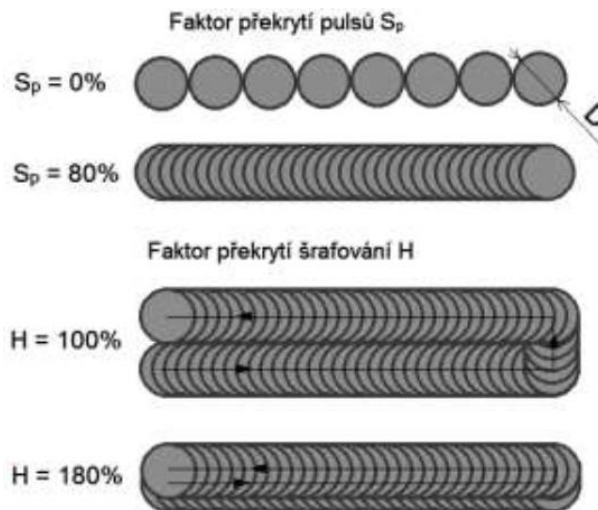
Matice vzorků viditelná na Obr. 24 je navržena z 25 stejně velkých čtvercových oblastí o délce hrany 4 mm. Tato velikost byla zvolena na základě měření výsledné drsnosti, kde tento rozměr hraje roli, a 4 mm jsou optimálním rozměrem pro vyhodnocení.



Obr. 24 – Návrh matice vzorků pro experiment leštění

Tato oblast je umístěna na polotovaru kruhového průřezu o průměru 45 mm.

Překrytí  $Sp$  (vodorovné překrytí ve směru skenování laseru) viditelné na vodorovné ose v Obr. 24 bude odstupňované od 60 % do 90 % po kroku 10 % a jako poslední hodnota překryvu bude nastavena hodnota 95 %. S tímto parametrem koresponduje také překrytí  $H$  (překrytí ve svislém směru), které odpovídá parametru  $Sp$  následujícím způsobem. Pro 60 %  $Sp$  je nastavena hodnota 160 %  $H$  a pro 95 %  $Sp$  je nastavena hodnota 195 %  $H$ . Grafické znázornění parametrů překrytí je na Obr. 25.



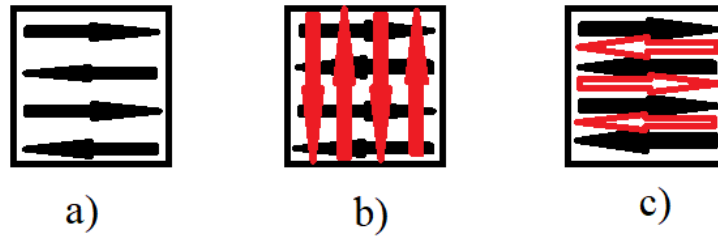
Obr. 25 - Definice šrafovacích parametrů [51]

Meze intenzity energie laseru  $F$  na svislé ose na Obr. 24 byly nastaveny od hodnoty těsně pod ablačním prahem (75 %  $F_{th}$  ablačního prahu), přes jeho přesnou hodnotu (100 %  $F_{th}$ ). Další tři hodnoty byly nastaveny nad ablačním prahem, a to na 150, 200 a 300 % jeho hodnoty.

#### Kvantitativní návrh experimentu:

Z publikací použitých pro rešerši na toto téma vyplývá, že velmi důležitým faktorem ovlivňující výslednou jakost povrchu je strategie šrafování. Z tohoto důvodu experiment obsahuje více matic vzorků pro různé strategie šrafování. Konkrétně se jedná o 3 matice, tedy 75 leštěných oblastí.

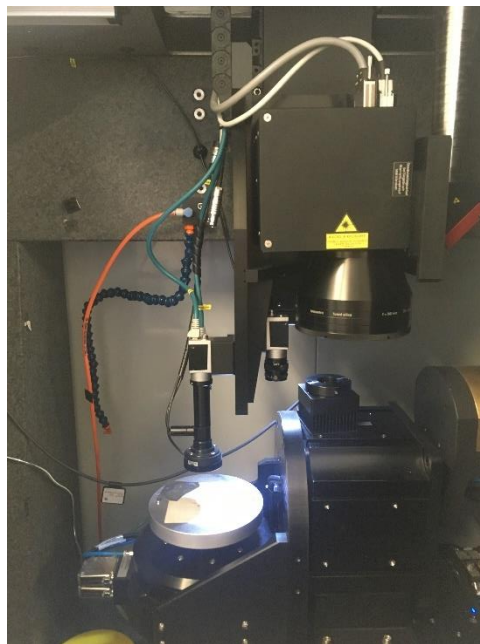
- 1) Referenční matice
  - Šrafování bez posunu, dvouvrstvé - Obr. 26 a)
- 2) Matice s kolmým šrafováním
  - Druhá vrstva šrafu je oproti první natočena o 90 stupňů - Obr. 26 b)
- 3) Matice s rovnoběžným šrafováním
  - Druhá vrstva šrafu oproti první není natočena a je posunuta o polovinu příčného překrytí - Obr. 26 c)



Obr. 26 - Přehled strategií šrafování

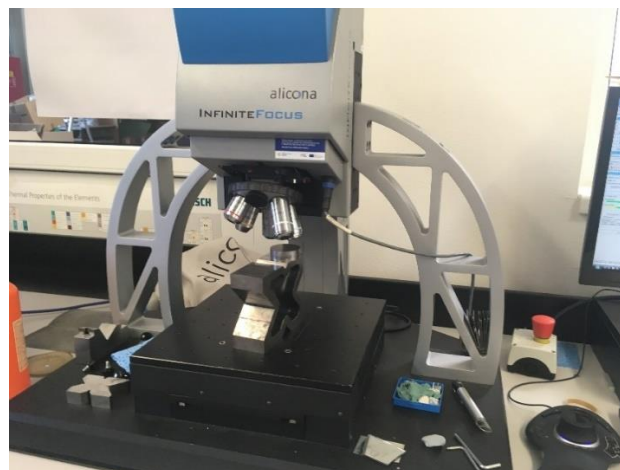
### 4.3 Použité přístroje

- Víceosý laserový systém s ultra krátkou délkou pulzu (13 ps) a vlnovou délkou 532 nm (Obr. 27)



Obr. 27 – Detail pracovního prostoru stroje pro mikrobrábění laserem

- Alicona Infinity focus G5 (Obr. 28)



Obr. 28 – Měřicí přístroj Alicona Infinite Focus G5

## 4.4 Měření ablačního prahu

### 4.4.1 Popis a vyhodnocení experimentu [50], [49]

#### 1. Nastavení výkonu laseru:

Jelikož se jedná o jemné měření, nastavení výkonu laseru je v rozmezí 0,1 až 1,2 W. Tyto hodnoty nemohly být přesně nastaveny přímo softwarem laseru, jelikož je nutné, aby se jednalo o výstupní výkon laseru na konci optické cesty. V Tab. 6 jsou uvedeny přesné hodnoty, které se podařilo nastavit měřením výkonu na konci optické cesty. Dalšími vstupními parametry laseru byly jeho frekvence, která byla nastavena na 200 kHz, délka pulzu 13 ps a vlnová délka 532 nm. Z těchto hodnot se podle vzorce 4.1 vypočte energie v pulzu  $E_p$ , která je taktéž uvedena v Tab. 6. Experiment byl prováděn na laseru dle kapitoly 4.3

$$E_p = \frac{P}{f} \quad (4.1)$$

kde:

$E_p$  – energie v pulzu [J]

$P$  – výkon [W]

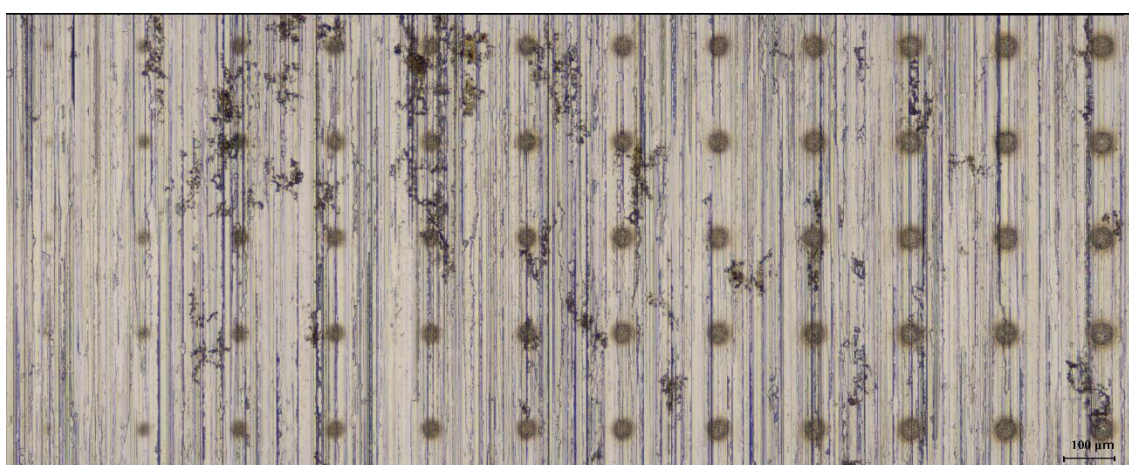
$f$  – frekvence laseru [Hz]

Tab. 6 – Přesné nastavení výkonů laseru pro měření ablačního prahu

č. kráteru	P [W]	$E_p$ [ $\mu$ J]
1	0,101	0,505
2	0,195	0,975
3	0,316	1,58
4	0,395	1,975
5	0,494	2,47
6	0,607	3,035
7	0,702	3,51
8	0,795	3,975
9	0,907	4,535
10	1,021	5,105
11	1,144	5,72
12	1,263	6,315

## 2. Měření průměrů ablovaných bodů:

Dalším krokem ke zjištění ablačního prahu je vypálení určitého počtu bodů každým z výše uvedených výkonů. V tomto případě se jedná o 12 řad kráterů, kde každé řadě přísluší daný výkon laseru a energie v pulzu. V každé řadě je kvůli přesnosti výsledků vypáleno 5 bodů, jejichž výsledný rozměr je aritmetickým průměrem všech rozměrů v dané řadě. Tento princip je na Obr. 29. Výkon laseru roste dle obrázku zleva doprava.



*Obr. 29 – Vypálené body pro vyhodnocení ablačního prahu*

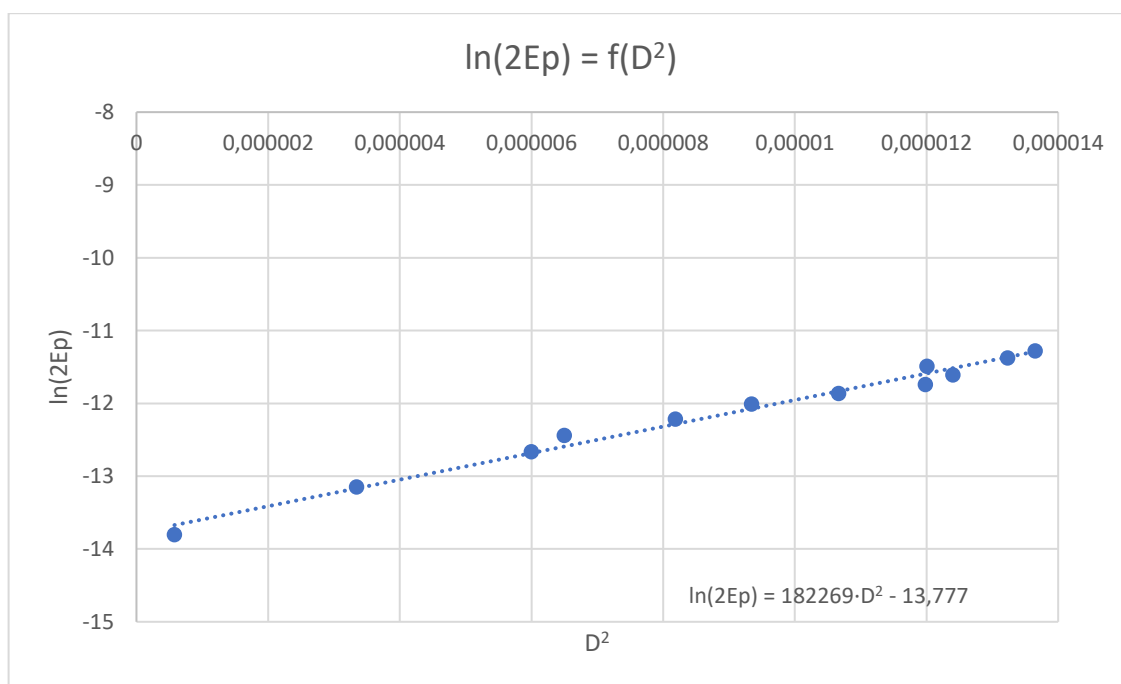
Průměry ablovaných kráterů byly měřeny na přístroji Alicona a jsou uvedeny v Tab. 7

Tab. 7 – Naměřené průměry ablovaných bodů pro vyhodnocení ablačního prahu

č.průměru	D [ $\mu\text{m}$ ]
D1	7,56 $\pm$ 0,379
D2	18,278 $\pm$ 0,147
D3	24,488 $\pm$ 0,529
D4	25,490 $\pm$ 0,556
D5	28,61 $\pm$ 0,255
D6	30,566 $\pm$ 0,512
D7	32,655 $\pm$ 0,299
D8	34,614 $\pm$ 0,252
D9	35,216 $\pm$ 0,395
D10	34,648 $\pm$ 0,719
D11	36,378 $\pm$ 0,427
D12	36,948 $\pm$ 0,435

### 3. Grafické zpracování:

Byla vynesena grafická závislost, kde  $\ln(2Ep) = f(D^2)$ , na které byla provedena lineární regrese (Obr. 30).



Obr. 30 – Graf pro vyhodnocení ablačního prahu

#### 4. Vyhodnocení:

Pro přímý výpočet ablačního prahu  $F_{th}$  byla použita rovnice 4.2.

$$\ln 2E_p = \frac{D^2}{2\omega_0^2} + \ln F_{th} + \ln \pi \omega_0^2 \quad (4.2)$$

Kde:

$E_p$  – energie v pulzu [J]

$D$  – naměřený průměr ablovaného bodu [cm<sup>2</sup>]

$\omega_0$  – průměr svazku laseru v ohnisku [cm]

$F_{th}$  – fluence ablačního prahu [J·cm<sup>-2</sup>]

Zde je vhodné použít substituci dle rovnice 4.3.

$$y = a \cdot x + b \quad (4.3)$$

Kde:

$$y = \ln 2E_p \quad (4.4)$$

$$a = \frac{1}{2\omega_0^2} \quad (4.5)$$

$$x = D^2 \quad (4.6)$$

$$b = \ln F_{th} + \ln \pi \omega_0^2 \quad (4.7)$$

A zároveň dle grafického vyhodnocení:

$$a = 182269$$

$$b = -13,777$$

Po dosazení do vhodné substituce vyjdou následující hodnoty ablačního prahu a poloměru svazku v ohnisku:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{a \cdot 2}} = 0,00165626 \text{ cm} = 16,5626 \text{ } \mu\text{m}$$



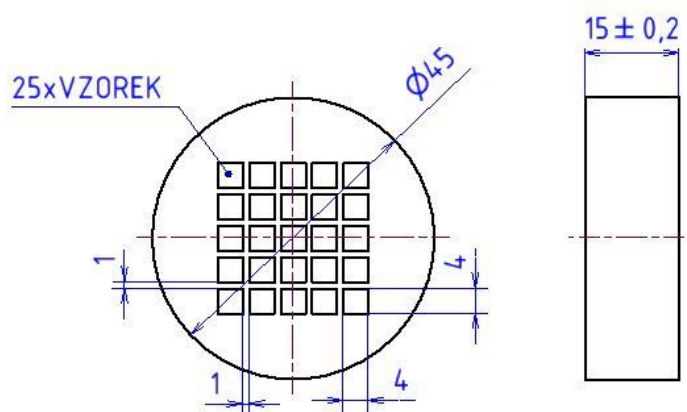
$$F_{th} = e^{b - \ln(\pi \cdot \omega_0^2)} = 0,1206 J \cdot cm^{-2}$$

Z hodnoty ablačního prahu  $F_{th} = 0,1206 J \cdot cm^{-2}$  budou nadále stanoveny hodnoty intenzity energie pro laserové leštění.

## 4.5 Experiment leštění UKP laserem

### 4.5.1 Praktická příprava experimentu

Pro přípravu experimentu bylo nutné nařezat a obrobit polotovar do vhodných vstupních rozměrů. Pro experiment byl vybrán materiál 1.2379, ČSN 41 9573. Jedná se o nástrojovou vysokolegovanou Cr-V-Mo ocel pro práci za studena. Jako polotovar byla zvolena kruhová tyč o průměru 45 mm. Výkres jednotlivých vzorků je zobrazen na Obr. 31.



Obr. 31 – Výkres vzorku s naznačením experimentální matice

Po mechanické přípravě vzorků bylo třeba naměřit jejich referenční drsnost kvůli porovnávání vyleštěných oblastí laserovou technologií s oblastmi broušenými. Měření proběhlo na přístroji Alicona. Naměřené hodnoty referenčních drsností jsou uvedeny v Tab. 8, 9. Veškeré hodnoty jsou uvedené v  $\mu m$ . V tabulkách jsou tři sloupce, kdy každý sloupec odpovídá jednomu vzorku. Vzorky jsou značené podle toho, z jaké strany (a, nebo b) byly naměřeny. Číslo 4, 5, 6 značí pouze číslo vzorku a písmeno B značí broušený povrch vzorků.

Tab. 8 – Naměřené referenční hodnoty parametru drsnosti Ra [ $\mu\text{m}$ ]

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	B-4-a	B-5-b	B-6-b
1	0,539	0,75	0,637
2	0,586	0,809	0,644
3	0,578	0,631	0,695
4	0,519	0,711	0,612
5	0,538	0,777	0,625
6	0,512	0,794	0,544
7	0,594	0,801	0,53
8	0,487	0,704	0,559
9	0,623	0,76	0,55
10	0,655	0,688	0,5
11	0,568	0,693	0,706
12	0,54	0,703	0,693
13	0,528	0,73	0,616
14	0,625	0,711	0,729
15	0,535	0,703	0,656
<b>Průměr:</b>	<b>0,5618 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0,7310 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0,6197 <math>\mu\text{m}</math></b>

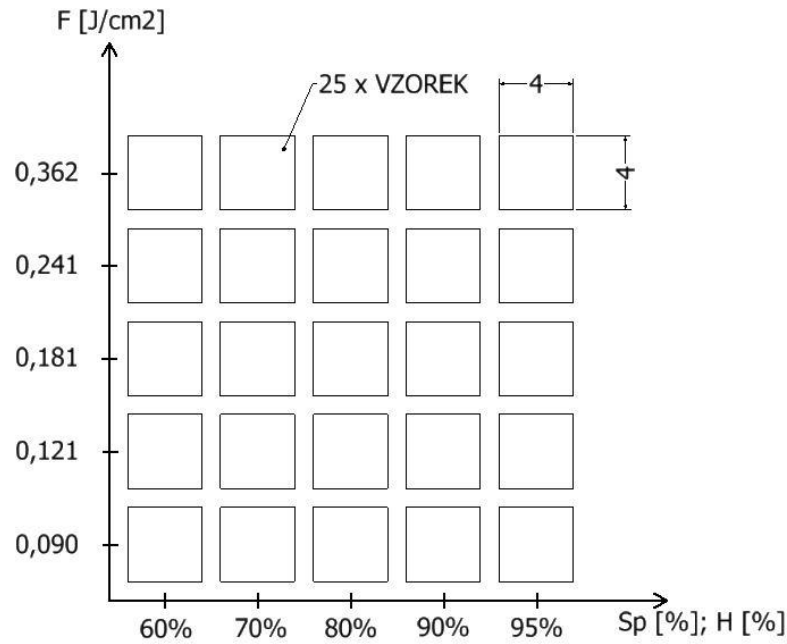
Tab. 9 - Naměřené referenční hodnoty parametru plošné drsnosti Sa [ $\mu\text{m}$ ]

Sa [ $\mu\text{m}$ ]	B-4-a	B-5-b	B-6-b
1	0,618	0,767	0,775
2	0,51	0,837	0,674
3	0,538	0,77	0,578
4	0,583	0,855	0,724
5	0,64	0,782	0,681
<b>Průměr:</b>	<b>0,5778 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0,8022 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0,6864 <math>\mu\text{m}</math></b>

#### 4.5.2 Provedení experimentu

Experiment zaměřený na leštění vzorků dle Obr. 31 byl proveden na laserovém zařízení s ultrakrátkými pulzy.

Vstupní parametry laseru byly definovány maticí na Obr. 32.



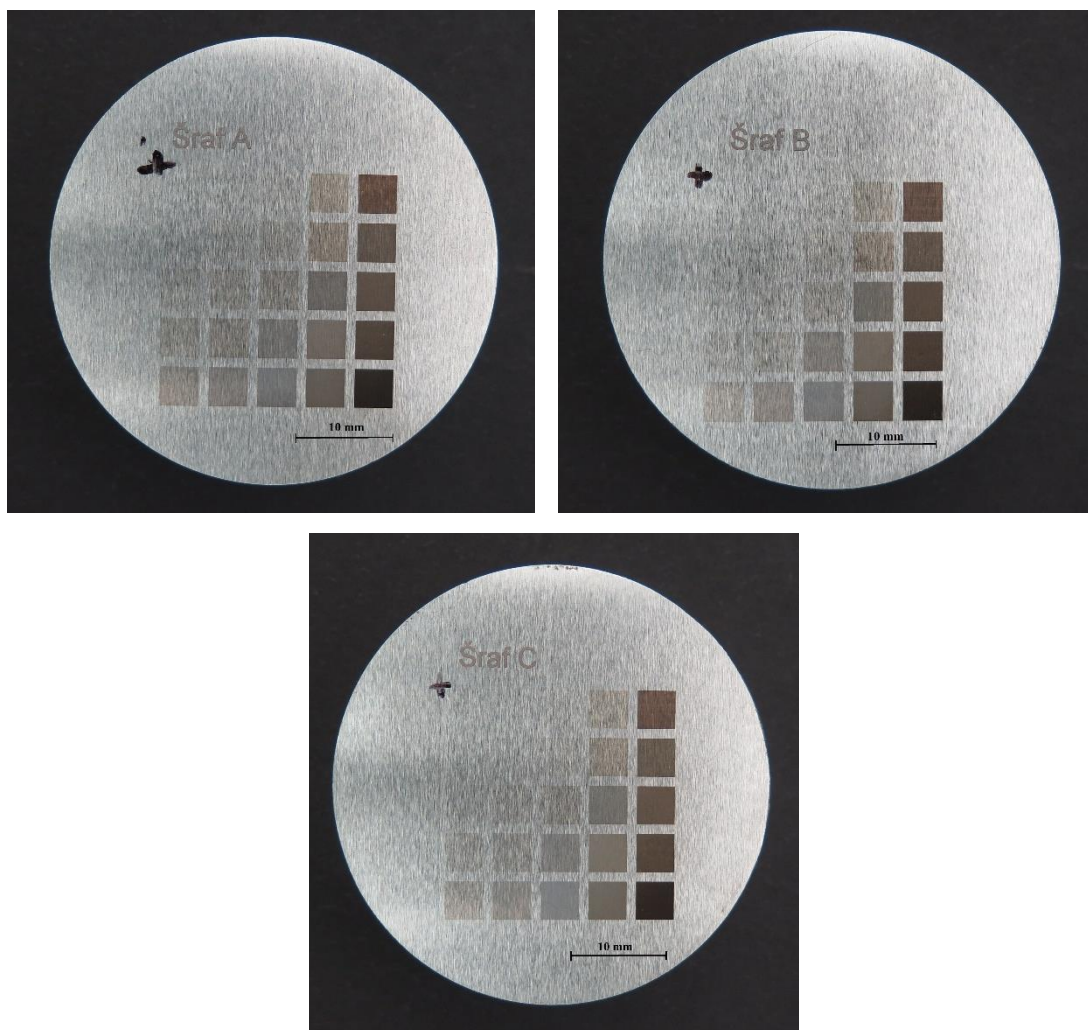
Obr. 32 – Vstupní hodnoty experimentu leštění

Každá řada oblastí v matici byla leštěna konstantní fluencí, která se odvíjela od experimentálního zjištění fluence ablačního prahu ( $F_{th}$ ). Takto nastavené hodnoty zajišťují poměrně širokou škálu fluence. Hodnota pod ablačním prahem, tedy 75 %  $F_{th}$ , je v experimentu proto, že i takto nízké hodnoty mohou vést ke zlepšení výsledné drsnosti pouhým přetavením vrcholů povrchu, nikoliv jejich odstraňováním. Každý sloupec oblastí byl leštěn konstantním překryvem Sp a H (Obr. 25).

Při leštění všech vzorků byla připojena inertní argonová atmosféra dle ISO 14 175, která napomohla přesnějším výsledkům experimentu.

#### 4.5.3 Vyhodnocení experimentu

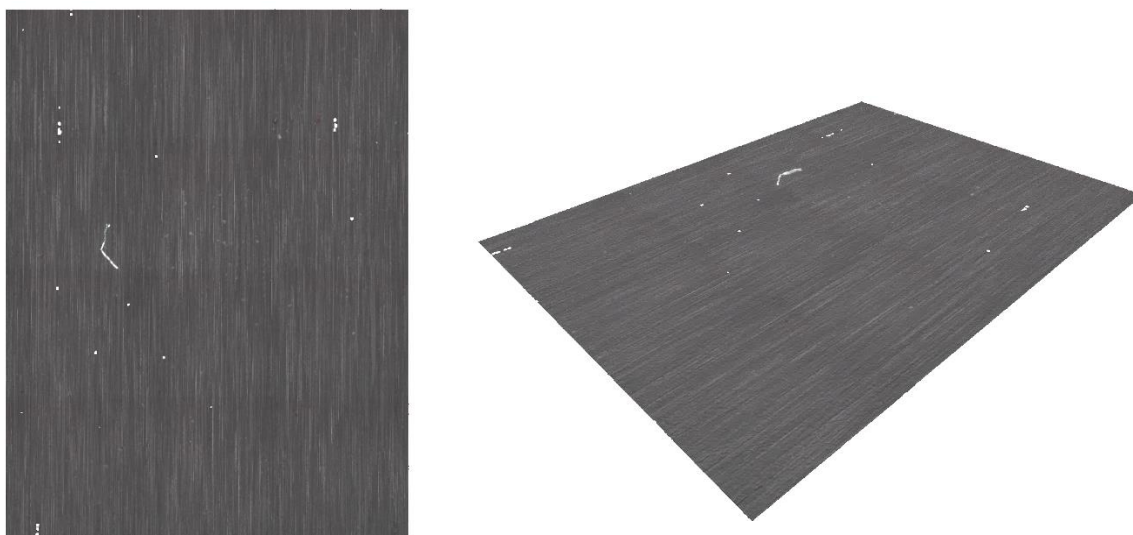
Výsledky laserového leštění jsou zobrazeny na Obr. 33, kde jsou fotografie všech vzorků po laserovém leštění.



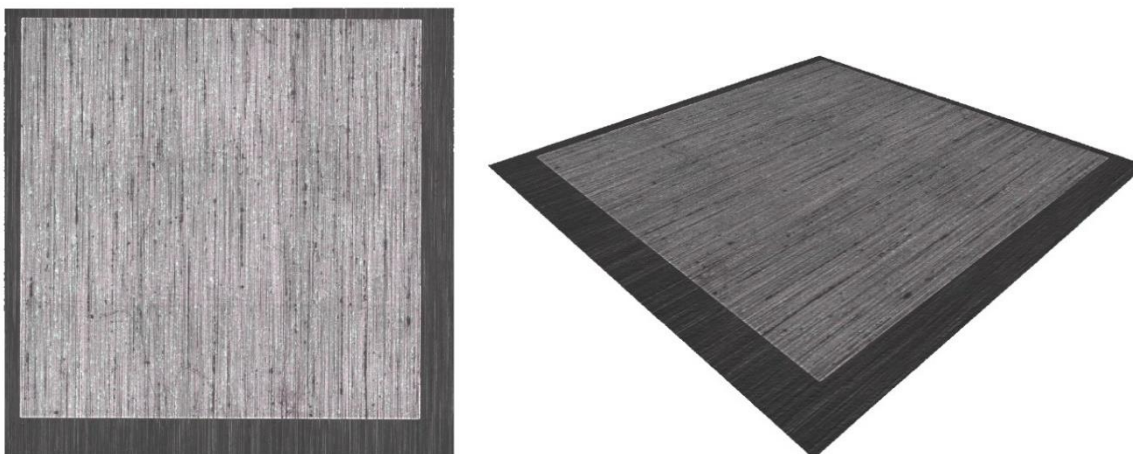
Obr. 33 – Fotografie leštěných vzorků

Již vizuálně jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými oblastmi. Oblasti leštěné nízkou hodnotou překryvu a fluence jsou velmi těžko rozeznatelné od referenčního broušeného povrchu. Rozdíly ve zvolené strategii šrafování nejsou na první pohled patrné.

Laboratorní měření vzorků proběhlo na přístroji Alicona. Měřenými parametry byly drsnost povrchu ( $R_a$ ) a plošná drsnost povrchu ( $S_a$ ). Na Obr. 34 je naskenovaný povrchu před procesem leštění. Na následujícím Obr. 35 je již vyleštěný povrch. Tento povrch byl leštěn 90% překryvem  $S_p$  a fluence 200 %  $F_{th}$ .



Obr. 34 – Sken referenčního broušeného povrchu



Obr. 35 – Sken leštěného povrchu parametry  $Sp = 90 \%$ ;  $F = 200 \% F_{th}$

Tímto způsobem byla naměřena veškerá potřebná data, která jsou uvedena v následujících tabulkách. Každá hodnota  $R_a$  byla naměřena třikrát na různých místech oblasti. Hodnota v tabulce je její aritmetický průměr.

Tab. 10 – Výsledné drsnosti povrchu na vzorku B-4-a (šraf A)

F [% F <sub>th</sub> ]	Průměrné hodnoty $R_a$ - B-4-a - šraf A [ $\mu\text{m}$ ]				
300	0,448	0,476	0,442	0,516	0,507
200	0,474	0,464	0,485	0,491	0,481
150	0,483	0,468	0,491	0,501	0,464
100	0,544	0,516	0,494	0,528	0,504
75	0,533	0,544	0,575	0,581	0,433
Reference	0,562	0,562	0,562	0,562	0,562
Sp [%]	60 %	70 %	80 %	90 %	95 %

Tab. 11 – Výsledné procentuální drsnosti povrchu oproti referenci na vzorku B-4-a (šraf A)

F [% Fth]	Procentuální změna Ra - B-4-a - šraf A				
300	79,68	84,67	78,68	91,79	90,19
200	84,31	82,53	86,27	87,34	85,62
150	85,97	83,24	87,40	89,24	82,59
100	96,89	91,79	87,87	93,98	89,77
75	94,87	96,89	102,29	103,48	77,07
Reference	100	100	100	100	100
Sp [%]	60 %	70 %	80 %	90 %	95 %
Min:	0,433	Min %:	77,07369		
Max:	0,581333	Max %:	103,4769		

Tab. 12 - Výsledné drsnosti povrchu na vzorku B-5-b (šraf B)

F [% Fth]	Průměrné hodnoty Ra - B-5-b - šraf B [μm]				
300	0,752	0,611	0,684	0,613	0,664
200	0,675	0,633	0,800	0,617	0,693
150	0,750	0,600	0,701	0,661	0,678
100	0,734	0,684	0,754	0,646	0,693
75	0,815	0,673	0,748	0,658	0,704
Reference	0,731	0,731	0,731	0,731	0,731
Sp [%]	60 %	70 %	80 %	90 %	95 %

Tab. 13 - Výsledné procentuální drsnosti povrchu oproti referenci na vzorku B-5-b (šraf B)

F [% Fth]	Procentuální změna Ra - B-5-b - šraf B				
300	102,92	83,54	93,57	83,90	90,79
200	92,38	86,59	109,39	84,40	94,85
150	102,60	82,03	95,90	90,47	92,70
100	100,46	93,57	103,15	88,37	94,85
75	111,54	92,02	102,28	90,01	96,31
Reference	100	100	100	100	100
Sp [%]	60 %	70 %	80 %	90 %	95 %
Min:	0,599667	Min %:	82,03374		
Max:	0,815333	Max %:	111,5367		

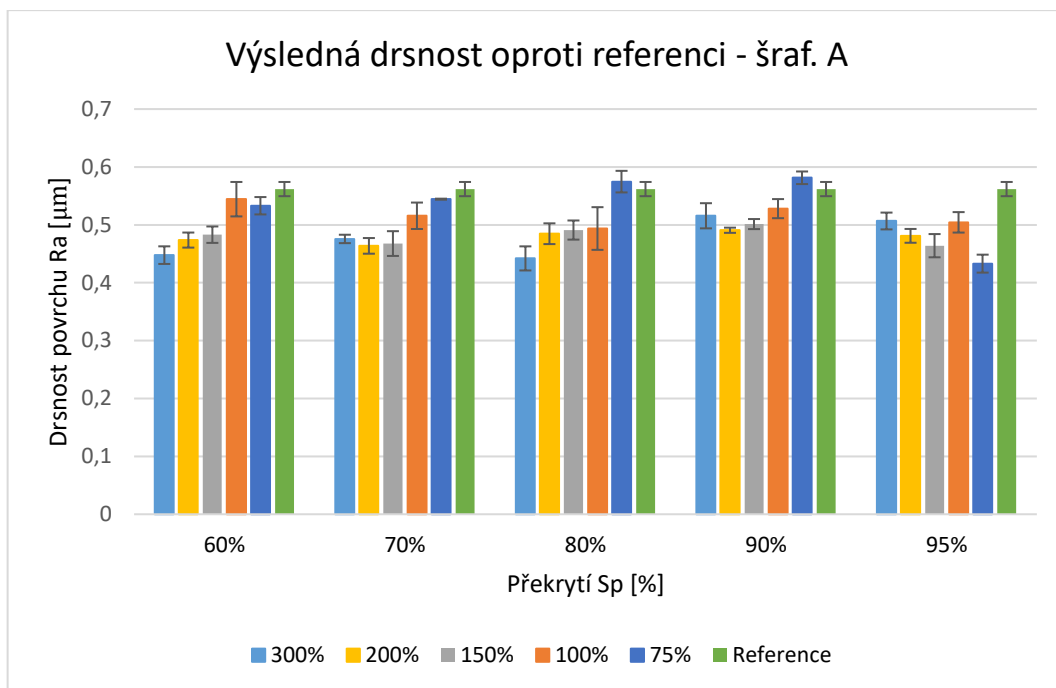
Tab. 14 - Výsledné drsnosti povrchu na vzorku B-6-b (šraf C)

F [% Fth]	Průměrné hodnoty Ra - B-6-b - šraf C [ $\mu\text{m}$ ]				
300	0,517	0,577	0,660	0,484	0,548
200	0,596	0,471	0,637	0,440	0,447
150	0,568	0,531	0,488	0,553	0,494
100	0,621	0,569	0,569	0,540	0,520
75	0,659	0,579	0,568	0,563	0,498
Reference	0,620	0,620	0,620	0,620	0,620
Sp [%]	60 %	70 %	80 %	90 %	95 %

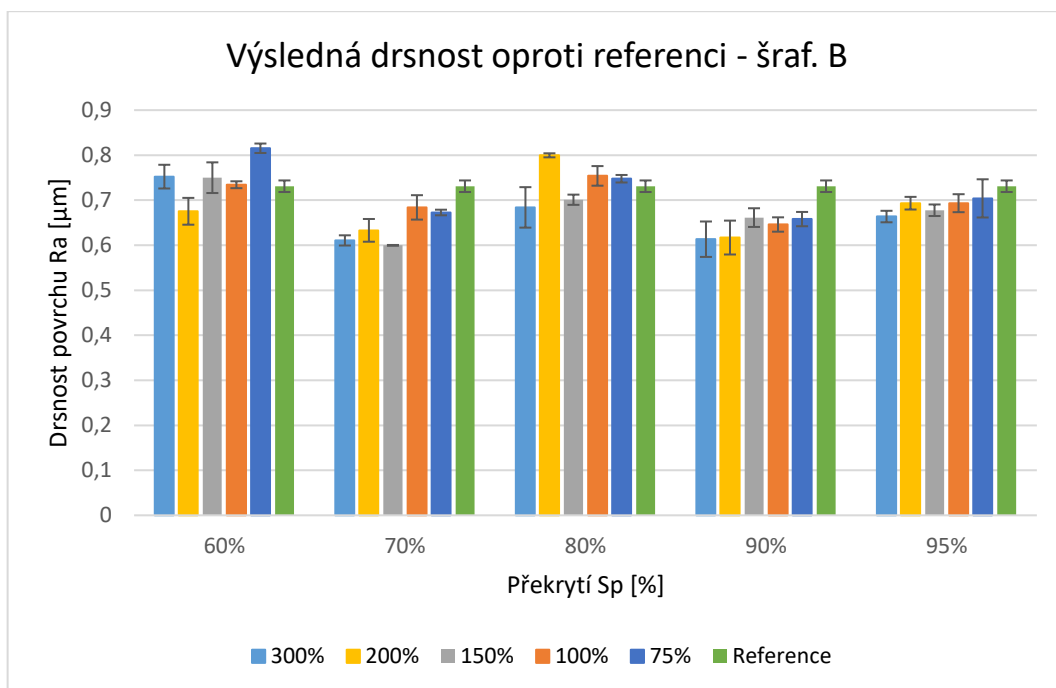
Tab. 15 - Výsledné procentuální drsnosti povrchu oproti referenci na vzorku B-6-b (šraf C)

F [% Fth]	Procentuální změna Ra - B-6-b - šraf C				
300	83,48	93,10	106,44	78,15	88,43
200	96,12	76,05	102,79	70,94	72,13
150	91,65	85,68	78,74	89,18	79,66
100	100,26	91,87	91,87	87,08	83,85
75	106,34	93,43	91,65	90,79	80,36
Reference	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Sp [%]	60 %	70 %	80 %	90 %	95 %
Min:	0,439667	Min %:	70,94449		
Max:	0,659667	Max %:	106,4436		

Výše uvedené tabulkové hodnoty (Tab. 10, 11, 12, 13, 14, 15) byly pro vyšší přehlednost vyneseny do grafů (Obr. 36, 37, 38). Na grafech jsou také viditelné chybové úsečky, které jsou vytvořeny z výběrových směrodatných odchylek aritmetických průměrů měření.

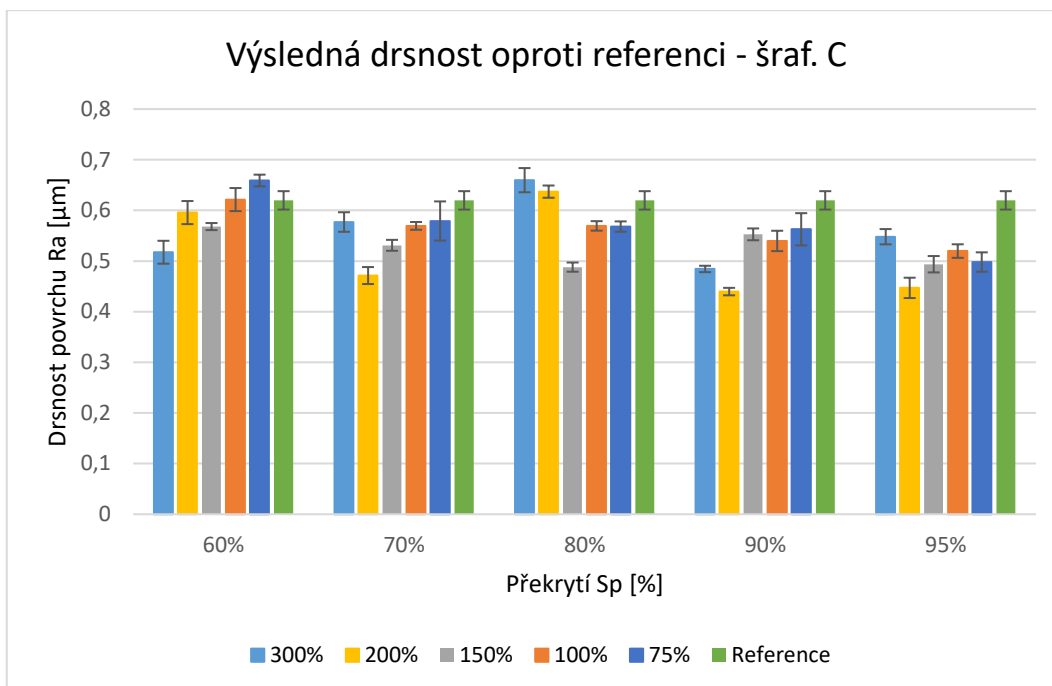


Obr. 36 – Drsnost povrchu Ra v závislosti na překrytí Sp pro vzorek B-4-a (šraf A)



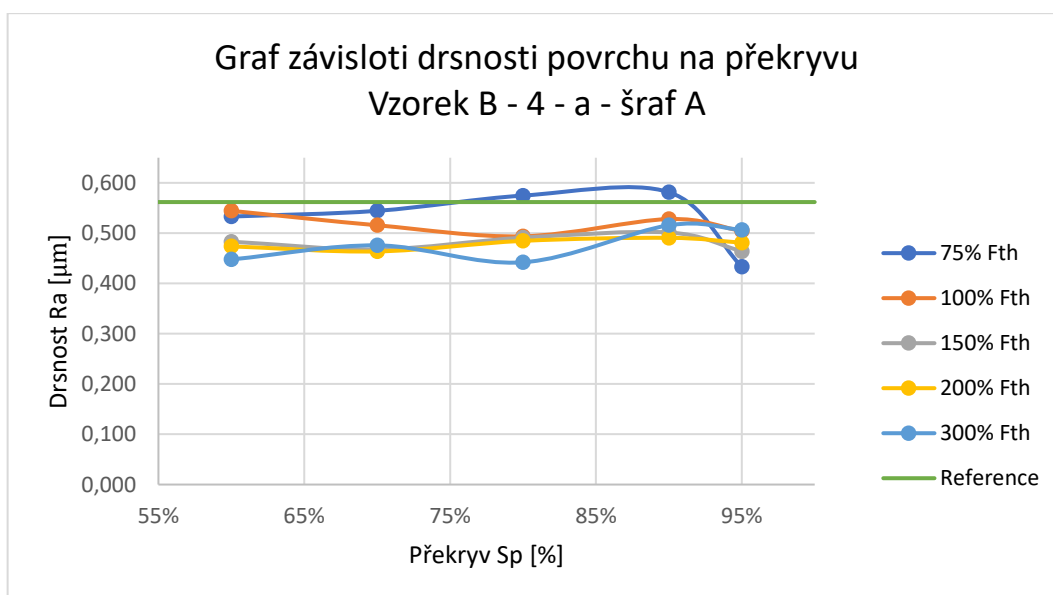
Obr. 37 - Drsnost povrchu Ra v závislosti na překrytí Sp pro vzorek B-5-b (šraf B)



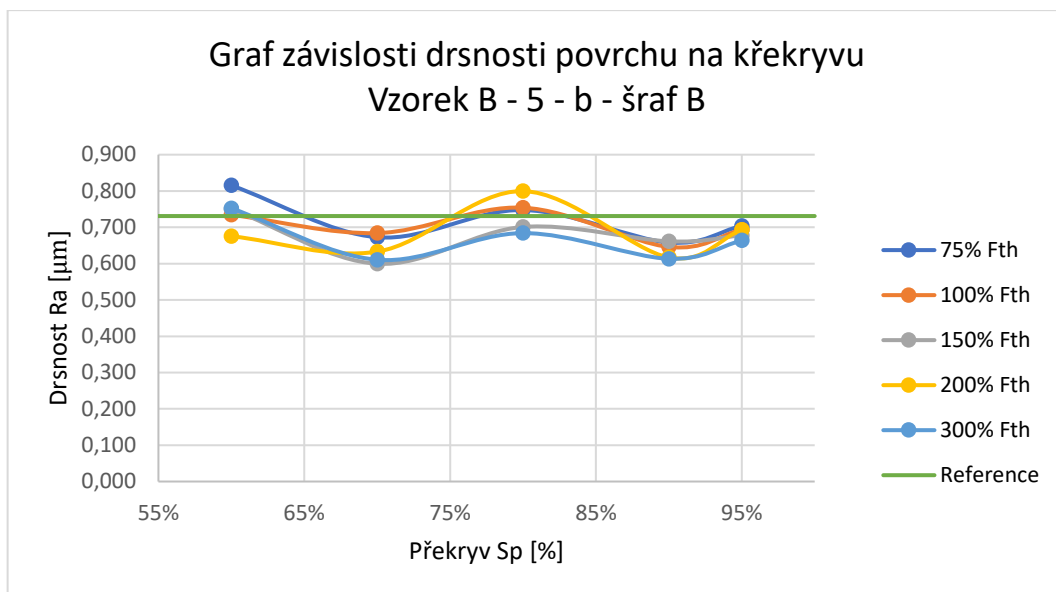


Obr. 38 - Drsnost povrchu Ra v závislosti na překrytí Sp pro vzorek B-6-b (šraf C)

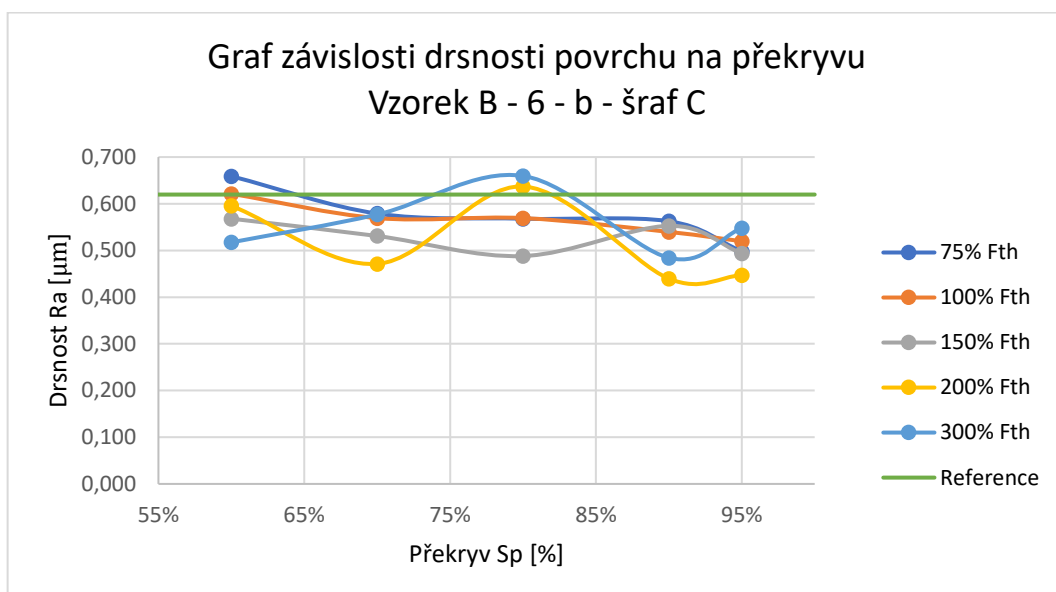
Dle výsledků lze říci, že ke snížení drsnosti ve všech měřených případech došlo pouze u 70 a 95% překryvu Sp. U ostatních hodnot překryvu docházelo v závislosti na použité fluence buď k redukci, nebo navýšení referenční drsnosti. Pro lepší grafickou představu jsou zde uvedeny následující grafy, kde jsou patrnější rozdíly v jednotlivých bodech (Obr. 39, 40, 41).



Obr. 39 - Drsnost povrchu Ra v závislosti na překrytí Sp pro vzorek B-4-a (šraf A)



Obr. 40 - Drsnost povrchu Ra v závislosti na překrytí Sp pro vzorek B-5-b (šraf B)



Obr. 41 - Drsnost povrchu Ra v závislosti na překrytí Sp pro vzorek B-6-b (šraf C)

Na Obr. 39, 40, 41 u vzorků B-5-b a B-6-b, tedy u šrafovaní B a C jsou viditelné vždy dvě lokální minima pro překrytí 70 a 90 %. Šraf typu A (B-4-a) tento trend poklesu drsnosti nevykazuje a minimum je zřetelné na 80% překryvu. Pro komplexnější měření byla změřena také plošná drsnost Sa. Hodnoty plošné drsnosti jsou uvedené v Tab. 16, 17, 18. Červená políčka v tabulkách značí, že vyleštěný povrch nevykazoval pod mikroskopem žádné viditelné změny od reference a z tohoto důvodu nemohl být naskenován.

Tab. 16 – Výsledné plošné drsnosti na vzorku B-4-a (šraf A)

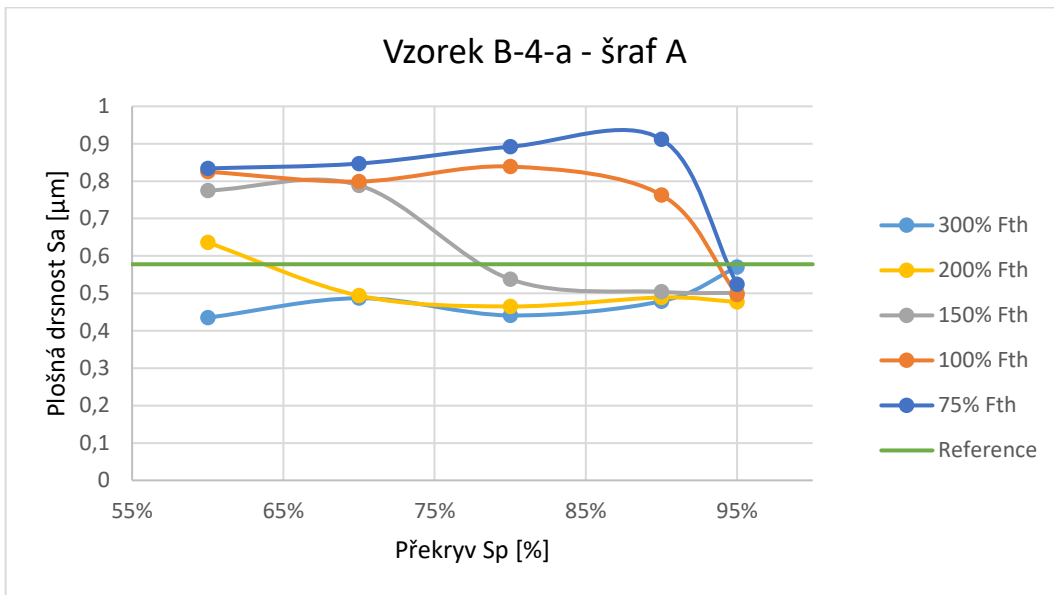
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Vzorek B-4-a - šraf A				
F [%Fth]					
300 %	0,435	0,487	0,441	0,479	0,57
200 %	0,636	0,494	0,465	0,489	0,477
150 %	0,775	0,789	0,538	0,504	0,501
100 %	0,825	0,799	0,839	0,763	0,497
75 %	0,834	0,847	0,892	0,912	0,524
Reference	0,578	0,578	0,578	0,578	0,578
Sp [%]	60 %	70 %	80 %	90 %	95 %
H[%]	160 %	170 %	180 %	190 %	195 %
Min:	0,435				
Max:	0,912				

Tab. 17– Výsledné plošné drsnosti na vzorku B-5-b (šraf B)

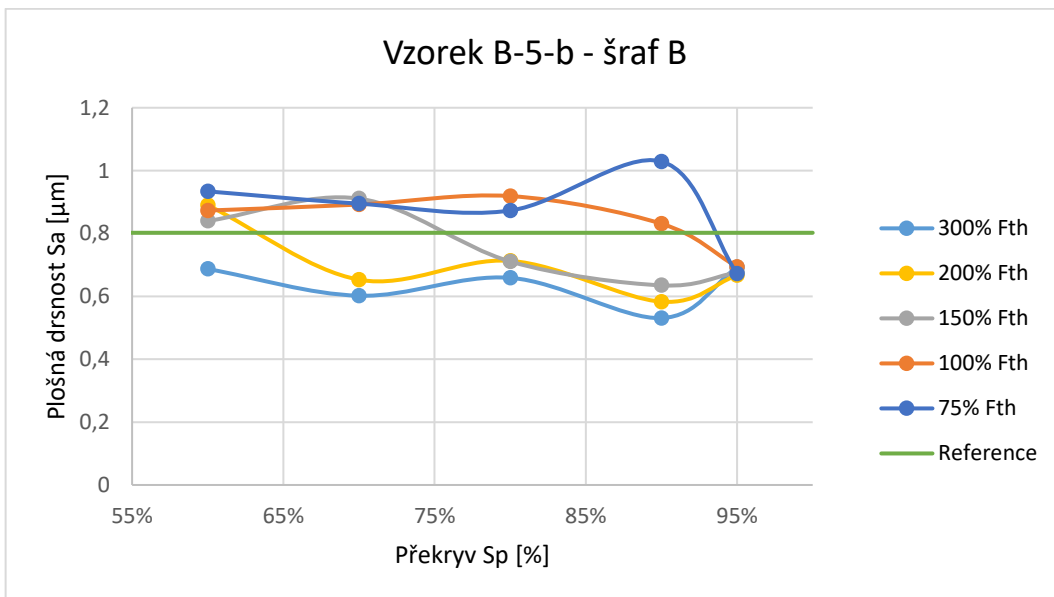
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Vzorek B-5-b - šraf B				
F [%Fth]					
300 %	0,687	0,602	0,659	0,531	0,692
200 %	0,89	0,653	0,713	0,583	0,667
150 %	0,84	0,911	0,711	0,635	0,676
100 %	0,873	0,892	0,919	0,831	0,694
75 %	0,934	0,895	0,873	1,029	0,672
Reference	0,802	0,802	0,802	0,802	0,802
Sp [%]	60 %	70 %	80 %	90 %	95 %
H[%]	160 %	170 %	180 %	190 %	195 %
Min:	0,531				
Max:	1,029				

Tab. 18– Výsledné plošné drsnosti na vzorku B-6-b (šraf C)

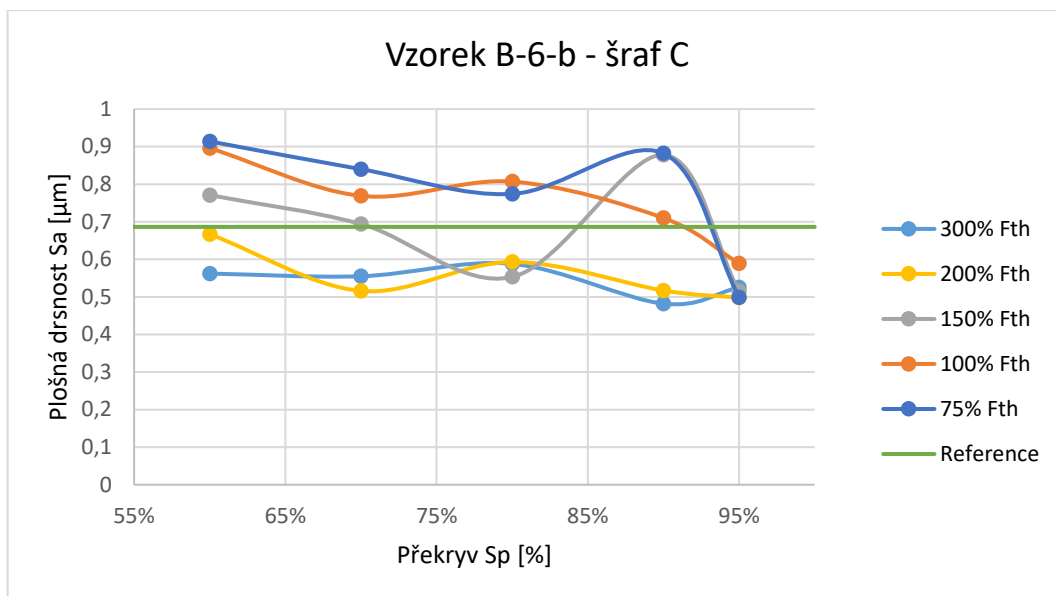
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Vzorek B-6-b - šraf C				
F [%Fth]					
300 %	0,562	0,555	0,588	0,482	0,525
200 %	0,667	0,516	0,593	0,517	0,498
150 %	0,771	0,694	0,553	0,878	0,515
100 %	0,896	0,769	0,807	0,71	0,589
75 %	0,914	0,84	0,774	0,882	0,499
Reference	0,686	0,686	0,686	0,686	0,686
Sp [%]	60 %	70 %	80 %	90 %	95 %
H[%]	160 %	170 %	180 %	190 %	195 %
Min:	0,482				
Max:	0,914				



Obr. 42 – Plošná drsnost povrchu Sa v závislosti na překrytí Sp pro vzorek B-4-a (šraf A)



Obr. 43 – Plošná drsnost povrchu Sa v závislosti na překrytí Sp pro vzorek B-5-b (šraf B)



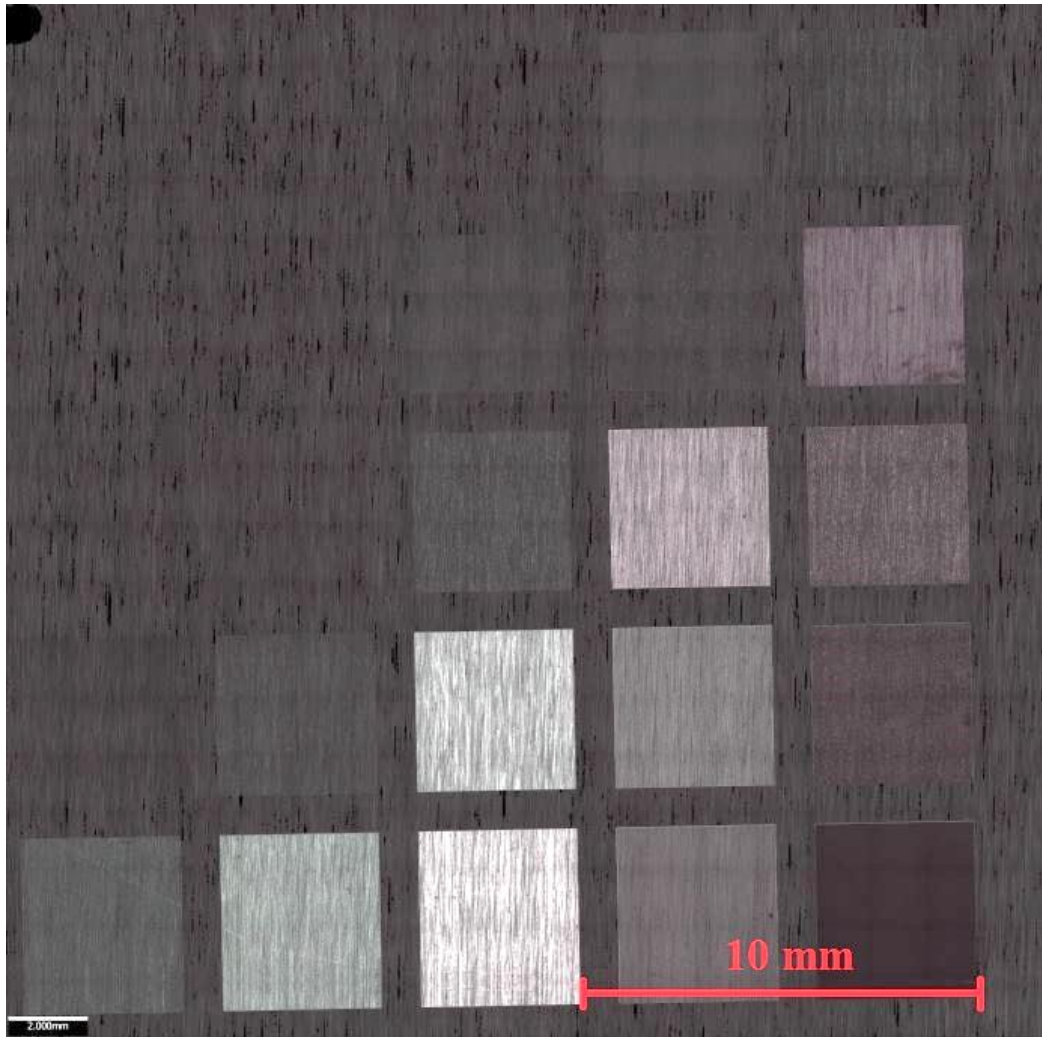
Obr. 44 – Plošná drsnost povrchu Sa v závislosti na překrytí Sp pro vzorek B-6-b (šraf C)

Z grafů na Obr. 42, 43, 44 lze říci, že plošná drsnost v závislosti na překryvu má pro vyšší použité fluence (200 a 300 %) podobný průběh jako parametr drsnosti Ra. Pro nižší použité fluence, než 200 %  $F_{th}$  jsou hodnoty odlišné.

#### 4.6 Shrnutí experimentální části

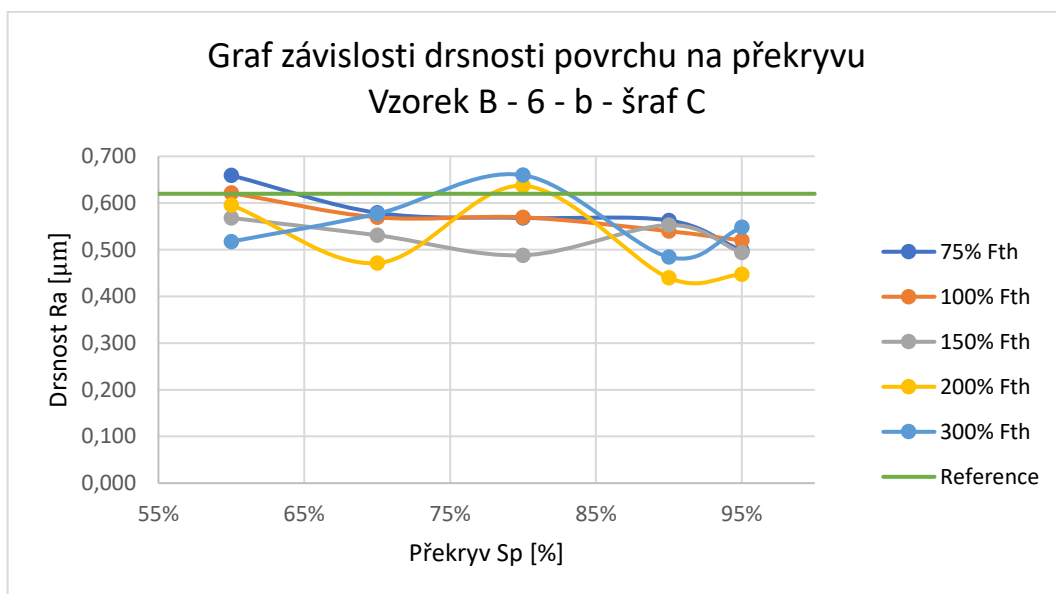
V experimentální části této práce byly provedeny celkem dva experimenty. První experiment byl zaměřen na přesné zjištění ablačního prahu materiálu 1.2379, ČSN 41 9573 (vysokolegovaná Cr-V-Mo ocel pro práci za studena). Hodnota ablačního prahu byla stanovena na  $0,1206 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Tato hodnota, specifická pro dané podmínky, byla nutná pro následné nastavení druhé části experimentu.

Ve druhé části práce byl experiment zaměřen na samotné laserové leštění broušených vzorků z oceli 1.2379, ČSN 41 9573, kde proběhlo jejich leštění na laserovém zařízení.



Obr. 45 – Sken celé matice oblastí na vzorku B-5-b

Na Obr. 45 je scan celé matice oblastí vzorku B-5-b po leštění UKP laserem. Vyhodnocení vzorků probíhalo na přístroji Alicona. Cílem experimentu bylo dosažení co nejlepších drsností povrchu dle parametrů Ra a Sa. Z důvodu rozdílných vstupních hodnot drsností z různých vzorků zde budou nyní srovnány prvotně procentuální úbytky jednotlivých parametrů. Na Obr. 46 je graf závislosti drsnosti povrchu na fluence a překrytí u vzorku B-6-b (šraf C).



*Obr. 46 - Drsnost povrchu Ra v závislosti na překrytí Sp pro vzorek B-6-b (šraf C)*

Na tomto vzorku (B–6–b) bylo dosaženo nejlepších výsledků. Pro hodnotu 90% překryvu Sp, tedy 190% H, a 200 % F<sub>th</sub> byla drsnost povrchu (dle parametru Ra) snížena na 70,95 % referenční hodnoty. V absolutních číslech to znamená pokles z 0,62 µm na 0,44 µm. Plošná drsnost odpovídající této oblasti vzorku byla snížena na 75,17 % referenční plošné drsnosti, tedy z 0,688 µm na 0,517 µm.

## 5 Závěr

Cílem práce bylo teoreticky se seznámit s fungováním a principy laserových technologií a provést experiment, který by demonstroval možnost leštění ultra-krátkopulzním laserem a ověřil hodnotu ablačního prahu oceli 1.2379. Provedený experiment byl zpracován a dle výsledných dat lze říci, že leštění ultra-krátkopulzním laserem je možné.

Jako nejlepší z výše uvedených variant, se jeví šraf typu C, tedy šraf s dvojitým šrafováním, proti sobě nenatočeným a posunutým o polovinu příčného posuvu H. Při použití šrafu typu C došlo ve většině případů k redukci drsnosti. Jako možné optimální nastavení lze tedy uvést 70, 90, či 95% překryv v kombinaci s intenzitou energie nastavenou na 200 % ablačního prahu materiálu nebo použití 150 % ablačního prahu materiálu v kombinaci s libovolným překrytím v rozmezí od 50 do 95 %. U zbylých strategií šrafování nebylo dosaženo takto kvalitních hodnot. Redukce drsnosti byla patrná u všech vzorků.

V rozsahu experimentu provedeného v této práci nebylo možné promítnout dostatečný počet proměnných, které mají vliv na výsledný povrch, a tak nebylo získáno dostatečné množství dat pro vysoce efektivní optimalizaci procesu leštění za pomoci UKP laserů. I přes tuto skutečnost se podařilo nalézt lokální minima drsností pro určité parametry procesu. Tato minima by bylo v další práci vhodné upřesnit a doměřit více dat, která by mohla posloužit ke zpřesnění leštění. Možná vylepšení práce spočívají v měření absorpce leštěného materiálu kvůli použití správné vlnové délky (v tomto případě bylo použití vlnové délky 532 nm v pořádku), čímž dojde k optimalizaci výkonu. Dále by bylo příhodné použít více přejezdů na jedné oblasti a více možných druhů šrafovacích strategií, které by mohly přinést kvalitnější povrch. A v neposlední řadě je i použití širšího rozmezí intenzity energie, které by se mohlo navyšovat. K tomuto kroku ale nutno dodat ještě měření tepelně ovlivněné oblasti, která by s navyšující se intenzitou energie taktéž rostla.



## 6 Použitá literatura

- [1] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění 3. díl*. 2. vydání. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [2] *Harrison electropolishing* [online]. Houston: Harrison electropolishing, c2012-2020 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <http://www.harrisonep.com/mechanical-polishing.html>
- [3] GAŠPÁREK, Jozef. *Dokončovacie spôsoby obrábania*. 1. vydání. Bratislava: Alfa, 1979, 360 s. Edícia strojárskkej literatúry (Alfa).
- [4] LIN, Weimin. Research on effect of parameters in Rotation & Revolution Type Polishing Method. *ScienceDirect* [online]. 2018 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S2212827118306693>
- [5] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 1. vydání. Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-718-3207-3.
- [6] MICHNA, Štefan a Iva NOVÁ. *Technologie a zpracování kovových materiálů*. Děčín: Ústí nad Labem : Petr Majrich, 2009, 2008. ISBN 978-80-89244-38-6.
- [7] Mechanical polishing. *Plasmacraft* [online]. b.r. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <http://plasmacraft.net/mechanical-polishing>
- [8] KOČÍ, Petr. *Chemické inženýrství I*. 4. rozšířené vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2019. ISBN 978-80-7592-049-2.
- [9] Chemical polishing. *Ansing engineering* [online]. b.r. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <http://ansingengineering.com/index.html>
- [10] Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí. In: KOSMAČ, Alenka. *Materiály a jejich použití* [online]. Brusel: Euro Inox, 2009, s. 2-14 [cit. 2020-02-26]. ISBN 978-2-87997-319-7.
- [11] DENG, Hui. Abrasive-free polishing of tungsten alloy using electrochemical etching. *ScienceDirect* [online]. Guangdong, Čína, 2017 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S1388248117302138>
- [12] SIMKA, Wojciech. Electrochemical polishing of Ti–13Nb–13Zr alloy. *ScienceDirect* [online]. 2012, s. 1-3 [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897212010250?via%3Dihub>

- [13] Metal polishing industrial methods of metal surface final polishing. *Plasmacraft* [online]. b.r. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <http://plasmacraft.net/metal-polishing-industrial-methods-metal-surface-final-polishing>
- [14] BUCHFINK, Gabriela, Nikola LEIBINGER-KAMMÜLLER, ed. *The Laser as a Tool*. 1. vydání. Vogel Communications Group, 2007. ISBN 978-3-8343-3072-7.
- [15] LAPŠANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. *Prf.upol* [online]. Olomouc: Hana Lapšanská, 2010, s. 2-3 [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [16] SKÁCELOVÁ, Dana. *Fyzikální princip laseru*. Brno, 2007. Dostupné také z: [https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/F7050/4593943/Fyzikalni\\_princip\\_laseru-Skacelova\\_Dana.pdf](https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/F7050/4593943/Fyzikalni_princip_laseru-Skacelova_Dana.pdf). Seminární práce. Masarykova univerzita.
- [17] GREITEMANN, Jonas. Population Inversion can be Achieved in a Three-Level System. *Chemistry libretexts* [online]. California, b.r. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: [https://chem.libretexts.org/Courses/Pacific\\_Union\\_College/Quantum\\_Chemistry/15%3A\\_Lasers%2C\\_Laser\\_Spectroscopy%2C\\_and\\_Photochemistry/15.04%3A\\_Population\\_Inversion\\_can\\_be\\_Achieved\\_in\\_a\\_Three-Level\\_System](https://chem.libretexts.org/Courses/Pacific_Union_College/Quantum_Chemistry/15%3A_Lasers%2C_Laser_Spectroscopy%2C_and_Photochemistry/15.04%3A_Population_Inversion_can_be_Achieved_in_a_Three-Level_System)
- [18] RÜDIGER, Paschotta. Four-level and Three-level Gain Media. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. b.r. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/four\\_level\\_and\\_three\\_level\\_gain\\_media.html](https://www.rp-photonics.com/four_level_and_three_level_gain_media.html)
- [19] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jeho dělení. *Lao.cz* [online]. Praha, 2011 [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [20] RÜTERING, Marus. Co rozhoduje při volbě typu laseru. *MM průmyslové spektrum*. 2011, 2011(9), 91.
- [21] FATOBA, Olawale S., Patricia A.I. POPOOLA, Sisa L. PITYANA a Olanrewaju S. ADESINA. Computational Dynamics of Anti-Corrosion Performance of Laser Alloyed Metallic Materials. *Fiber Laser* [online]. InTech, 2016 [cit. 2020-04-06]. DOI: 10.5772/62334. ISBN 978-953-51-4615-5. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/fiber-laser/computational-dynamics-of-anti-corrosion-performance-of-laser-alloyed-metallic-materials>
- [22] STEEN, W. M. *Laser Material Processing*. 4th Edition. London: Springer, 2010. ISBN 18-523-3698-6.
- [23] MRŇA, Libor. Základy laserové techniky. *VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie* [online]. Brno, b.r. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_zaklady\\_laserove\\_techiky\\_2013\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf)

- [24] MARTAN, Jiří. Víte, co máte v laserovém stroji za zdroj?. *Infocube* [online]. Domažlice: Lintech s.r.o, 2019 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://infocube.cz/cs/vite-co-mate-v-laserovem-stroji-za-zdroj/>
- [25] AL-KHURSAN, Amin. *Solid state laser*. 1. vydání. Croatia: InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0086-7.
- [26] VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1108-9.
- [27] *FBG Mirrors for Laser Cavity* [online]. China: Raysung Photonics Inc., b.r. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: <http://raysung.com/cp.asp?tid=22>
- [28] Vlákňové lasery. *Věda kolem nás* [online]. 2014, **2014**(2), 12 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: [http://www.vedakolemnas.cz/miranda2/m2/sys/galerie-download/vkn\\_002\\_2014\\_web.pdf?0.08336732489988208](http://www.vedakolemnas.cz/miranda2/m2/sys/galerie-download/vkn_002_2014_web.pdf?0.08336732489988208)
- [29] WEIJUN, Wu a Chen ZILUN. Beam combining of fiber lasers by a 3 × 1 signal combiner at a power >13 kW. *ScienceDirect* [online]. China: Optical Fiber Technology, 2019 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520019305280#b0005>
- [30] ASHOORI, V. a M. SHAYGANMANESH. Heat Generation and Removal in Solid State Lasers. *IntechOpen* [online]. 2012, **2012**, 351-352 [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.5772/2623. Dostupné z: [https://cdn.intechopen.com/pdfs/40634/InTech-Heat\\_generation\\_and\\_removal\\_in\\_solid\\_state\\_lasers.pdf](https://cdn.intechopen.com/pdfs/40634/InTech-Heat_generation_and_removal_in_solid_state_lasers.pdf)
- [31] Fiber vs. Disk: Which Laser Will Make the Cut?. *Photonics.com* [online]. USA: Photonics Spectra, 2011 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: [https://www.photonics.com/Articles/Fiber\\_vs\\_Disk\\_Which\\_Laser\\_Will\\_Make\\_the\\_Cut/a47616](https://www.photonics.com/Articles/Fiber_vs_Disk_Which_Laser_Will_Make_the_Cut/a47616)
- [32] ZHANG, Jinwei, Felix SCHULZE, Ka Fai MAK, Vladimir PERVAK, Dominik BAUER, Dirk SUTTER a Oleg PRONIN. *High-Power, High-Efficiency Tm: YAG and Ho* [online]. 2018, **12**(3) [cit. 2020-04-14]. DOI: 10.1002/lpor.201700273. ISSN 18638880. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/lpor.201700273>
- [33] KACHTÍK, Lukáš. Laser. *Laser* [online]. 2013 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/typy.html>
- [34] World of lasers. *Worldoflasers* [online]. c2005-2020 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.worldoflasers.com/lasertypes-gas.htm>
- [35] Comparison of low-pressure DC glow discharge and dielectric barrier discharge in CO<sub>2</sub> -laser mixture by optical emission spectroscopy. *Vacuum* [online]. 2012, **2012**(90), 135-140 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: [https://www.academia.edu/16647321/Comparison\\_of\\_low-](https://www.academia.edu/16647321/Comparison_of_low-)

- pressure\_DC\_glow\_discharge\_and\_dielectric\_barrier\_discharge\_in\_CO2-  
laser\_mixture\_by\_optical\_emission\_spectroscopy
- [36] Advantages and Disadvantages of CO2 Laser Cutting Machine and Market Orientation. *Opticallenssupplier* [online]. China, b.r. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.opticallensupplier.com/news/Advantages-and-Disadvantages-of-CO2-Laser-Cutting-Machine-and-Market-Orientation.html.html>
- [37] KUSALA, Jaroslav. Lasery kolem nás. *Cez.cz* [online]. ČEZ, 2004 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/f4.htm>
- [38] RÜDIGER, Paschotta. Q switches. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. b.r. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/q\\_switches.html](https://www.rp-photonics.com/q_switches.html)
- [39] RÜDIGER, Paschotta. Mode Locking. *RP Photonics encyklopedia* [online]. b.r. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/mode\\_locking.html](https://www.rp-photonics.com/mode_locking.html)
- [40] KRUEGER, Arnd a Philippe FÉRU. Getting practical. *SPIE* [online]. 2004 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://spie.org/news/getting-practical?SSO=1>
- [41] PASCHOTTA, Rüdiger. Passive Mode Locking. *RP Photonics Encyclopedia* [online]. b.r. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/passive\\_mode\\_locking.html](https://www.rp-photonics.com/passive_mode_locking.html)
- [42] LUCAS, Lonnie a Jim ZHANG. Femtosecond laser micromachining: A back-to-basics primer. *Industrial-lasers* [online]. Arizona, 2012 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/micromachining/article/16485321/femtosecond-laser-micromachining-a-backtobasics-primer>
- [43] HAMAD, Abubaker Hassan. Effects of Different Laser Pulse Regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the Ablation of Materials for Production of Nanoparticles in Liquid Solution. *High Energy and Short Pulse Lasers* [online]. InTech, 2016 [cit. 2020-04-06]. DOI: 10.5772/63892. ISBN 978-953-51-2606-5. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/high-energy-and-short-pulse-lasers/effects-of-different-laser-pulse-regimes-nanosecond-picosecond-and-femtosecond-on-the-ablation-of-ma>
- [44] TEMMLER, A. Influence of pulse duration and pulse frequency on micro-roughness for laser micro polishing (L $\mu$ P) of stainless steel AISI 410. *ScienceDirect* [online]. China: State Key Laboratory of Tribology, 2020 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433220300283>
- [45] TAYLOR, Lauren L., Xu JING a Pomerantz MICHAEL. Femtosecond laser polishing of germanium. *OSA Publishing* [online]. 2019 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/E825D32A-6CB9-457B->

92305A98FF71D96C\_421888/ome-9-11-4165.pdf?da=1&id=421888&seq=0&mobile=no

- [46] YUAN-DI, Chen, Tsai WU-JUNG, Liu SUNG-HO a Horng JI-BIN. Picosecond laser pulse polishing of ASP23 steel. *ScienceDirect* [online]. Taiwan: Optics & Laser Technology, 2018 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399218301294>
- [47] DOMKE, Matthias, Giovanni PIREDDA, Johann ZEHETNER a Sandra STROJ. Minimizing the Surface Roughness for Silicon Ablation with Ultrashort Laser Pulses. *SemanticScholar* [online]. Austria, 2016 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: [https://pdfs.semanticscholar.org/387f/a781f01a68056acc6fd882fc8cb73cb326c7.pdf?\\_ga=2.66333614.1447409677.1594397048-695354256.1594397048](https://pdfs.semanticscholar.org/387f/a781f01a68056acc6fd882fc8cb73cb326c7.pdf?_ga=2.66333614.1447409677.1594397048-695354256.1594397048)
- [48] CHANG-SHUO, Chang, Chung CHEN-KUEI a Lin JEN-FIN. Surface polishes of the SKD 61 tool steel by a femto pulse laser operating in a wide range of powers. *ScienceDirect* [online]. Taiwan, 2019 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013619304388>
- [49] ZHENG, Buxiang, Gedong JIANG a Wenjun WANG. Surface ablation and threshold determination of AlCu4SiMg aluminum alloy in picosecond pulsed laser micromachining. *ScienceDirect* [online]. China, 2017 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0030399216307496?token=1E03281E12FBF124F50D441E78E7600DD1AEFD6F4D4A331A36E3673BD02E1F28C15193AA1198DBD096ABD3E9107AC518>
- [50] MANNION, Paul, Thomas J. GLYNN, Jonathan MAGEE, Edward COYNE a Gerard M. O'CONNOR. *Ablation thresholds in ultrafast laser micromachining of common metals in air* [online]. b.r., , 470- [cit. 2020-06-28]. DOI: 10.1117/12.463744. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.463744>
- [51] ČERMÁK, Adam. *LASER v procesech mikroobrábění monolitních řezných nástrojů*. Plzeň, 2017. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta strojní.

## 7 Seznam použitých zkratek a symbolů

### Fyzikální veličiny a obecné zkratky:

A	absorpce	[%]
D	průměr ablovaného bodu	[ $\mu\text{m}$ ]
E	energie	[J]
$E_p$	energie v pulzu	[J]
F	fluence	[ $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]
f	frekvence	[Hz]
$F_{\text{th}}$	hodnota fluence ablačního prahu	[ $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]
h	Planckova konstanta	[J·s]
H	překrytí ve svislém směru	[%]
IČ	infračervené spektrum	
N	síla	[N]
$N_m$	počet elektronů na vyšší energetické hladině	[1]
$N_n$	počet elektronů na nižší energetické hladině	[1]
P	výkon	[W]
R	odrazivost	[%]
$R_a$	parametr drsnosti povrchu – průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti	[ $\mu\text{m}$ ]
$S_a$	parametr plošné drsnosti povrchu – průměrná výška vybrané oblasti	[ $\mu\text{m}$ ]
$S_p$	překrytí ve vodorovném směru	[%]
T	transmisivita (propustnost)	[%]
$T_p$	délka pulzu	[s]
UV	ultrafialové spektrum	
$\Delta E$	rozdíl energií	[J]
$\lambda$	vlnová délka	[nm]
$\nu$	frekvence vlnění	[Hz]
$\Omega$	obvodová rychlost	[ $\text{s}^{-1}$ ]
$\omega$	obvodová rychlost	[ $\text{s}^{-1}$ ]
$\omega_0$	průměr svazku laseru v ohnisku	[cm]

### Zkratky na téma laser:

CW laser	kontinuální laser (continuous wave laser)
Ho: YAG	pevnolátkový laser YAG – yttrium aluminium granát, Ho – holmium
Nd: YAG	pevnolátkový laser YAG – yttrium aluminium granát, Nd – neodým
Tm: YAG	pevnolátkový laser YAG – yttrium aluminium granát, Tm – thulium
Yb: YAG	pevnolátkový laser YAG – yttrium aluminium granát, Yb – ytterbium
UKP	ultra-krátkopulzní

### Chemické sloučeniny:

CO	oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
Cr	chrom
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kyselina sírová
HCl	kyselina chlorovodíková
He	helium
HNO <sub>3</sub>	kyselina dusičná
N <sub>2</sub>	dusík
Mo	molybden
V	vanad

## 8 Seznam obrázků

Obr. 1 – Schéma kotoučového leštění [4] .....	2
Obr. 2 – Druhy leštících kotoučů dle materiálu [5] .....	3
Obr. 3 – Schéma chemického leštění [9] .....	5
Obr. 4 – Trojúhelníkový diagram koncentrací $H_2SO_4 + HCl + HNO_3$ pro chemické leštění ocelí [3] .....	6
Obr. 5 – Schéma elektrolytického leštění [10] .....	7
Obr. 6 – Porovnání fotografií před a po elektrolytickém leštění [11] .....	8
Obr. 7- Spontánní a stimulovaná emise [15] .....	10
Obr. 8 – Schéma tříhladinového laserového systému [18] .....	11
Obr. 9 – Schéma konstrukce otevřeného rezonátoru [19] .....	12
Obr. 10 – Absorpce záření v závislosti na materiálu [21] .....	12
Obr. 11 – konstrukce pevnolátkového tyčového laseru [14] .....	14
Obr. 12 – Schéma vláknového laseru [27] .....	14
Obr. 13 – Konstrukce diskového pevnolátkového laseru [14] .....	15
Obr. 14 – Chlazení diskového laseru pomocí chladiče [30] .....	16
Obr. 15 – vibrační možnosti $CO_2$ molekuly [34] .....	17
Obr. 16 – Schéma energetické přeměny $CO_2$ laserů [34] .....	17
Obr. 17 – Tvorba impulzů při metodě Mode-locking [40] .....	20
Obr. 18 – Schéma aktivního mode-lockingu [39] .....	21
Obr. 19 – Schéma pasivního mode-lockingu [39] .....	21
Obr. 20 – Teoretické porovnání kontinuálního, nanosekundového a piko/femtosekundového laseru při obrábění [42] .....	22
Obr. 21 – Praktické porovnání nanosekundové a femtosekundové ablace [43] .....	23
Obr. 22 – Schéma laserového leštění pulzním laserem [44] .....	23
Obr. 23 – Porovnání leštěného a neleštěného povrchu AISI H11 [44] .....	24
Obr. 24 – Návrh matice vzorků pro experiment leštění .....	27
Obr. 25 - Definice šrafovacích parametrů [51] .....	28
Obr. 26 - Přehled strategií šrafování .....	29
Obr. 27 – Detail pracovního prostoru stroje pro mikroobrábění laserem .....	29
Obr. 28 – Měřicí přístroj Alicona Infinite Focus G5 .....	29
Obr. 29 – Vypálené body pro vyhodnocení ablačního prahu .....	31
Obr. 30 – Graf pro vyhodnocení ablačního prahu .....	32
Obr. 31 – Výkres vzorku s označením experimentální matice .....	34
Obr. 32 – Vstupní hodnoty experimentu leštění .....	36
Obr. 33 – Fotografie leštěných vzorků .....	37



Obr. 34 – Sken referenčního broušeného povrchu .....	38
Obr. 35 – Sken leštěného povrchu parametry $S_p = 90 \%$ ; $F = 200 \%$ $F_{th}$ .....	38
Obr. 36 – Drsnost povrchu $R_a$ v závislosti na překrytí $S_p$ pro vzorek B-4-a (šraf A) .....	41
Obr. 37 - Drsnost povrchu $R_a$ v závislosti na překrytí $S_p$ pro vzorek B-5-b (šraf B) .....	41
Obr. 38 - Drsnost povrchu $R_a$ v závislosti na překrytí $S_p$ pro vzorek B-6-b (šraf C) .....	42
Obr. 39 - Drsnost povrchu $R_a$ v závislosti na překrytí $S_p$ pro vzorek B-4-a (šraf A) .....	42
Obr. 40 - Drsnost povrchu $R_a$ v závislosti na překrytí $S_p$ pro vzorek B-5-b (šraf B) .....	43
Obr. 41 - Drsnost povrchu $R_a$ v závislosti na překrytí $S_p$ pro vzorek B-6-b (šraf C) .....	43
Obr. 42 – Plošná drsnost povrchu $S_a$ v závislosti na překrytí $S_p$ pro vzorek B-4-a (šraf A)..	45
Obr. 43 – Plošná drsnost povrchu $S_a$ v závislosti na překrytí $S_p$ pro vzorek B-5-b (šraf B)..	45
Obr. 44 – Plošná drsnost povrchu $S_a$ v závislosti na překrytí $S_p$ pro vzorek B-6-b (šraf C)..	46
Obr. 45 – Sken celé matice oblastí na vzorku B-5-b.....	47
Obr. 46 - Drsnost povrchu $R_a$ v závislosti na překrytí $S_p$ pro vzorek B-6-b (šraf C) .....	47

## 9 Seznam tabulek

Tab. 1 – Složení past na leštění kovových materiálů [3].....	4
Tab. 2 – Složení roztoků na chemické leštění některých kovů (na 1 litr vodného roztoku) [3] .....	6
Tab. 3 – Výsledné hodnoty drsnosti v závislosti na parametrech elektrolytického leštění vzorku z materiálu Ti–13Nb–13Zr [12].....	8
Tab. 4 – Porovnání jednotlivých druhů leštění [3], [6], [12], [13] .....	9
Tab. 5 – Porovnání některých druhů laserů z hlediska aktivního prostředí a vlnových délek [37].....	19
Tab. 6 – Přesné nastavení výkonů laseru pro měření ablačního prahu.....	30
Tab. 7 – Naměřené průměry ablovaných bodů pro vyhodnocení ablačního prahu.....	32
Tab. 8 – Naměřené referenční hodnoty parametru drsnosti Ra [ $\mu\text{m}$ ].....	35
Tab. 9 - Naměřené referenční hodnoty parametru plošné drsnosti Sa [ $\mu\text{m}$ ] .....	35
Tab. 10 – Výsledné drsnosti povrchu na vzorku B–4–a (šraf A).....	38
Tab. 14 - Výsledné drsnosti povrchu na vzorku B–6–b (šraf C).....	40
Tab. 15 - Výsledné procentuální drsnosti povrchu oproti referenci na vzorku B–6–b (šraf C) .....	40
Tab. 16 – Výsledné plošné drsnosti na vzorku B-4-a (šraf A).....	44
Tab. 17– Výsledné plošné drsnosti na vzorku B-5-b (šraf B) .....	44
Tab. 18– Výsledné plošné drsnosti na vzorku B-6-b (šraf C).....	43