

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



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Laserové leštění litiny s kuličkovým grafitem**  
**Laser polishing of cast iron with spheroidal graphite**

AUTOR:

Bc. Jakub Fousek

STUDIJNÍ PROGRAM:

Výrobní inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE:

Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

**PRAHA 2022**

## 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: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Laserové leštění litiny s kuličkovým grafitem**

Název diplomové práce anglicky:

**Laser polishing of cast iron with spherical graphite**

Pokyny pro vypracování:

1. Technologie leštění a charakterizace povrchu  
Hodnocení kvality povrchu
2. Metody laserového leštění  
Způsoby a techniky laserového leštění
3. Možnosti leštění litiny s kuličkovým grafitem
4. Návrh experimentu pro stanovení vlivu parametrů laseru na kvalitu povrchu
5. Realizace a vyhodnocení experimentů

Seznam doporučené literatury:

\_\_\_\_\_

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

**Ing. Tomáš Primus ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Datum zadání diplomové práce: **16.03.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

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

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

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Cílem diplomové práce se zaměřením na laserové leštění litiny s kuličkovým grafitem je optimalizace této technologie tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší shody laserově leštěného vzorku se vzorkem vyhotoveným ručním leštěním. Teoretická část práce je zaměřena na parametry využívané pro kvalitativní popis leštěného povrchu, jako je drsnost, lesk a v případě laserového leštění také výsledná tvrdost. Experimentální část práce je orientována na analýzu vstupních vzorků, návrh, provedení, vyhodnocení a interpretaci získaných dat laserového leštění.

## **Klíčová slova**

Leštění, nanosekundový laser, drsnost povrchu, litina s kuličkovým grafitem

## **Abstract**

The aim of the thesis with a focus on laser polishing of spherical graphite cast iron is to optimize this technology in order to achieve the highest possible correspondence of the laser polished sample with the sample made by hand polishing. The theoretical part of the thesis is focused on parameters used for qualitative description of polished surface, such as roughness, gloss and in case of laser polishing also the resulting hardness. The experimental part of the thesis is oriented on the analysis of input samples, design, execution, evaluation and interpretation of laser polishing data.

## **Keywords**

Polishing, nanosecond laser, surface roughness, cast iron with spheroidal graphite

## **Poděkování**

Děkuji Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a jeho cenné rady nejen v oblasti laserových technologií, konzultantovi Ing. Tomáši Primusovi, bez jehož pomoci s experimentální částí práce a nespočtu konzultací nad tématem laserových technologií by práce jen těžko vznikala. A dále také děkuji Ing. Jakobovi Horníkovi, Ph.D. a Ing. Janu Krčilovi, Ph.D. za konzultaci a měření týkající se metalografické analýzy.

## Obsah

1	Úvod .....	1
2	Cíle práce .....	2
3	Teoretická část.....	3
3.1	Leštění povrchu .....	3
	3.1.1 Drsnost povrchu .....	5
	3.1.2 Zrcadlový lesk .....	10
	3.1.3 Tvrdost povrchu.....	10
3.2	Litina.....	11
3.3	Leštění laserem.....	13
3.4	Parametry laserového záření.....	14
3.5	Leštění ultra krátkopulzním laserem.....	22
3.6	Leštění nanosekundovým laserem .....	25
3.7	Shrnutí teoretické části.....	28
4	Experimentální část .....	30
4.1	Cíl experimentální části .....	30
4.2	Vstupní analýza vzorků .....	30
4.3	Použité experimentální a měřící zařízení.....	35
	4.3.1 Laserová stanice .....	36
	4.3.2 Optický 3D mikroskop .....	37
	4.3.3 Konfokální mikroskop.....	37
4.4	Možnosti aplikace ochranné atmosféry.....	38
4.5	Pre-experiment .....	41
	4.5.1 Návrh pre-experimentu .....	41
	4.5.2 Provedení a vyhodnocení pre-experimentu .....	43
4.6	Hlavní experiment .....	50
	4.6.1 Návrh hlavního experimentu .....	50
	4.6.2 Realizace a vyhodnocení hlavního experimentu.....	51
4.7	Finální experiment .....	62
	4.7.1 Návrh finálního experimentu .....	62
	4.7.2 Realizace a vyhodnocení finálního experimentu.....	62
4.8	Metalografická analýza a měření mikrotvrdosti .....	67
5	Shrnutí experimentální části.....	71

6	Závěr .....	73
7	Literatura .....	74
8	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	83
9	Seznam Obrázků .....	86
10	Seznam tabulek.....	90



# 1 Úvod

Dokončování povrchu pomocí technologie leštění je využíváno v mnoha průmyslových odvětvích. Leštěný povrch poskytuje řadu benefitů od pouhé vizuální atraktivity, až po praktická využití velmi nízké drsnosti povrchu. Nízké drsnosti ve spojení se zrcadlovým leskem je využíváno například při tváření plechů pro automobilový průmysl, kde tvářecí formy vyráběné z litiny s kuličkovým grafitem požadují přesně tyto vlastnosti. Doposud jsou tyto díly leštěny ručně. Ruční leštění vyžaduje mnoho času, vyšší počet technologických operací a zkušenou obsluhu. Z těchto důvodů je snaha nahradit stávající technologii technologií laserového leštění, která dokáže být v těchto ohledech vhodnější.

Tato diplomová práce se zabývá právě technologií leštění s využitím laserových technologií. V teoretické části práce jsou podrobněji definovány cíle práce, které jsou konkrétně zaměřeny na leštění litiny s kuličkovým grafitem EN – GJS 2070. Dále je teoretická část věnována pochopení problematiky leštění a parametrům, které vyleštěný povrch materiálu charakterizují. Jedná se o některé parametry drsnosti povrchu, jako jsou parametry  $R_a$ ,  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_{xp}$  a další. V závěru teoretické části jsou stručně představeny některé laserové parametry, jejichž správné nastavení hraje hlavní roli při dosažení optimálních výsledků laserového leštění.

Experimentální část práce začíná analýzou vstupních vzorků, která je důležitá pro určení optimální strategie leštění. Dále se dělí na podkapitoly o návrhu experimentů a jejich vyhodnocení a interpretaci výsledků. V kapitole pojednávající o návrhu experimentu je věnován prostor také použití ochranné atmosféry, která je pro úspěšné laserové leštění nezbytná. Celý experiment sestává z několika dílčích experimentů, jejichž cílem je optimalizace některých parametrů vstupujících do komplexní problematiky laserového leštění. Hlavní experiment je pojat plně faktoriální formou. V závěru experimentální části práce je provedena metalografická analýza jednoho ze vzorků, která napomáhá interpretaci výsledků z předešlých experimentů a formulaci závěrečného hodnocení celého experimentu.

## **2 Cíle práce**

Cílem práce je analýza možností využití leštění laserem jako alternativy k ručnímu leštění litiny s kuličkovým grafitem. Dílčími cíli práce jsou analýza povrchu po referenčním ručním leštění, teoretická definice možností laserového leštění, provedení a vyhodnocení navržených experimentů a výsledné nalezení optimálních technologických parametrů laserového leštění. Přidaná hodnota může dále být ve zlepšení integrity materiálu na povrchu a zvýšení některých mechanických vlastností.

V praktické části práce je použito znalostí z teoretické části, kde je na jejich základě navržena a provedena série experimentů. Cílem experimentů je stanovit optimální podmínky pro dosažení co nejlepších výsledků vyhodnocených pomocí parametrů z teoretické části. Jsou zde také uvedena řešení některých problémů, které vyvstaly v průběhu experimentů. Například se jedná o zamezení silné oxidace povrchu po tepelných jevech doprovázejících použité technologie.

Potenciálně zdařilým výsledkem celé práce je optimalizovaná technologie laserového leštění, jejímž výsledkem je zrcadlový povrch s nízkou drsností.

### **3 Teoretická část**

Teoretická část práce se v úvodu zabývá stručným popisem leštění z hlediska jeho využitelnosti. Je zde uveden výčet komerčních technologií leštění, jejich výhody, nevýhody a srovnání. Na úvod navazuje vymezení pojmů, bez kterých by se popis problematiky leštění neobešel. Jedná se o definici parametrů využívaných k popisu kvality povrchu materiálu. Parametry zde uvedené byly vybrány, jelikož jejich kombinací lze popsat povrch komplexně a pro jeho určení jsou z hlediska leštěného povrchu laserovým paprskem nejlépe vypovídající. Největší část teoretické práce se již týká tématu leštění pomocí laserového zařízení a parametrů laserového procesu. Jsou zde podrobněji popsány rozdílné metody leštění na základě délky pulzu. Konkrétně se jedná o leštění pomocí femtosekundových pulzů, jejich modifikaci s využitím tzv. burst módu a pulzů nanosekundových. Každá z uvedených možností laserového leštění se liší způsobem úpravy povrchu a velikostí ovlivnění povrchové vrstvy. Na závěr teoretické části je uvedena kapitola, která popisuje vliv záměrného odchýlení se od fokusační vzdálenosti za účelem vylepšení výsledků technologie leštění.

#### **3.1 Leštění povrchu**

Úvodem této kapitoly je vhodné nastínit problematiku technologie leštění, definovat, co je jejím cílem a jaké jsou technologické možnosti dosažení těchto cílů. Je také důležité věnovat se měření všech potřebných parametrů a ukazatelů, které charakterizují a popisují kvalitu povrchu před a po její úpravě.

Leštění je dokončovací operace, při které již není cílem odstranění materiálu pro dosažení výsledného tvaru součásti, ale pouze úprava povrchu z hlediska jeho vzhledu a parametrů drsnosti. Technologie leštění spočívá v odebrání či zahlazení výstupků na povrchu materiálu, takzvaných „peaků“, které jsou obvykle vysoké v jednotkách až desítkách mikrometrů. Eliminací výšky jednotlivých peaků dochází k redukci drsnosti. Dále lze dostatečnou redukci drsnosti získat za určitých podmínek lesklý povrch. [1]

Požadavky na kvalitu vyleštěného povrchu mohou být různé. Nejčastěji se jedná o dvě následující specifika. [2]

### a) Lesk povrchu

Jedná se o nejpřísnější podmínky na drsnost povrchu z hlediska využití např. pro formy na vstřikování plastů, kde je výsledný povrch vyrobené součásti kvalitativně velice závislý na textuře v povrchu formy. Mimo vliv na plastový díl má kvalita povrchu formy také vliv na její únavovou pevnost, odolnost proti korozi a odolnost proti rozvoji trhliny. V neposlední řadě je také patrný vliv na produktivitu výroby, ať už z hlediska vyššího počtu vyrobených kusů, či rychlosti vyhadzování hotových výrobků díky snížení koeficientu tření. [2]

### b) Funkcionalita povrchu

Ve většině aplikací není nutné dosažení vysoce zrcadlového lesku povrchu součástí. Naopak je potřebné v určitých aplikacích drsnost povrchu mít v mezích, které napomáhají funkčnosti dílu a tento lesk neumožňují. Příkladem je možné uvést mazání forem při tvářecích operacích za studena. I snížené požadavky na drsnost povrchu napomáhají ke zlepšení jeho mechanických vlastností a odolnosti. [2]



Obr. 1 – Faktory ovlivňující kvalitu povrchu výsledného výrobku [2]

Na Obr. 1 jsou graficky naznačeny významné faktory, které mají vliv na výslednou kvalitu povrchu. Jejich kombinací je definován povrch, jehož kvalita odpovídá všem faktorům a zvoleným technologiím.

Před vlastním popisem technologie laserového leštění je třeba vymezit pojmy, díky kterým je možné výsledky leštících operací změřit, popsat a porovnat. V následujících odstavcích bude uveden výčet několika

podstatných parametrů, které se běžně na vyleštěných dílech měří a jejich kombinací lze definovat kvalitu povrchu.

### 3.1.1 Drsnost povrchu

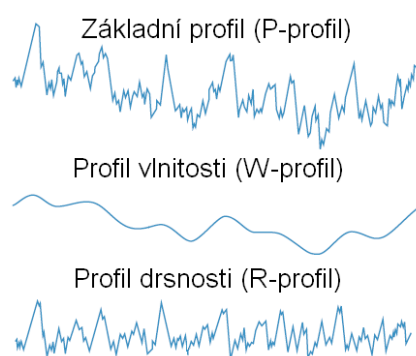
Prvním a nejdůležitějším parametrem kvality povrchu je jeho drsnost. Drsnost povrchu se získává naskenováním povrchu metodou 2D či 3D skenu profilu a jeho následnou filtrací. 2D měření probíhá konvenčně na drsnoměrech s přesným, nejčastěji diamantovým hrotem, který fyzicky přejede měřený povrch a získává tak informace o výšce, a tedy drsnosti, v daném místě měřeného profilu. Dalším způsobem měření drsnosti je bezkontaktní měření pomocí optického mikroskopu. Pouhým skenem dojde k vytvoření tzv. úplného profilu. Aplikací filtru označeného jako  $\lambda_s$  dojde ke zpracování dat do profilu základního, označovaného jako P profil. Základní profil se dále filtruje pomocí dvou dodatečných filtrů. Filtr  $\lambda_c$  je aplikován pro získání profilu drsnosti R a kombinací filtru  $\lambda_f$  a  $\lambda_c$  je základní profil zredukován na profil vlnitosti W. [3], [4], [5]

$\lambda_s$ ... krátkovlnný filtr definující rozdíl mezi nejkratšími složkami profilu a drsností [6]

$\lambda_c$ ... dlouhovlnný filtr definující rozdíl mezi drsností a vlnitostí [6]

$\lambda_f$ ... dlouhovlnný filtr definující rozdíly mezi vlnitostí a tvarem [6]

Profily před a po aplikaci těchto filtrů jsou znázorněny na Obr. 2.



Obr. 2 – Základní profil, profil vlnitosti a profil drsnosti [3]

Parametr drsnosti povrchu má veliké množství ukazatelů, pomocí kterých lze morfologii povrchu popsat. Pro účely této práce bude vybráno pouze několik z nich. Vybrané parametry se řadí mezi nejpoužívanější a pomocí jejich kombinace lze drsnost povrchu popsat komplexně.

Konkrétně se bude jednat o ukazatele  $R_a$ ,  $S_a$ ,  $R_z$ ,  $S_z$ ,  $R_{mr}$  a  $R_{sm}$ . Kombinací vybraných ukazatelů lze kvalitu povrchu popsat komplexněji, než s použitím jen jednoho z nich a data o morfologii poskytnou lepší představu o podobě zkoumaného povrchu.

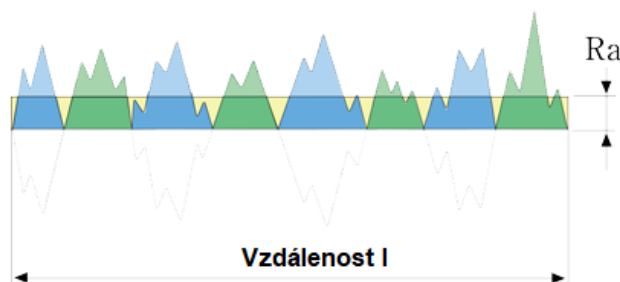
#### a) Ukazatel drsnosti povrchu $R_a$

Průměrná aritmetická odchylka profilu  $R_a$  Jedná se o průměr z absolutních hodnot jednotlivých odchylek od středové linie měřeného profilu a je definována vztahem 1:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

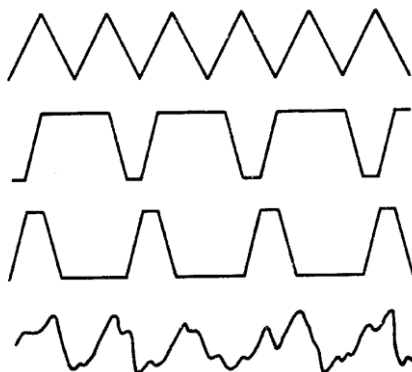
1

; kde  $l$  je délka měřeného úseku a  $Z(x)$  je výška profilu v místě  $x$  [7]



Obr. 3 – Grafické znázornění výpočtu  $R_a$  [8]

Na Obr. 3 je vidět znázornění výpočtu ukazatele  $R_a$ . Ukazatel  $R_a$  je nejčastěji používán a velice často se také uvádí ve výkresové dokumentaci. Je velmi jednoduchý na výpočet a na interpretaci, nicméně jeho nevýhodou je, že menší změny, jako např. velice výrazný úzký výstupek, jeho hodnotu téměř nezmění. [4]



Obr. 4 – Schéma pro stejné hodnoty parametru  $R_a$  na různých profilech [9]

Tento fakt dokládá také Obr. 4, na kterém jsou uvedeny čtyři odlišné profily se stejnou hodnotou ukazatele  $R_a$ , avšak odlišnou geometrií. Tyto povrchy budou mít rozlišnou funkčnost a všechny nemusí vyhovovat použití, na které byla drsnost předepsána. [9]

### b) Ukazatel drsnosti povrchu $S_a$

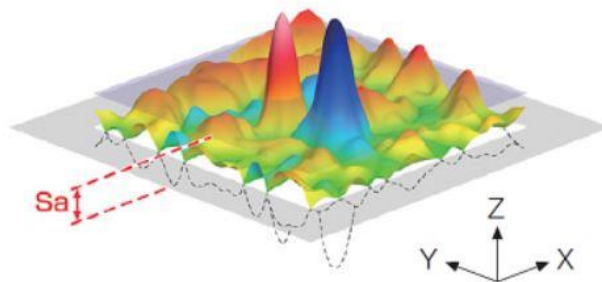
Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu je definován rovnicí 2.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x, y)| dx dy$$

2

; kde  $A$  je zkoumaná plocha a  $Z(x, y)$  je výšková souřadnice na místě  $x, y$  v ploše  $A$  [10]

Obdobně jako u parametru  $R_a$  se jedná o průměrnou hodnotu odchylky výšky od středové plochy na měřené oblasti. [11] Obecně lze říci, že plošné parametry drsnosti jdou statisticky významněji z důvodu většího množství dat. Právě z tohoto důvodu vycházejí častěji u plošného měření vyšší hodnoty drsnosti. Při reprezentaci dat je plošné měření „striktnější“, jelikož při něm dochází k odhalení většího množství nedokonalostí povrchu. [12]



Obr. 5 – Grafické znázornění významu parametru plošné drsnosti povrchu  $S_a$  [8]

### c) Ukazatel drsnosti povrchu $R_z$

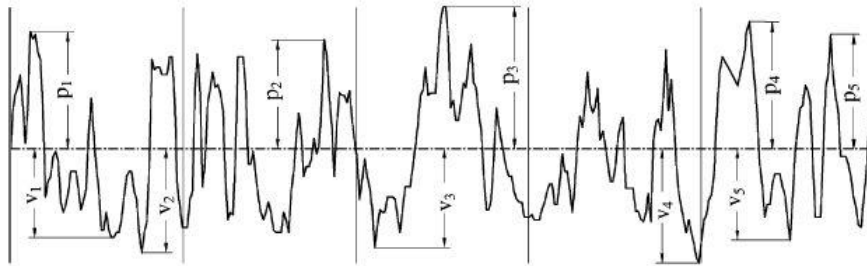
Největší výška profilu z deseti bodů je definována rovnicí 3.

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{5}$$

3

; kde  $y_{pmi}$  je výška  $i$ -tého nejvyššího výstupku profilu a  $y_{vmi}$  hloubka  $i$ -té největší prohlubně profilu [13]

Parametr drsnosti povrchu  $R_z$  je vyhodnocován na jedné základní délce měření. Jednoduše řečeno se jedná o průměr pěti nejvýraznějších rozdílů výšky profilu. K vizualizaci problematiky napomáhá Obr. 6, na kterém je vidět pět nejvyšších bodů profilu na obrázku označených písmeny  $p$  (1-5) a pět největších prohlubní značených písmeny  $v$  (1-5). [4], [13]



Obr. 6 – Definice výšky nerovností profilu z deseti bodů (ten-point height parameter) [4]

Parametr  $R_z$  je náchylnější na velké výkyvy výšek profilu z důvodu menšího počtu vyhodnocovaných hodnot oproti parametru  $R_a$ , a proto je v kombinaci právě s hodnotou  $R_a$  podstatně více vypovídající. [12]

#### d) Ukazatel drsnosti povrchu $S_z$

Parametr drsnosti  $S_z$  je plošnou alternativou parametru profilu  $R_z$ . Ve vyhodnocování parametrů není výrazný rozdíl. Jediným rozdílem je obvyklé navýšení parametru  $S_z$  z důvodu podstaty měření a množství dat, která jsou pro vyhodnocení parametru potřeba. [14]

#### e) Ukazatel drsnosti povrchu $R_{sm}$

Průměrná šířka prvků profilu je definována vztahem 4.

$$R_{sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{s_i}$$

4

; kde  $X_{s_i}$  jsou jednotlivé délky period ve směru měření [6]

Parametr, který poukazuje na průměrnou vzdálenost rýh v materiálu je využíván pro zhodnocení povrchu z hlediska jeho periodicity. Pomocí tohoto parametru jsou např. definovány měřené délky profilu drsnosti pro periodické profily. [7], [15]



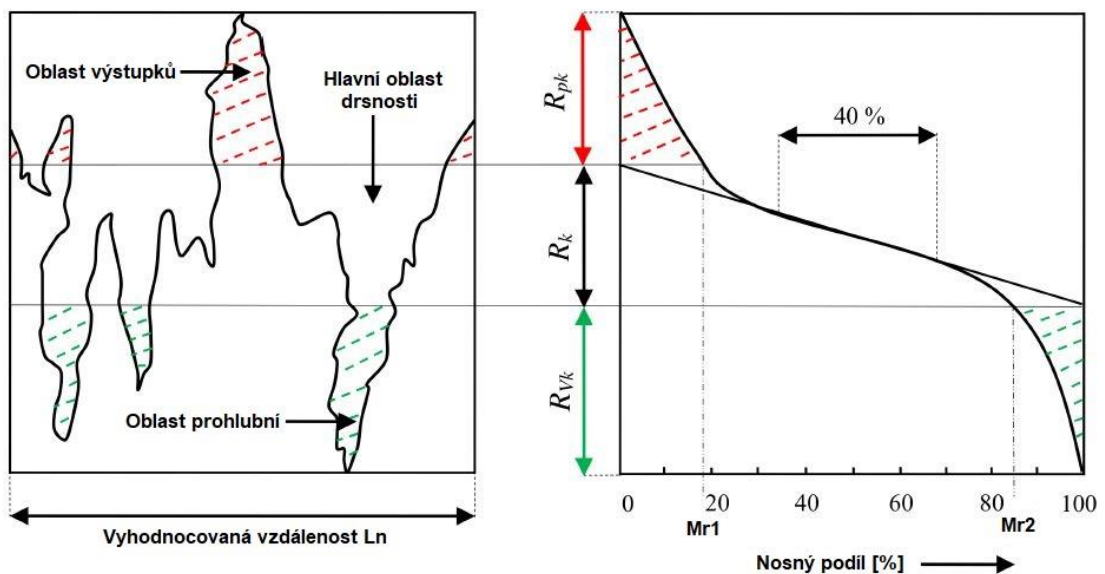
### f) Ukazatel drsnosti profilu $R_{mr}$

Materiálový podíl drsnosti povrchu je zásadní pro posuzování tribologických vlastností povrchu. Zjednodušeně tento parametr udává, kolik procent objemu materiálu je v určité výšce. Na této zjednodušené definici lze vysvětlit značení parametru, který je zapisován následujícím způsobem:

$$R_{mr}(c) = 20 \%$$

Udává, že v místě  $c$  je 20 objemových procent materiálu. Místo  $c$  je definováno od nuly do hodnoty  $R_y$ , které označuje rozdíl nejvyššího a nejnižšího bodu na měřeném profilu. [16]

Pomocí tohoto parametru lze sestavit Abbottovu-Firestonovu křivku, která je uvedena na Obr. 7. Typický tvar S-křivky je v grafu rozdělen na tři oblasti. V horní části grafu se nachází objem materiálu v „peakových“ oblastech drsnosti ( $R_{pk}$ ). Uprostřed je oblast nazývaná jako plocha hlavní drsnosti ( $R_k$ ) a v dolní části grafu pak oblast prohlubní ( $R_{vk}$ ). Rozdělení do oblastí je dáno lineární křivkou, která je shodná s S-křivkou alespoň ve 40 % celkové délky na vodorovné ose. Průsečíky této křivky se svislou osou na hodnotách 0 a 100 % pak definuje rozdělení oblastí viz Obr. 7. [17]



Obr. 7 – Abbottova – Firestonova křivka [18]

Jedním z podstatných parametrů, který lze z Abbottovy-Firestonovy křivky získat, je parametr  $S_{xp}$  (peak extreme height), tedy extrémní výška

peaku. Tento parametr udává výškový rozdíl, na kterém se vyskytuje určité množství materiálu (např. 80 %, kdy není uvažováno 10 % vrcholů a 10 % prohlubní). Tento parametr je podstatný pro popis nejrobustnější nosné části povrchu materiálu a umožňuje zanedbat nepodstatné peaky a prohlubně, které v použití povrchu nejsou podstatné. [19]

### **3.1.2 Zrcadlový lesk**

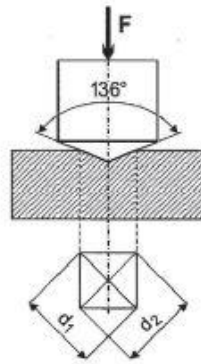
Cílem leštění je nejen snižování drsnosti povrchu, ale také dosažení zdánlivě pouze estetických vlastností ve formě lesku. Lesk povrchu po laserovém leštění je často degradován jeho oxidací, která je odstranitelná pomocí použití ochranné atmosféry. Lesklý povrch je vyžadován na různých součástech také díky jeho funkčním vlastnostem. Tento parametr je velice úzce spojen s již popisovanou drsností, a proto i jeho funkční vlastnosti nelze zcela oddělit od vlastností drsnosti. Dobře lze popsat vliv lesku například na formách pro vstřikování plastů. Tyto strojní díly musejí vykazovat vysokou kvalitu povrchu z důvodu jejich velkého vytížení a vysokých očekávání na produktivitu práce a totožnost výrobků. Lesk povrchu v některých případech zlepšuje třecí podmínky, upravuje vzhled výrobku, snižuje opotřebení formy a tím zlepšuje výrobní proces. Lesklý povrch není v každém případě žádoucí. V některých případech způsobuje lepení polymeru na materiál formy a znesnadňuje tím vyjmutí výrobku z formy. [20], [21], [22]

### **3.1.3 Tvrdost povrchu**

Kapitola o tvrdosti povrchu je v této práci uvedena z důvodu možného tepelného ovlivnění povrchu po laserovém leštění. Tepelně ovlivněná oblast je charakteristická odlišnou fázovou strukturou od původního materiálu, což se mimo jiné projevuje i na změně tvrdosti materiálu a je vhodné s touto změnou počítat a zohledňovat ji v kvalitativním popisu povrchu materiálu po laserovém leštění. [23] Tvrdost je definována jako odolnost materiálu proti vniku cizího pevného tělesa. Případný vnik tělesa do povrchu materiálu je charakterizován elastickou a plastickou deformací. Statické měření tvrdosti je zkoumané pomocí plastické deformace, kterou po odlehčení

zanechá vnikající předmět tzv. indentor v povrchu zkoumaného materiálu. [24]

Zkoušky tvrdosti, které zkoumají malou oblast, jako je například tepelně ovlivněná zóna po laserovém leštění lze označit jako zkoušky mikrotvrdosti. Pro jejich aplikaci je použita malá zatěžující síla, a to do 10 N. Princip zkoušky je uveden na Obr. 8. [25]



Obr. 8 – Schéma zkoušky tvrdosti podle Vickerse [25]

Na Obr. 8 je znázorněna zkouška tvrdosti podle Vickerse, která patří mezi nejpoužívanější a je v této práci uvedena jako názorná. Na zkoušku odkazuje rovnice 5, kterou lze dle naměřených hodnot rozměrů  $d_1$ ,  $d_2$  (jejich aritmetického průměru  $d$ ) a zatěžovací síly  $F$  vypočítat hodnotu tvrdosti. [25]

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2}$$

5

Výsledek zkoušky je zapisován následujícím zápisem:

$$640 HV 1/20$$

Tento zápis značí tvrdost dle Vickerse 640, která byla naměřena s zátěžnou silou 1 kp (=9,81 N) a zátěžná doba byla 20 s. [25]

### 3.2 Litina

Litina je slitina železa s uhlíkem a dalšími doprovodnými prvky, ve které je obsah uhlíku vyšší než jeho maximální rozpustnost v austenitu, tedy vyšší než 2,11 hm. %. [26]

Litiny jsou děleny následovně: [26], [27]

- Bílé litiny
- Grafitické litiny
  - Litiny s lupínkovým grafitem
  - Litiny s kuličkovým grafitem
  - Litiny s červíkovitým grafitem
  - Temperované litiny

Kombinaci bílé a grafitické litiny tvoří litiny makové, kde se uhlík vyskytuje částečně ve formě grafitu a částečně ve formě cementitu a litiny tvrzené. Tvrzené litiny vznikají vhodným tepelným zpracováním z litin bílých, v nichž se z části cementitu vyloučí grafit. [26], [27]

Vzhledem k cílům práce, zde bude podrobněji rozebrána pouze grafitická litina, konkrétně litina s kuličkovým grafitem.

Výroba litiny s kuličkovým grafitem spočívá v modifikaci taveniny takovým způsobem, aby byl grafit vyloučen ve formě kuliček. Modifikace nejčastěji probíhá přidáním hořčíkových slitin do taveniny. Vzhledem k vlastnosti hořčíku, jakožto stabilizátoru karbidů, je nutné následné očkování na podporu grafitizace. Pro grafitizační očkování jsou nejčastěji používány slitiny křemíku s jeho obsahem od 45 do 75 %. Výsledná struktura litiny s kuličkovým grafitem může být v závislosti na přesném chemickém složení a rychlosti ochlazování buď perlitická, perliticko-feritická, nebo feritická. Struktura litin je dána kombinací chemického složení a rychlosti ochlazování. Z chemického složení má největší vliv obsah uhlíku, který je obecně v litinách v koncentraci 3,2 až 4,2 %. Konkrétně litina EN – GJS 2070, používaná v této práci má perlitickou strukturu s vysokou pevností a tvrdostí. Mez pevnosti této litiny je přibližně 700 MPa a její tvrdost se pohybuje v rozmezí od 225 do 305 HV. [26], [27]

Litina s kuličkovým grafitem má lepší kombinace vlastností než litina s grafitem lupínkovým a zároveň lepší slévárenské vlastnosti než oceli na odlitky. Z těchto důvodů se jedná o velice často používaný materiál. [26]

Litina s kuličkovým grafitem je schopna prodělat při kalení také martenzitickou a bainitickou přeměnu. Např. výsledkem kalení litiny

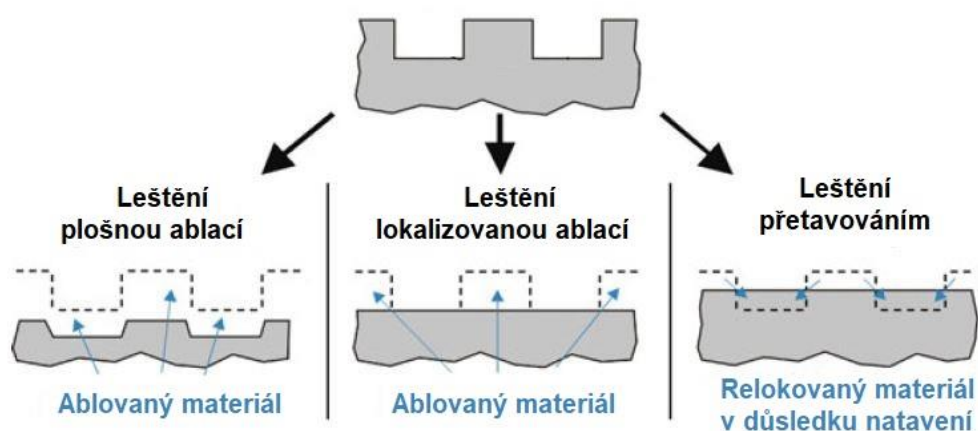
s kuličkovým grafitem do vody vznikne martenzitická struktura, která se vyznačuje vysokou pevností, tvrdostí, ale také křehkostí. [28]

### 3.3 Leštění laserem

Leštění laserem má oproti konvenčním technologiím převážně technologii mechanického ručního leštění několik výhod. Pro ruční mechanické leštění je zapotřebí zkušeného operátora. I přesto je čas potřebný na vyleštění součásti velice dlouhý a téměř vždy je zapotřebí více než jedna leštící operace.

Nízká produktivita práce, ekologická zátěž a nevhodnost použití pro malé díly či selektivní leštění jsou hlavním důvodem použití laserů. Laserové leštění je lehce automatizovatelné s vysokou opakovatelností, lze ho aplikovat na malé díly a pouze vybrané plochy na povrchu součástí a pokud je proces správně navržen, může nahradit také předcházející brousící operace. Mimo tyto technologické faktory laserové leštění může zvýšit povrchovou tvrdost a korozní odolnost. Oproti ručnímu leštění má laserové leštění také řadu omezení a nevýhod. Vzhledem k použité technologii laserového leštění může docházet k nežádoucímu tepelnému ovlivnění povrchové vrstvy materiálu. Leštění obecných ploch je velmi náročné a variabilita leštícího procesu v jeho samotném průběhu je oproti ručnímu leštění také minimální. [29], [30], [31]

Laserové leštění lze rozdělit na tři druhy [29], které jsou uvedeny na Obr. 9.



Obr. 9 – Rozdělení laserového leštění [29]

Dva druhy leštění jsou založeny na úběru materiálu, tzv. ablací a třetí typ je realizován bez úběru materiálu přetavením povrchu. Leštění pomocí ablace může probíhat na celém leštěném povrchu viz Obr. 9 vlevo. Tento způsob se využívá např. při leštění femtosekundovými pulzy, který je dále popsán v kapitole 3.5. Lokalizovaná ablace materiálu viz Obr. 9 uprostřed je velice náročná na zaměření a provedení úběru, a proto je tato metoda spíše okrajová a příliš se nevyužívá. Leštění přetavením povrchu (Obr. 9 vpravo) je naopak velice častá. Jak již bylo uvedeno, nedochází při ní k úběru materiálu, ale pouze k jeho relokaci. Tato metoda bude více popsána v kapitole 3.6. [29]

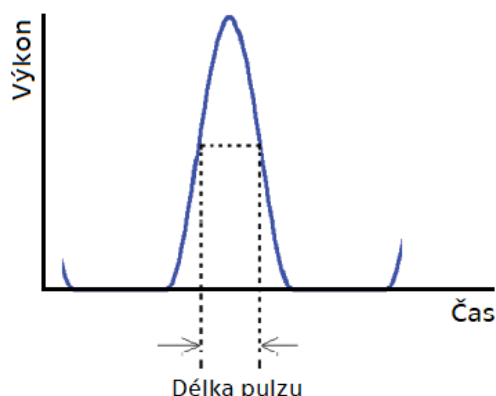
### 3.4 Parametry laserového záření

Laserové parametry jako je výkon, délka pulzu, frekvence nebo skenovací rychlost jsou hlavními parametry, které ovlivňují proces laserového leštění. Kromě kvality povrchu ale také ovlivňují jeho oxidaci, zejména pro oceli a litiny. [32], [33]

V následujících odstavcích budou stručně popsány některé z důležitých laserových parametrů a jejich možný vliv technologického procesu.

#### a) Délka pulzu

Délku pulzu lze definovat více způsoby. Nejčastějším způsobem definice je doba trvání laserového pulzu v polovině jeho špičkového výkonu. Tuto definici popisuje Obr. 10. [34]



Obr. 10 – Zobrazení délky pulzu (upraveno) [35]

Další možností definice, která se využívá převážně při popisu poškození optických prvků v laserovém přístroji (laser-induced damage) je pomocí tzv. efektivní délky pulzu. Tuto definici popisuje rovnice 6.

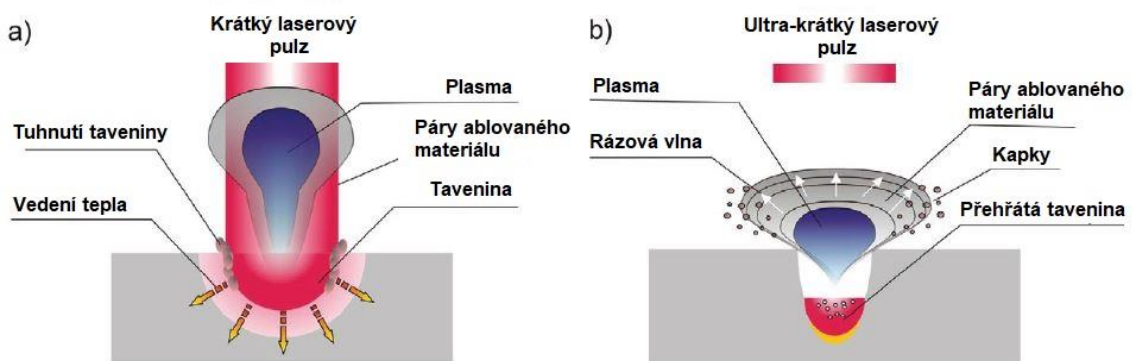
$$\tau_p = \frac{E_p}{P_{peak}}$$

6

; kde  $\tau_p$  je délka pulzu,  $E_p$  energie v pulzu a  $P_{peak}$  špičkový výkon laseru [34]

Délka pulzu je jedním z ukazatelů technologických možností daného laseru. Obecně lze lasery rozdělit do tří skupin, a to na lasery s dlouhými pulzy, lasery krátkopulzní a ultra krátkopulzní. Lasery s dlouhými pulzy jsou dobrou volbou pro efektivní ablací a operace, při kterých není podstatné či je dokonce vyžadované tepelné ovlivnění materiálu. Naopak lasery s ultra krátkými pulzy jsou vhodné pro přesné operace s nižší efektivitou práce v případě, kdy není vhodné tepelné ovlivnění okolního materiálu. [35], [36]

Obr. 11 teoreticky popisuje rozdíly mezi interakcí dlouhých a krátkých laserových pulzů s materiálem. Je zde patrná změna invazivity a produktivity. Zatímco kontinuální lasery a lasery s delšími délkami pulzů (ns) ovlivňují při úběru materiálu především tepelně, tak ultra-krátkopulzní lasery pracují na principu takzvané studené ablace. Při studené ablací nedochází k předávání tepla materiálu vlivem velice krátké interakce mezi laserovým svazkem a povrchem materiálu. Ablovaný objem materiálu je v rámci laserového pulzu vypařen bez tepelného ovlivnění okolní oblasti. [37]



Obr. 11 – Interakce dlouhých a krátkých pulzů s materiálem [37]

### b) Opakovací frekvence, výkon laseru a energie v pulzu

Opakovací frekvence velice výrazně ovlivňuje výkonové parametry laseru. Udává, do kolika pulzů v průběhu vteřiny se rozdělí průměrný výkon laseru. Frekvence je převrácenou hodnotou periody viz rovnice 7. [35], [38]

$$f_{rep} = \frac{1}{T}$$

7

U pulzního laserového zařízení lze definovat dva různé druhy výkonu, a to výkon špičkový a průměrný. Špičkový výkon je dán množstvím energie v jednom laserovém impulzu a jeho trváním. Tuto relaci udává rovnice 8. [39]

$$P_{peak} = \frac{E_p}{\tau_p}$$

8

; kde  $P_{peak}$  je maximální špičkový výkon,  $E_p$  energie v jednom impulzu a  $\tau_p$  doba trvání impulzu [38]

Průměrný výkon laseru je dán celkovou energií, kterou je schopen laserové zařízení produkovat. Pro kontinuální lasery se jedná o spojitě dodávaný výkon, zatímco u pulzních laserů je průměrný výkon nedostatečně charakterizujícím parametrem. Relaci mezi výkonem průměrným a špičkovým při popisu pulzních laserů udává rovnice 9. Do tohoto vztahu vstupuje úzké spojení výkonu s opakovací frekvencí. [40], [38]

$$P_{peak} = \frac{P_{avg}}{f_{rep} \cdot \tau_p} = \frac{P_{avg} \cdot T}{\tau_p}$$

9

Další možností, jak udávat výkonové parametry laseru, je díky definici tzv. fluence neboli intenzity energie. Fluence udává množství energie vztahované k obsahu plochy laserového svazku. Rovnice 10 popisuje problematiku fluence pro tvar paprsku dle Gausse a udává také, jak se množství energie snižuje v závislosti na polohové souřadnici  $r$ , která reprezentuje vzdálenost od osy svazku. [41]



$$F(r) = \frac{2 \cdot E_p}{\pi \cdot \omega_0^2} \cdot e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}}$$

10

; kde  $F(r)$  je intenzita energie ve vzdálenosti  $r$  od osy svazku a  $\omega_0$  poloměr svazku

Je-li uvažováno  $r = 0$ , je člen  $e^{-\frac{2r^2}{\omega_0^2}}$  roven jedné. Při těchto podmínkách je intenzita energie označována na špičkovou a značí se  $F_0$ . [41]

### c) Vlnová délka

Vlnová délka laseru závisí na použitém aktivním prostředí rezonátoru a je významným parametrem pro interpretaci absorpce laserového záření do materiálu. Absorpce záření je popsána Beer-Lambertovým zákonem, který je uveden v rovnici 11. [42], [43], [44]

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha z}$$

11

; kde  $I(z)$  je intenzita záření v hloubce  $z$ ,  $I_0$  intenzita záření těsně pod povrchem po odečtení odraženého záření a  $\alpha$  absorpční koeficient

Vlnová délka není přímo zahrnuta v Beer-Lambertově zákoně, ale v absorpčním koeficientu, který je nepřímo úměrně závislí na vlnové délce. Tuto skutečnost popisuje rovnice pro penetrační hloubku záření s ozn. 12.

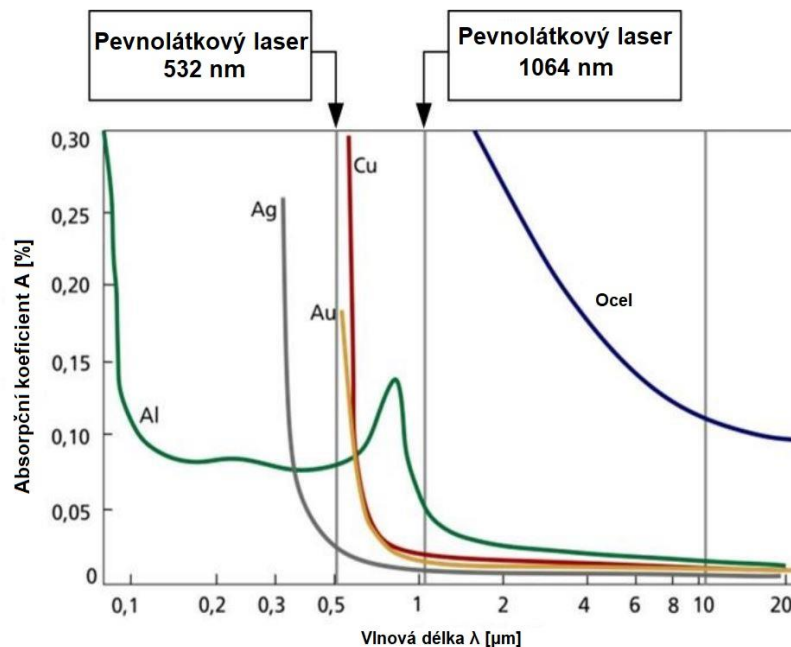
$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot k_e}$$

12

; kde  $\delta$  je penetrační hloubka,  $\lambda$  vlnová délka a  $k_e$  extinkční koeficient [42], [43], [44]

Ze vztahů 11 a 12 vyplývá, že absorpce, a tedy i penetrační hloubka roste s klesající vlnovou délkou. Na Obr. 12 jsou uvedeny závislosti absorpce na vlnové délce použitého laseru pro sedm materiálů. Na všech uvedených materiálech lze vidět trend popisován rovnicemi 11 a 12. Z těchto trendů vyplývá nutnost volby vhodné vlnové délky pro různé laserové aplikace. Příkladem je použití laserů s vlnovou délkou 1064 nm pro obrábění slitin mědi. Použití tohoto laseru by nepřineslo vysokou efektivitu ablace a mělo

by negativní vliv na kvalitu a ekonomiku celého procesu z důvodu nutnosti použití velmi vysokých výkonů. Proto je při úpravě slitin mědi vhodné použít lasery s maximální vlnovou délkou 532 nm, které vykazují při použití vyšší absorpci záření a tím rychlejší a kvalitnější úběr materiálu. [45]



Obr. 12 – Závislost absorpce na vlnové délce pro různé materiály [46]

#### d) Fokuse a kvalita laserového svazku

V kapitole 3.4 b) je uvedena rovnice 10, která dokazuje závislost intenzity energie na poloměru svazku laserového zdroje. Pro maximalizaci intenzity energie je zapotřebí minimalizovat průměr svazku dopadajícího na upravovaný materiál. Z tohoto důvodu je definován parametr  $\omega_0$ , který udává minimální dosažitelný průměr laserového svazku. Tento průměr je označován jako pas svazku. Od minimálního průměru se paprsek zvětšuje pod divergentním úhlem  $\theta$ , který je dán rovnicí 13. [47]

$$\theta = \frac{2\lambda}{\pi\omega_0}$$

13

V axiální vzdálenosti od pasu svazku  $z_R$  (Rayleighova vzdálenost) je průměr svazku zvětšen o násobek  $\sqrt{2}$ . Pro Gaussovský svazek je plocha paprsku v tomto místě dvojnásobná oproti ploše v pase, což znamená také poloviční intenzitu záření. Rayleighova vzdálenost je závislá na vlnové délce

laseru a průměru paprsku v pase viz rovnice 14 a definuje hloubku ostrosti laserového zařízení jako její dvojnásobek. [48]

$$z_R = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$$

14

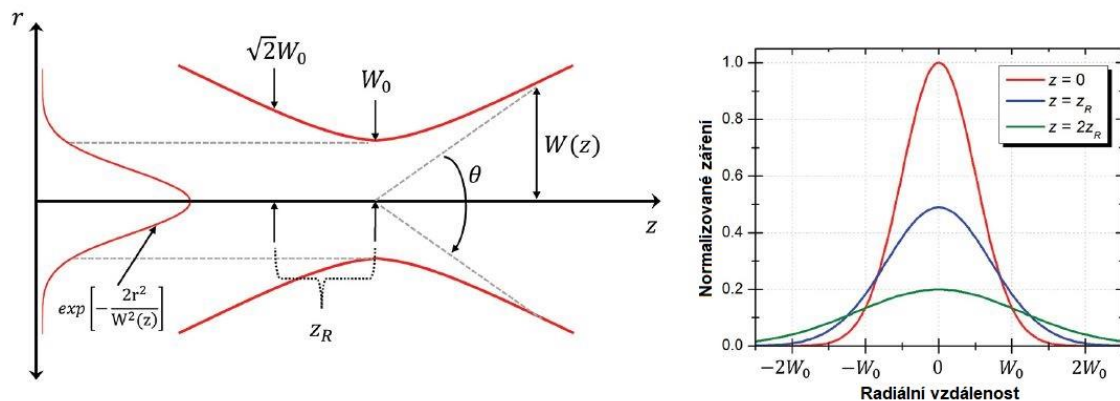
Po definici proměnných výše lze vypočítat také průměr svazku v libovolné vzdálenosti od minimálního průměru v pase. Tento výpočet je důležitý z důvodu změny skenovacích parametrů v závislosti na průměru svazku při odchýlení pracovní vzdálenosti laseru od ohniska a je uveden v rovnici 15. [40]

$$\omega(z) = \omega_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$$

15

; kde  $\omega(z)$  je poloměr svazku ve vzdálenosti  $z$  od pasu svazku

Veškeré parametry a vztahy uvedené v této kapitole jsou graficky znázorněny na Obr. 13.



Obr. 13 – Diagram popisující parametry Gaussovského svazku (vlevo) a normalizované záření svazku v závislosti na radiální vzdálenosti (vpravo) (upraveno) [40]

Jako komplexní posouzení geometrické kvality Gaussovského svazku je uváděn parametr  $M^2$  („M squared“), tedy faktor kvality paprsku. Jeho hodnota se v nejlepších případech limitně blíží jedné. Matematické vyjádření kvality svazku  $M^2$  je uvedeno v rovnici 16. Je nutné zdůraznit, že tento faktor postihuje pouze geometrickou podobnost se svazkem dle

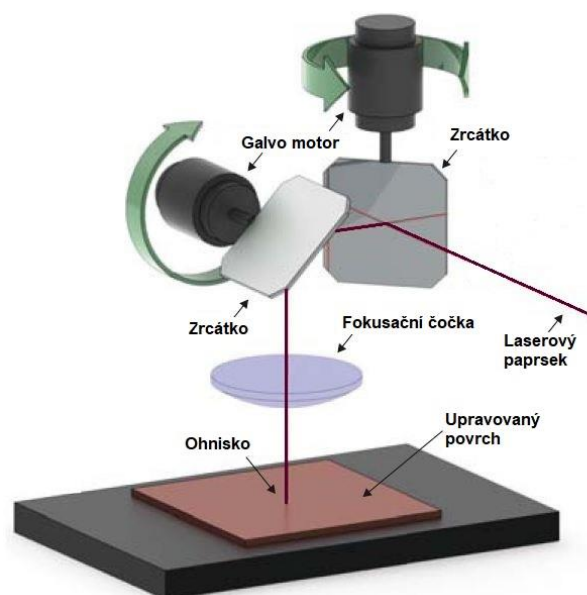
Gausse, a proto není možné celkovou kvalitu hodnotit pouze podle číselné hodnoty tohoto parametru. [45], [49], [50]

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \omega_0 \theta$$

16

### e) Překryv a rychlost skenování

Pohyb laserového svazku po materiálu je realizován tzv. galvo skenerem. Schématická konstrukce galvo skeneru je uvedena na Obr. 14. Laserový paprsek vystupující z optické cesty do rozmítacího mechanismu nejprve narazí na první zrcátko, které ovládá rozmítání v jedné z os x, y. Odtud svazek dopadne na druhé zrcátko, které určí zbývající polohu výsledného svazku. Přeš fokační čočku poté dopadá paprsek na místo, které bylo určeno pohyblivými zrcátky. Jelikož se jedná o mechanické rozmítání paprsku a galvo zrcátka je pohybováno pomocí servomotorů, je tato technologie stropově omezena rozmítací rychlostí z důvodu dynamiky pohybu zrcátek. Velikost a přesnost celého rozmítacího mechanismu určuje nejvyšší rychlost rozmítání. Lze říci, že pro takto jednoduchou konstrukci je rychlost skenování omezena na 10 m/s. Tato rychlost je převáděna z úhlových souřadnic natočení jednotlivých zrcátek, která jsou nastavována pomocí servomotorů. [45], [51], [52]



Obr. 14 – Schématická konstrukce galvo skeneru (upraveno) [51]

Výše popsaný princip je jen jednou z možností pohybu laserového svazku po povrchu materiálu. Dalšími možnostmi jsou např. lineární pohyby os  $x$ ,  $y$  a  $z$ , pomocí kterých lze také velmi přesně polohovat paprsek. Tyto pohyby mohou být realizovány pohybem stolku, ale také pohybem laserové hlavy. Všechny výše zmíněné pohyby je možné dále kombinovat právě s rozmítáním pomocí galvo skeneru a dalšími rotačními osami. [53]

V předchozím odstavci je popsáno, jakým způsobem probíhá ovládání skenovací rychlosti laserového paprsku. Z rychlosti skenování vycházejí další důležité technologické parametry, kterými lze ovlivnit výsledek laserového procesu. Tyto parametry ovlivňují princip skládání jednotlivých pulzů „přes sebe“, tzv. překryv. Překryv pulzů lze matematicky vyjádřit pomocí vztahu 17 a 18 a parametry k tomu potřebné jsou znázorněny na Obr. 15. [54]

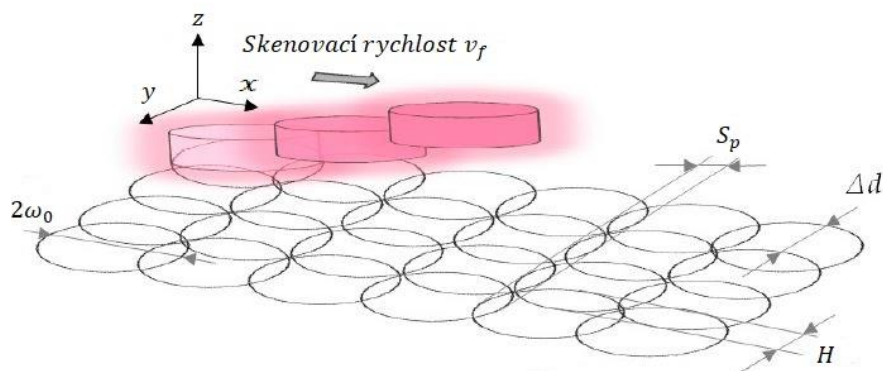
$$S_p = 1 - \frac{v}{2\omega_0 \cdot f_{rep}}$$

17

$$H = 1 - \frac{\Delta d}{2\omega_0}$$

18

; kde  $S_p$  je překryv v ose  $x$ , tedy ve směru skenování,  $H$  překryv v ose  $y$ ,  $v$  skenovací rychlost a  $\Delta d$  mezera mezi pulzy v ose  $y$  [54]

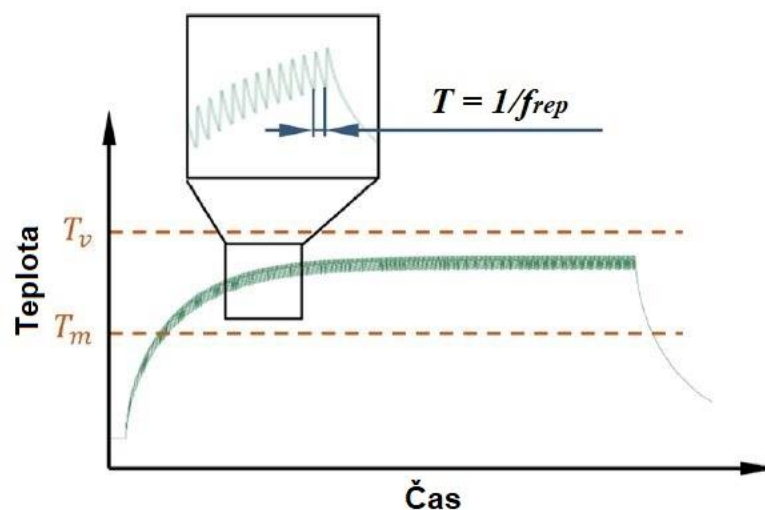


Obr. 15 – Schématické zobrazení parametrů překryvu (upraveno) [54]

### 3.5 Leštění ultra krátkopulzním laserem

O použití ultrakrátkopulzního laseru lze hovořit v případech, kdy se délka jednotlivých impulzů laserového zařízení pohybuje v rozmezí od jednotek pikosekund až po femtosekundy. Důvodem použití takto krátkých impulzů je velice vysoký špičkový výkon v jeho průběhu. Tento výkon může při použití femtosekundových laserů dosahovat až TW ( $10^{12}$  W). Vzhledem k obrovskému výkonu v kombinaci s ultra krátkou dobou interakce paprsku s materiálem dojde k ovlivnění materiálu při zanedbatelném tepelném zatížení okolních oblastí. [37], [55]

Doménou ultra krátkopulzních laserů je nízká tepelná zátěž materiálu. Tohoto faktu se v jisté míře využívá také při leštění. Převážně se studené ablace využívá při obrábění, kde absence tepelně ovlivněné zóny zvyšuje přesnost obrábění. Při leštění ultra krátkopulzními lasery je většinou malé tepelné ovlivnění naopak žádoucí. Využívá se zde jevu, který lze nazvat akumulace tepla. Při použití poměrně malé energie v pulzu, kdy nedojde k rychlé ablaci materiálu a energie se v materiálu zachová ve formě tepla. Za normálních okolností by bylo teplo zbytkem materiálu odvedeno po dobu periody laserového procesu. Při tepelné akumulaci se však využívá velice vysoké opakovací frekvence a teplo v malém objemu materiálu je zde akumulováno ještě před jeho disipací. Tento princip zahřívání je popsán na Obr. 16. [56], [57], [58]

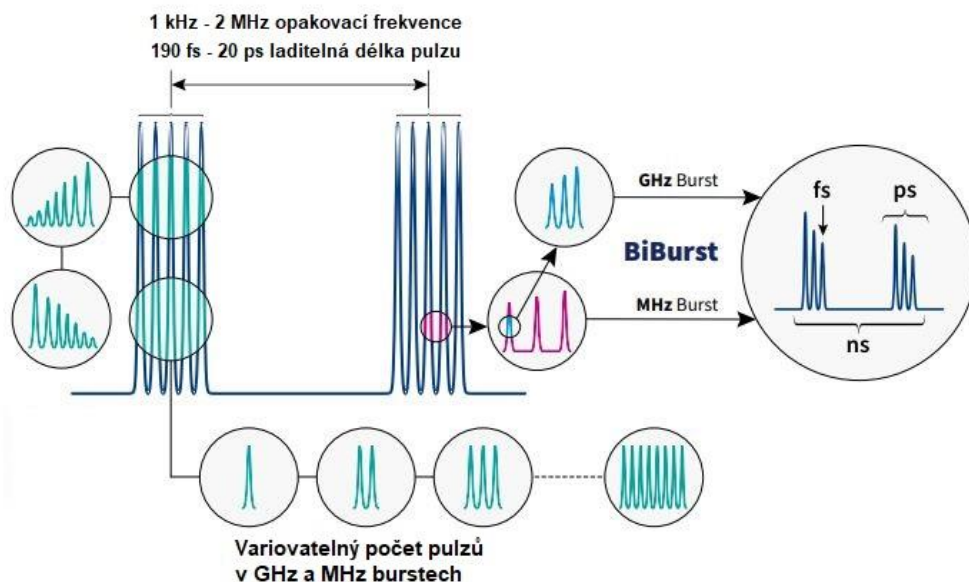


Obr. 16 – Schéma vývoje teploty na povrchu materiálu v čase při tepelné akumulaci [56]

Na Obr. 16 je uvedeno schéma vývoje teploty na povrchu materiálu v čase při tepelné akumulaci. Při tomto procesu je důležité udržet teplotu mezi teplotou tavení  $T_m$  a teplotou vaporizace  $T_v$ . V „přibližném“ výřezu je vidět důležitost vysoké opakovací frekvence. Při nižší frekvenci by teplota rychle periodicky klesala pod teplotu tavení, což by znehodnotilo výsledný proces. [56]

Leštění ultra krátkopulzními lasery technologií tepelné akumulace vyžaduje velmi vysokou opakovací frekvenci laserového zařízení. Toho lze dosáhnout dvojím způsobem. Prvním je samotná opakovací frekvence laseru a druhým způsobem je využití tzv. burst módu. [59]

Jedním z výrobců laserových zdrojů, které umožňují burst mód je firma Light Conversion. Na Obr. 17 je uvedeno jejich řešení burst a BiBurst módu.

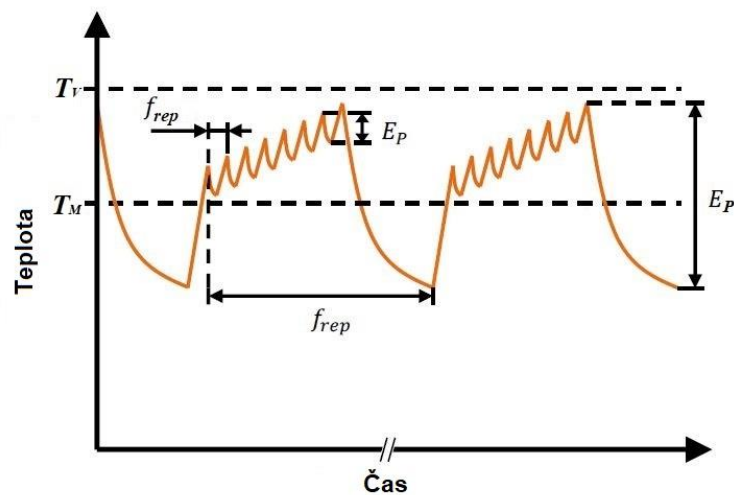


Obr. 17 – Možnost nastavení BiBurst módu od společnosti Light Conversion [60]

Na Obr. 17 je uvedeno schéma produkce burst a BiBurst módu. Burst mód je definován tím, že namísto jednoho laserového pulzu rozdělí jeho energii do několika pulzů. Tato sekvence pulzů je nazývána burst. Firma Light Conversion uvádí využití trojího způsobu burst módu, a to GHz, MHz a BiBurst mód. MHz burst mód rozděljuje laserové pulzy po periodách trvajících v řádech nanosekund. GHz burst mód rozděljuje pulzy do period čítající pouze několik pikosekund. Při kombinaci obou burst módů vznikne tzv. BiBurst mód, což je složení GHz a MHz burst módů a určitý počet pulzů

(Ize nastavit) s pikosekundovými periodami je vysílán jako tzv. „packet“ namísto jednoduchých pulzů v GHz burst módu. Z uvedeného popisu funkce burst módu je zřejmé, že výsledná opakovací frekvence laseru bude ovlivněna, respektive násobena počtem pulzů v obou typech burst módu. Zároveň musí dojít ke snížení energie v pulzu vlivem jejího rozdělení. [59], [60]

Pomocí burst módu je tedy také možné dosáhnout tepelné akumulace. Tepelná akumulace je v tomto případě jiného charakteru, než na Obr. 16. Vlivem burstů bude docházet k pulzování teploty mezi časy, kdy jsou pulzy produkovány a časy period mezi jednotlivými „packety“. Tento jev je vyobrazen na Obr. 18. [57]



Obr. 18 – Schéma vývoje teploty na povrchu materiálu v čase při technologii tepelné akumulace s využitím burst módu [57]

Pro porovnání výsledků jednotlivých vědeckých článků byly vybrány zdroje [56], [57] a [58], a to z důvodu shodného použitého materiálu a popisu vyhodnocovaných parametrů. Pro jejich experimenty byla použita nástrojová ocel pro práci za tepla 1.2738. Ve všech vybraných člancích, viz Tab. 1, byla drsnost povrchu popsána pomocí plošné drsnosti  $S_a$ , kterou se podařilo v každém z experimentů snížit. V Tab. 1 jsou uvedeny vždy nejlepší dosažené výsledky celého experimentu. V literatuře [56] a [57] bylo dosaženo přibližně 50% redukce drsnosti, zatímco v literatuře [58] byla



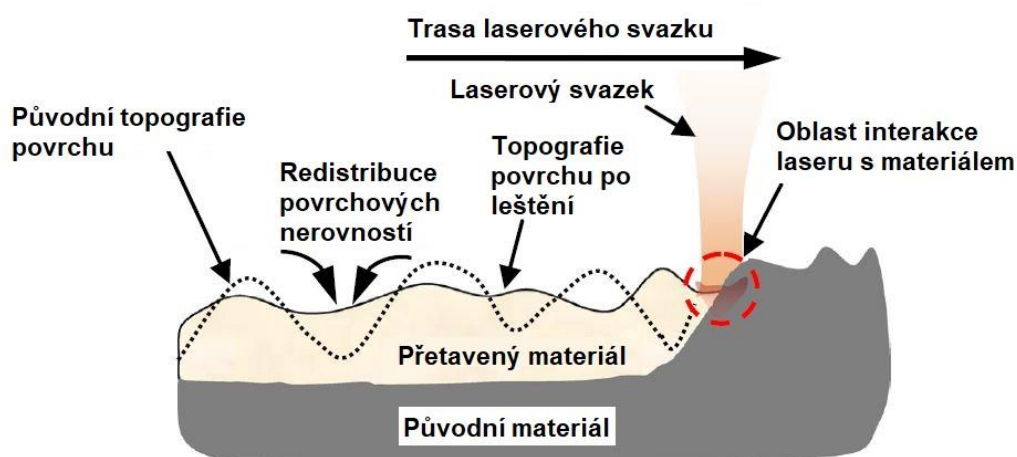
redukce nižší, zatímco absolutní hodnota drsnosti také. Tento jev mohl být důsledkem nižší vstupní drsnosti vzorků, než v literatuře [56] a [57].

Tab. 1 – Přehled dosažených výsledků leštění pomocí ultra krátkopulzních laserů [56], [57], [58]

Název článku	Leštěný materiál	Drsnost před leštěním Sa[ $\mu\text{m}$ ]	Drsnost po leštění Sa[ $\mu\text{m}$ ]
Ultrashort pulse laser micro polishing of steel - Investigation of the melt pool depth	1.2738	0,15	0,1
Laser polishing using ultrashort pulse laser	1.2738	0,41	0,21
Ultrashort pulse laser polishing by continuous surface melting	1.2738	0,6	0,29

### 3.6 Leštění nanosekundovým laserem

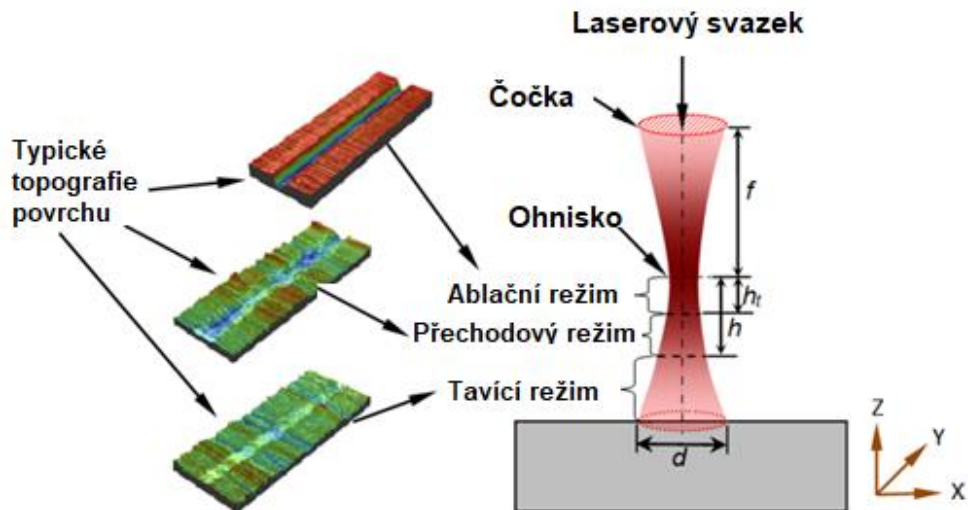
Leštění nanosekundovým laserem, tedy laserem s délkou pulzu od několika desítek až po stovky nanosekund, je realizováno přetavením povrchu materiálu. Natavené vrcholky nerovností vlivem tepelného účinku přejezdu laserového svazku zaplní prohlubně. Efekt přetavení a ztuhnutí má za následek snížení celkové drsnosti povrchu a vznik tepelně ovlivněné oblasti. Oproti leštění ultra krátkými pulzy je v tomto případě energie v jednom pulzu dostatečně vysoká na natavení povrchové vrstvy materiálu a tzv. tepelná akumulace zde není nutná. Grafický popis technologie leštění nanosekundovými pulzy metodou přetavování je viditelný na Obr. 19. [61], [62]



Obr. 19 – Schématické zobrazení technologie přetavování povrchu [62]

Výsledek leštícího procesu je silně závislý na třech hlavních proměnných. Jedná se o leštěný materiál viz kapitola 3.4 c), kvalitu vstupního povrchu a převážně hustotu energie, kterou dodává laserový svazek (fluence) viz kapitola 3.4 b). Fluence je silně spojena s průměrem svazku, který je závislý na odchylce od fokusační vzdálenosti. Právě odchýlení od fokusační vzdálenosti je velice často využíváno při laserovém leštění nanosekundovými pulzy. Variací tohoto parametru lze měnit průměr svazku dopadajícího na materiál, a tedy i hustotu a rozložení energie. Na základě fluence lze rozdělit efekt laseru do tří skupin. Jednou z možností je, že fluence je natolik vysoká, že dochází k ablaci materiálu. Tato oblast fluence není pro leštění žádoucí a je třeba se jí vyhnout. Po fázi ablace lze popsat přechodnou fázi, která rozděluje fázi ablace a tavení. Fáze tavení je již pro leštění vhodná. Tavicí efekt nastává při vyšších odchylkách od fokusační vzdálenosti, tedy i pro větší průměry svazku a nižší fluence. [30], [62], [63], [64]

Na Obr. 20 je uvedena vizualizace tří režimů laserového působení, které mohou vznikat při změně odchylky od fokusační vzdálenosti. V levé části obrázku jsou viditelné také tři skeny znázorňující toho rozdělení. Ablací režim vyobrazen nahoře vykazuje úběr materiálu v průběhu skenovací dráhy. Přechodový režim, během kterého dochází k nehomogennímu, a tudíž také k nepředvídatelnému úběru materiálu je uveden uprostřed. Tento režim není vhodný ani pro obrábění materiálu, ani pro jeho leštění. Je třeba se mu během navrhování technologií vyhnout. A poslední režim, který je uveden v dolní části obrázku je režim tavící. Tavicí režim je charakteristický redistribucí materiálu a je tedy vhodný pro laserové leštění. [65]



Obr. 20 – Schématická reprezentace režimů působení laserového svazku v závislosti na odchylky od fokusační vzdálenosti [65]

V Tab. 2 jsou uvedeny příklady leštění pomocí nanosekundových pulzů, které byly nalezeny v odborných člancích. Každá z publikací zde má uvedené nejlepší dosažené výsledky. Cílem Tab. 2 je získání přehledu dosažitelných hodnot parametrů drsnosti metodou nanosekundového leštění. Vzhledem k velkému počtu proměnných, které lze v průběhu procesu měnit nelze říci, že parametry jednotlivých leštících technologií byly v těchto případech stejné. V experimentech v literatuře [66] a [67] byla nastavena nulová odchylka od fokusační vzdálenosti laseru, zatímco články [63] a [64] experimentují včetně změny tohoto parametru. Všechny uvedené články experimentovali s různým nastavením ochranných atmosfér ve formě argonu, aby bylo zamezeno oxidaci povrchu po laserovém leštění. Rozdílné výsledky jsou vyvolány rozdíly v leštěných materiálech a vstupních hodnotách drsnosti. Ve všech vybraných člancích nebylo uvedeno stejné měření parametrů drsnosti, z tohoto důvodu jsou v Tab. 2 uvedeny hodnoty drsností následujícím způsobem.

Tab. 2 – Přehled dosažených výsledků pomocí nanosekundových laserů [63], [64], [66], [67]

Název článku	Leštěný materiál	Drsnost před leštěním Ra[ $\mu\text{m}$ ] / Sa[ $\mu\text{m}$ ]	Drsnost po leštění Ra[ $\mu\text{m}$ ] / Sa[ $\mu\text{m}$ ]
Modelling of process parameters in laser polishing of steel components using endsembles of regression trees [64]	Orvar supreme nástrojová ocel pro práci za tepla	3,66 / -	0,547 / -
Modelling of process parameters in laser polishing of steel components using endsembles of regression trees [64]	LaserForm TM ST-100 ocel pro 3D tisk metodou SLS	6,78 / -	0,82 / -
Influence of overlap between the laser beam tracks on surface quality in laser polishing of AISI H13 tool steel [66]	AISI H13 nástrojová ocel	- / 1,35	- / 0,23
Experimental study on the effect of varying focal offset distance on laser micropolished surface [63]	AISI H13 nástrojová ocel	0,69 / -	0,26 / -
Influence of overlap on surface quality in the laser polishing of 3D printed inconel 718 under the effect of air and argon [67]	Inconel 718	- / 5,78	- / 0,7

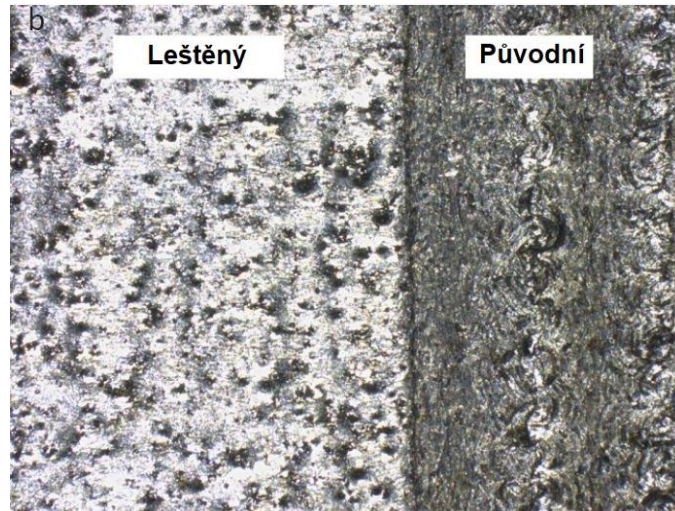
### 3.7 Shrnutí teoretické části

V teoretické části práce byly vysvětleny veškeré parametry laserového záření ovlivňující laserový proces, díky kterým byl následně navržen experiment leštění. Z použité literatury vyplývá, že laserové leštění nejvíce ovlivňují tyto parametry:

- Výkon laseru
- Rychlost skenování
- Odchylka od fokusační vzdálenosti
- Opakovací frekvence

Právě optimalizaci těchto parametrů je věnováno v experimentální části práce nejvíce prostoru.

Z prostudované literatury také vyplývá, že leštění litiny s kuličkovým grafitem je téměř neřešené téma výzkumné činnosti. Z nalezené literatury se přímo tématu laserového leštění litiny s kuličkovým grafitem věnuje pouze literatura [68], ve které bylo dosaženo až 88% redukce drsnosti reprezentované parametrem  $R_a$ . V tomto případě byla drsnost změněna z původních  $4,35 \mu\text{m}$  na  $0,51 \mu\text{m}$ . Mechanismem leštění bylo v tomto případě přetavování povrchu. Fotografie tohoto povrchu je na Obr. 21.



Obr. 21 – Srovnání laserem leštěného povrchu (vlevo) a původního povrchu (vpravo) litiny s kuličkovým grafitem [68]

## **4 Experimentální část**

### **4.1 Cíl experimentální části**

Cílem experimentální části této práce je komplexní analýza problematiky laserového leštění a vyleštění vzorků frézovaného povrchu formy z litiny s kuličkovým grafitem do zrcadlového lesku bez nežádoucí změny povrchu vlivem oxidace. Výstup experimentální části práce zahrnuje také vstupní analýzu povrchu vzorků určených pro laserové leštění, na kterou chronologicky navazuje návrh a provedení jednotlivých částí experimentu potřebných pro kompletní popis problematiky. Konkrétně se jedná o experimenty zabývající se vlivem jednotlivých parametrů nastavení laserového procesu pro opakovatelné a přesné laserové leštění a v neposlední řadě eliminaci degradace povrchu vlivem oxidace po procesu leštění. Výstupem experimentální práce je návrh vhodného přístupu k laserovému leštění včetně definování parametrů vedoucích k optimálně vyleštěnému povrchu, který je ručně leštěný a je blíže popsán v kapitole 4.2. Součástí výsledku bude i metalografická analýza s měřením tvrdosti pro popsání materiálových změn, ke kterým vlivem laserového procesu v materiálu dochází.

### **4.2 Vstupní analýza vzorků**

Materiálem vzorků je litina s kuličkovým grafitem EN – GJS 2070, která se běžně využívá pro konstrukce lisovacích nástrojů kvůli jejím mechanickým vlastnostem. [69]

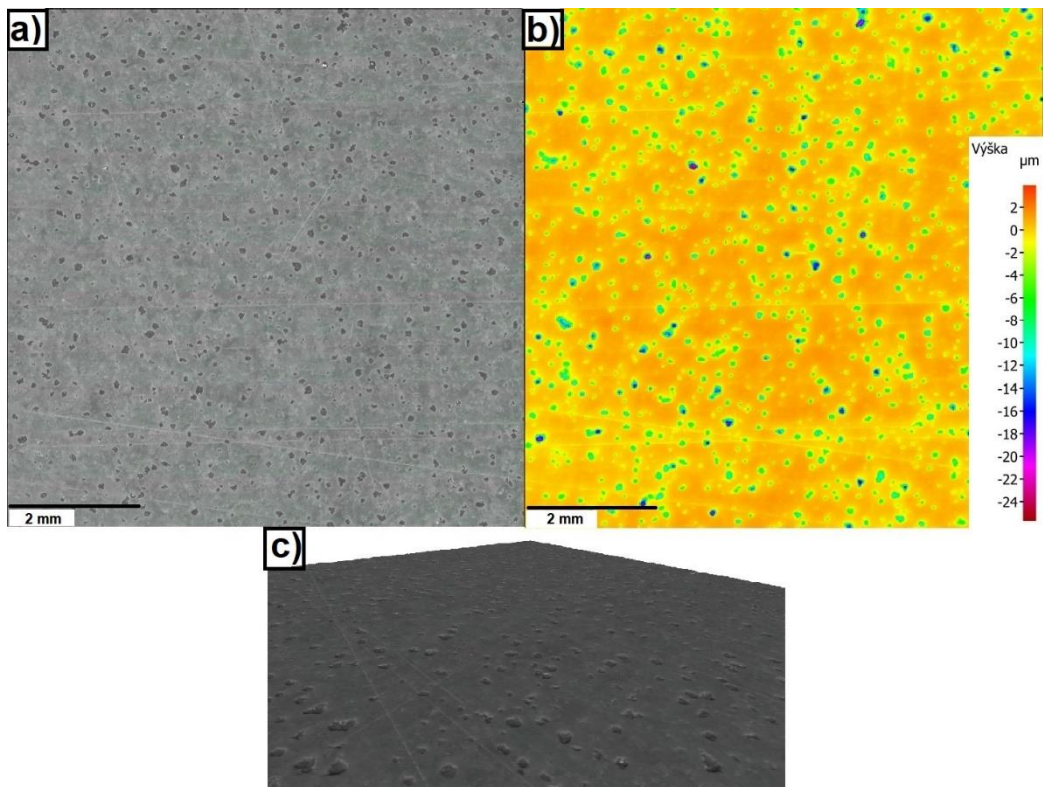
Pro experimentální část práce bylo k dispozici celkem šest vzorků materiálu viz Obr. 22. Vzorky jsou v celé práci značeny 1A, 1B, 2A, 2B, 3A a 3B. Pět vzorků, konkrétně vzorky 1B, 2A, 2B, 3A a 3B jsou přímo určené pro testy technologie laserového leštění. Tyto vzorky byly obráběny kulovou frézou s průměrem 16 mm.



*Obr. 22 – Ilustrační fotografie poskytnutých vzorků pro laserové leštění*

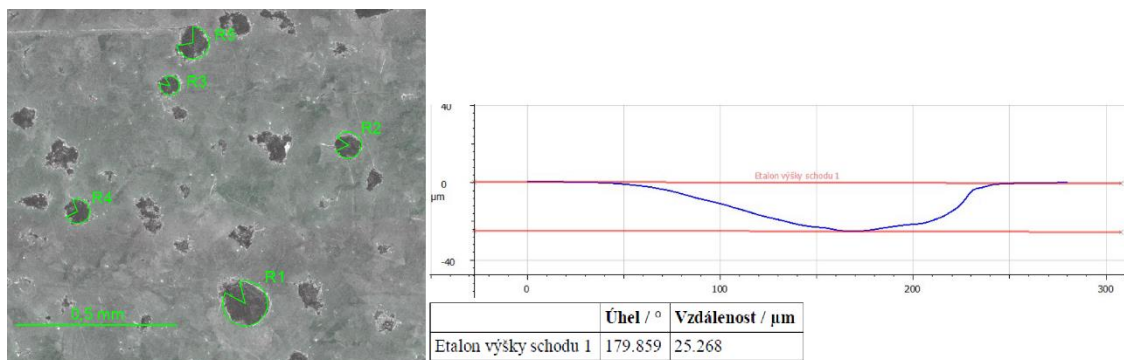
Vzorek 1A slouží jako referenční (Obr. 22 vpravo). Vlastnosti povrchu referenčního vzorku 1A, jako drsnost povrchu a jeho lesk, jsou etalonem pro experimentální část práce a je žádoucí se k těmto hodnotám přiblížit. Referenční vzorek byl zhotoven ručním leštěním. Na Obr. 22 vlevo je umístěn vzorek 3B, který patří mezi vzorky určené pro zpracování.

U vzorků pro účely laserového leštění a u vzorku definující referenční drsnost po vyleštění byla provedena vstupní analýza. Mimo optické vlastnosti, které jsou patrné z Obr. 22 byla na referenčním vzorku 1A provedena analýza povrchu pomocí mikroskopu a byly změřeny parametry drsnosti povrchu. Na Obr. 23 je uveden detail povrchu vzorku 1A po ručním leštění.



Obr. 23 – a) 2D sken, b) výšková mapa, c) 3D sken učně leštěného referenčního povrchu materiálu  
EN – GJS 2070

Na Obr. 23 jsou uvedeny tři skeny povrchu. Jedná se o 2D sken Obr. 23a), výškovou mapu Obr. 23b) a 3D sken pro vizualizaci prostorového uspořádání Obr. 23c). Na snímcích jsou viditelné malé důlky, které jsou patrně tvořeny vytrženým kuličkovým grafitem vlivem předchozího zpracování. U těchto důlků byla provedena analýza rozměrů, za účelem porovnání výsledků ručního a laserového leštění na jejich vývoj. Příklad měření důlků je uveden na Obr. 24, kde vlevo je pět měření průměru důlků a vpravo měření hloubky. V tomto konkrétním příkladě lze vidět měření hloubky důlku R1 viz Obr. 24 vlevo.



Obr. 24 – Měření důlků na ručně leštěném povrchu



V Tab. 3 jsou uvedeny veškeré průměry a hloubky důlků, které byly naměřeny z důvodu statistického popisu jejich rozměrových charakteristik.

Tab. 3 – Naměřené hodnoty průměrů a hloubek důlků po kuličkovém grafitu

Označení důlku	Průměr důlku [ $\mu\text{m}$ ]	Hloubka důlku [ $\mu\text{m}$ ]
1	141,17	25,268
2	82,998	9,963
3	59,844	8,113
4	77,428	9,729
5	101,4	13,261
6	56,867	8,207
7	78,725	13,256
8	141,417	16,904
9	45,507	3,963
10	66,469	11,157
11	84,014	8,91
12	94,398	8,101
13	89,269	13,346
14	65,771	13,992
15	129,297	16,768
16	17,543	4,416
17	92,632	10,426
18	31,505	3,441
19	105,004	9,989
20	89,173	11,649

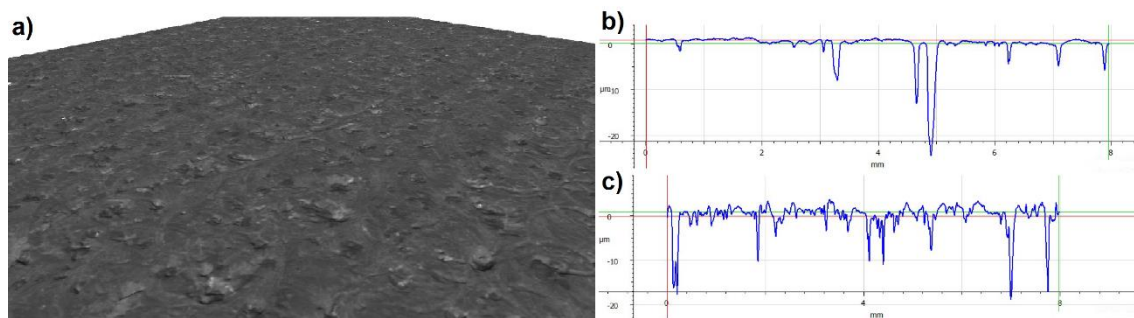
Celkem bylo měření provedeno na dvaceti důlcích, z nichž největší měl průměr 141,42  $\mu\text{m}$  a nejmenší 17,54  $\mu\text{m}$ . Lze říci, že mezi průměry a hloubkami platí lineární závislost a největší hloubka důlku byla změřena na 25,27 $\mu\text{m}$ , zatímco nejmenší na 3,44  $\mu\text{m}$ . Velikostní rozložení důlků v povrchu se zdá rovnoměrné.

Dalším krokem při analýze referenčního povrchu bylo měření parametrů drsnosti povrchu  $R_a$ ,  $S_a$ ,  $S_z$ . V Tab. 4 jsou uvedeny výsledky těchto měření. Měření každé veličiny bylo provedeno pětkrát a ze statistických údajů byla vyhodnocena výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru. Z důvodu neuniformnosti povrchu vykazují hodnoty  $R_a$  řádově vyšší směrodatné odchylky než hodnoty parametru  $S_a$ .

Tab. 4 – Vyhodnocení parametrů drsnosti dodaných vzorků materiálu EN – GJS 2070

Označení vzorku	Drsnost povrchu $S_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Výška nerovností $S_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Drsnost povrchu $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
1A (ručně leštěno)	$0,85 \pm 0,05$	$25,88 \pm 3,51$	$0,70 \pm 0,19$
1B (frézováno)	$1,88 \pm 0,04$	$59,38 \pm 13,05$	$1,50 \pm 0,16$
2A (frézováno)	$1,88 \pm 0,06$	$53,12 \pm 7,39$	$1,63 \pm 0,19$
2B (frézováno)	$1,97 \pm 0,08$	$73,51 \pm 23,96$	$1,71 \pm 0,28$
3A (frézováno)	$1,99 \pm 0,07$	$90,56 \pm 76,52$	$1,73 \pm 0,23$
3B (frézováno)	$2,03 \pm 0,07$	$134,04 \pm 66,51$	$1,69 \pm 0,25$

Referenční plošná drsnost povrchu  $S_a$  ručně leštěného vzorku byla stanovena na  $0,85 \pm 0,05 \mu\text{m}$ . Drsnost obráběných ploch se pohybuje v úzkém rozmezí od  $1,88 \pm 0,04 \mu\text{m}$  do  $2,03 \pm 0,07 \mu\text{m}$ . Cílem leštícího procesu je tedy redukce plošné drsnosti povrchu, reprezentované převážně parametrem  $S_a$  a přiblížení tohoto parametru ručně leštěnému vzorku. Na Obr. 25a) je uveden povrch vzorku 2A před laserovým leštěním. Na Obr. 25b) je uveden profil ručně leštěného vzorku a Obr. 25c) profil vzorku frézovaného.

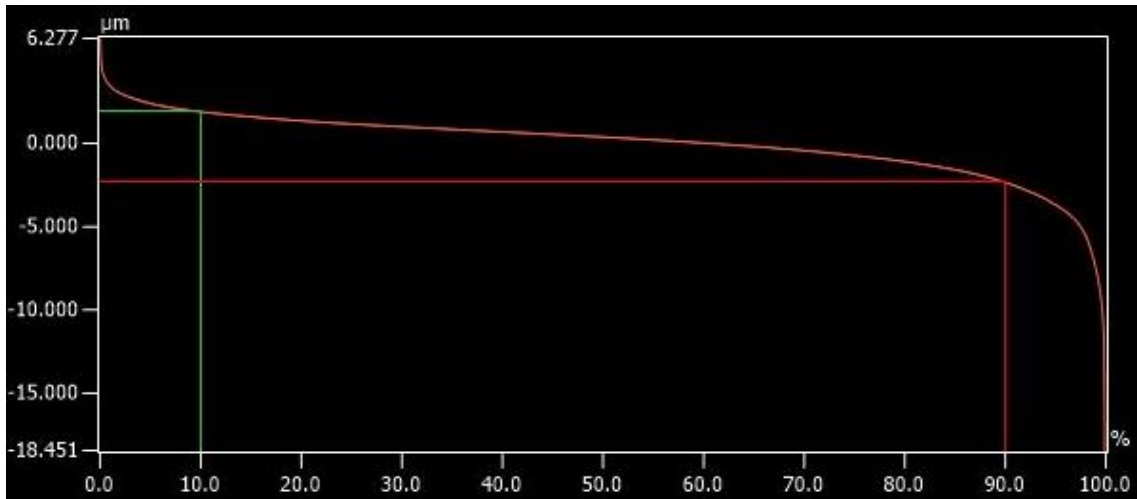


Obr. 25 – Porovnání profilu ručně leštěného vzorku (b) a frézovaného vzorku (c), vizualizace obráběného povrchu k vyleštění (a)

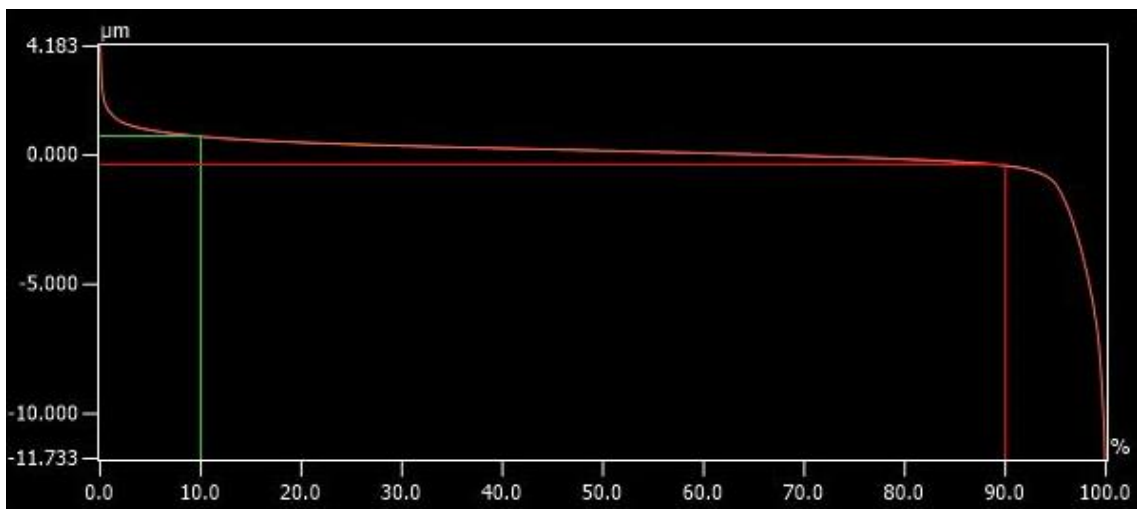
Mimo parametrů drsnosti uvedených výše byla na vzorcích také měřena hodnota  $S_{xp}$ , která vyplývá z Abbottových-Firestonových křivek materiálového podílu. Tato hodnota vypovídá o výšce, na které se vyskytuje 80 % objemu materiálu. Abbottovy křivky pro frézovaný povrch a ručně leštěný referenční povrch jsou uvedeny na Obr. 26 a Obr. 27 a hodnoty parametru  $S_{xp}$  jsou uvedeny v Tab. 5. Z tvaru křivek a hodnot parametru  $S_{xp}$  je vidět znatelný rozdíl výšky, na které se vyskytuje zmíněných 80 % materiálu.

Tab. 5 – Výsledky měření referenčních hodnot  $S_{xp}$

Vzorek	$S_{xp}$ [ $\mu\text{m}$ ]
Frézovaný	4,222
Ručně leštěný	1,123



Obr. 26 – Abbottova-Firestonova křivka z měření neleštěného frézovaného povrchu



Obr. 27 – Abbottova-Firestonova křivka z měření referenčního ručně leštěného vzorku

### 4.3 Použité experimentální a měřicí zařízení

Pro celkové provedení a měření všech experimentů byly použity následující přístroje viz kapitoly 4.3.1 až 4.3.3.

### 4.3.1 Laserová stanice

Pro realizaci veškerých laserových operací byla použita laserová stanice Master 1 viz Obr. 28.



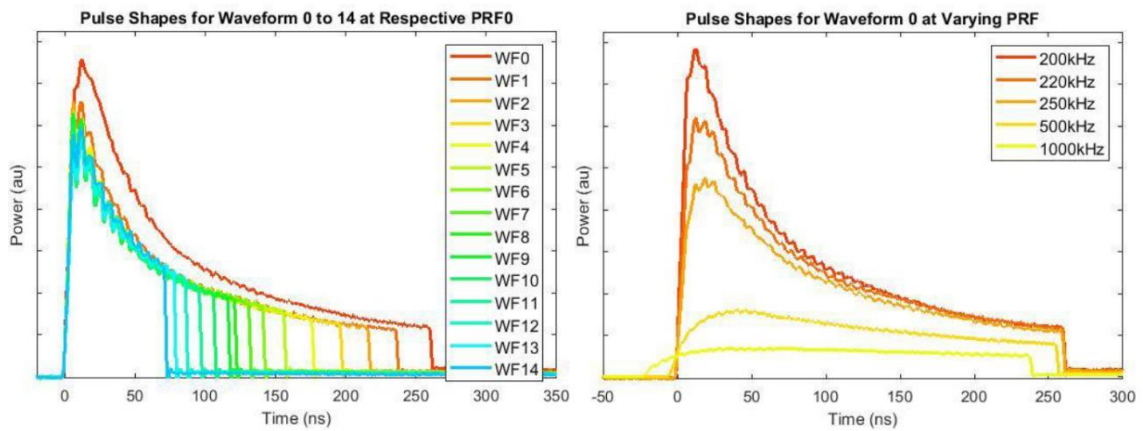
Obr. 28 – Laserová stanice Master 1

Stanice spojuje dva různé laserové zdroje, a to femtosekundový zdroj Carbide od společnosti Light Conversion a nanosekundový zdroj od firmy SPI Lasers. Pro experimentální část této práce byla zvolena strategie leštění pomocí nanosekundových pulzů, a tedy zdroj laseru od firmy SPI Lasers. Paprsek je do procesu veden optickým vláknem a přes kolimátor do skenovací hlavy. Následně je paprsek fokusován pomocí F-théta čočky do pracovní roviny, kde byl aktuální výkon laseru měřen zařízením pro měření výkonu.

Pohyb laserového svazku lze realizovat dvěma způsoby. Prvním z nich je polohováním stolku pod optickou cestou. Druhý způsob využívá rozmítání paprsku pomocí galvo skeneru, který byl pro tuto práci využit.

Pro experimenty byl používán nanosekundový laser s délkou pulzu 265 ns, opakovací frekvencí 200 kHz a vlnovou délkou 1064 nm. Laserový svazek má Gaussovo rozložení energie v závislosti na vzdálenosti od osy svazku. Použitý laserový zdroj je možné variovat také z hlediska průběhu energie v čase po dobu trvání laserového pulzu. Tato variabilita je

reprezentována tzv. waveformami (WF). Pro realizaci experimentů byla vybrána waveforma s označením 0 viz Obr. 29, právě s výše zmíněnou opakovací frekvencí 200 kHz.



Obr. 29 – Specifikace nastavitelných waveforem a závislost energie v pulzu na opakovací frekvenci pro WF0 [70]

#### 4.3.2 Optický 3D mikroskop

Optický mikroskop Alicona Infinite Focus G5 byl v této práci používán pro zobrazování detailů a měření drsnostních parametrů vzorků. Ilustrativní fotografie tohoto optického mikroskopu je zobrazena na Obr. 30.



Obr. 30 – Optický mikroskop Alicona Infinite Focus G5 [71]

#### 4.3.3 Konfokální mikroskop

Druhým použitým mikroskopem byl konfokální mikroskop Keyence VK X-1000 viz Obr. 31. Tento konfokální mikroskop byl používán především pro pozorování morfologie povrchu a k analýze struktur na jeho povrchu.

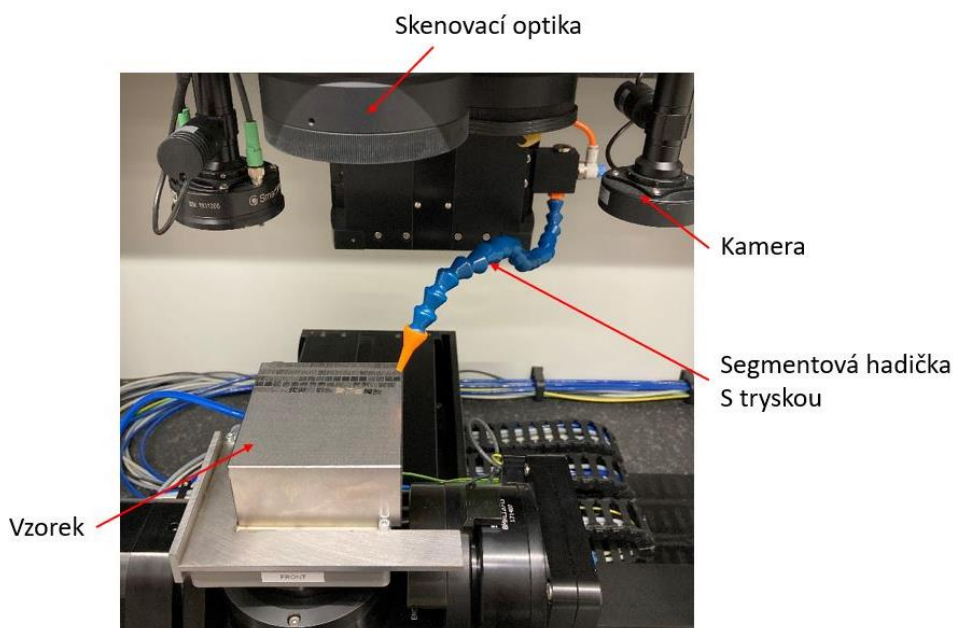


Obr. 31 – Konfokální mikroskop Keyence VK X-1000 [72]

#### **4.4 Možnosti aplikace ochranné atmosféry**

Při prvotních experimentech, které měly za cíl orientační zjištění vhodné odchylky od fokusační vzdálenosti, docházelo k silné oxidaci povrchu. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k používání inertní ochranné atmosféry ve formě argonu. Konkrétně byl použit argon 5.0 s čistotou vyšší, než 99,999 %. [73]

Pro aplikaci ochranné atmosféry byly použity dva postupy. První možností byl přívod plynu přímo do procesu. Tento způsob byl realizován tryskou namířenou pod úhlem na zpracovávaný povrch viz Obr. 32. Tryska je namířena pod úhlem co nejvíce se blížícím 90° vůči vzorku tak, aby nebyla v optické cestě laserového svazku. Varianta ochranné atmosféry ve formě ofuku tryskou je velice náchylná na chybu ručního polohování trysky a pracovní prostor je značně omezen. Z tohoto důvodu byl navržen druhý způsob ochrany povrchu.



Obr. 32 – Aplikace argonové ochranné atmosféry tryskou

Druhým způsobem ochrany proti oxidaci bylo použití ochranné komory, která byla pro tento účel navržena a vytištěna na plastové 3D tiskárně. Realizace procesu v komoře byla zajištěna krycím sklem, které nemění vlastnosti laserového svazku při jeho průchodu. Komora byla napojena na trysku, která kontinuálně dodává inertní atmosféru. Oproti přímému ofuku vzorku byla při použití komory teoreticky zajištěna vyšší stálost atmosféry nad upravovaným povrchem. Návrh komory pro 3D tisk byl proveden softwarem Autodesk Inventor a Ultimaker Cura. Samotná komora byla rozdělena na dvě části, které jsou od sebe oddělitelné a jejich polohu zajišťují čtyři čepy. V horní části je otvor na zasunutí krycího skla, které brání výraznému úniku argonu otevřenou částí komory.

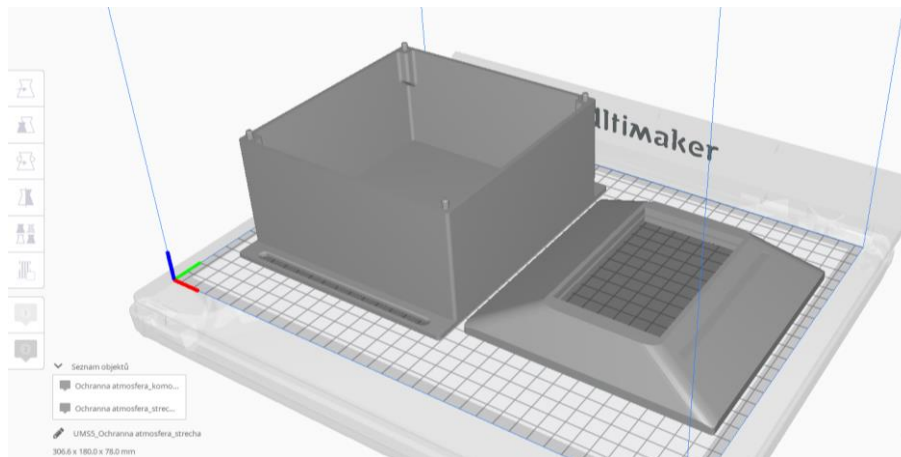
Oba způsoby byly podrobeny experimentálním zkouškám kvality ochrany povrchu proti oxidickým vrstvám. Dle teoretického předpokladu vykazovala ochranná atmosféra v uzavřené komoře lepší výsledky než přímý přívod argonu do laserového procesu. Nepřesné polohování trysky pro přívod argonu a nekonzistentní ochrana způsobila částečnou oxidaci povrchu oproti argonové komoře, ve které byl vzorek chráněn na celém povrchu. Srovnání obou variant ochrany vzorků lze vidět na Obr. 33, kde jsou jasně patrné černé skvrny na vzorku ošetřovaného pouze tryskou. Vzorek

umístěný v komplexnější ochranné komoře vykazuje nižší úroveň oxidace povrchu a vyšší lesk.



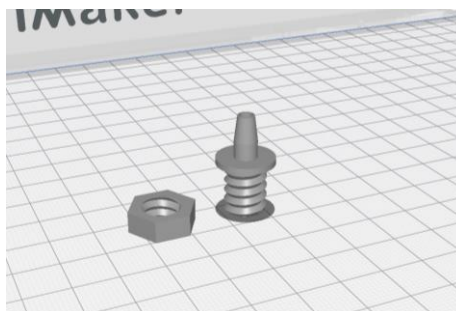
Obr. 33 – Srovnání použití ochranné atmosféry formou ofuku (vlevo) a formou argonové komory (vpravo)

Na Obr. 34 jsou vidět dvě části ochranné komory v programu Ultimaker Cura před 3D tiskem. Jejich velikost byla navržena, aby umožňovala umístění vzorků o velikosti 100x100x50 mm.



Obr. 34 – Rozložení dvou dílů ochranné argonové komory na tiskové podložce ve sliceru Ultimaker Cura

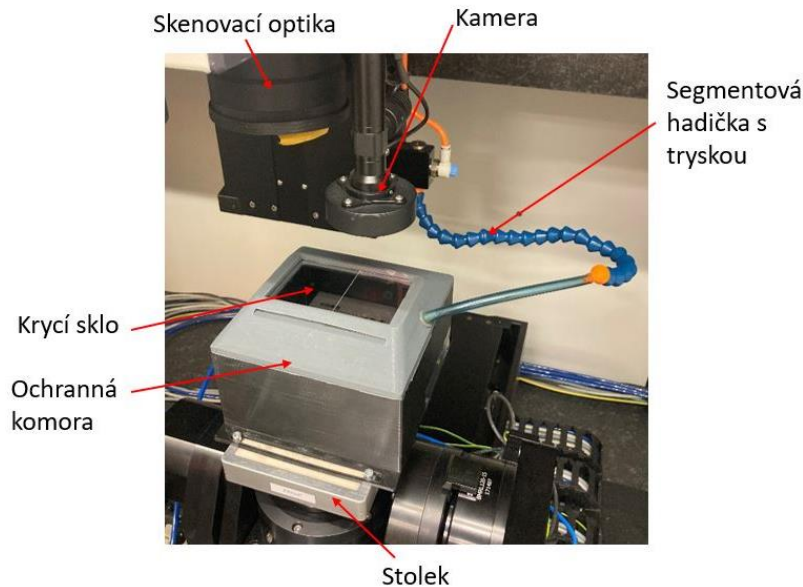
Na Obr. 35 je vidět model šroubu s osovou dírou. Šroub zajistí pevné a těsné spojení mezi hadičkou dopravující ochrannou atmosféru a zároveň díky osově díře její jednoduchou dopravu do komory přímo nad vzorek.



Obr. 35 – Šroub s osovou dírou pro napojení ochranné atmosféry do 3D tištěné komory



Na Obr. 36 je již komora vytištěna a nainstalována v laserové stanici. Do horního dílu jsou vložena krycí skla a vyvrtán otvor pro šroub s osovou dírou. Namísto vzduchu je v laserové stanici zaveden argon s čistotou 99,999 %. Do komory je plyn přiveden pomocí segmentové hadičky viz Obr. 36.



Obr. 36 – Instalace komory pro ochrannou atmosféru do laserové stanice Master 1

Prvním testem provedeným v ochranné komoře, byla ověřena propustnost krycího skla pro laserové záření použité vlnové délky 1064 nm. Pro tento test bylo vytvořeno několik obrazců na povrchu materiálu bez krycího skla a bez změny programu či zaostření poté také skrz krycí sklo. Tyto obrazce nevykazovaly změny v umístění, velikosti, ani v jiných pozorovatelných aspektech.

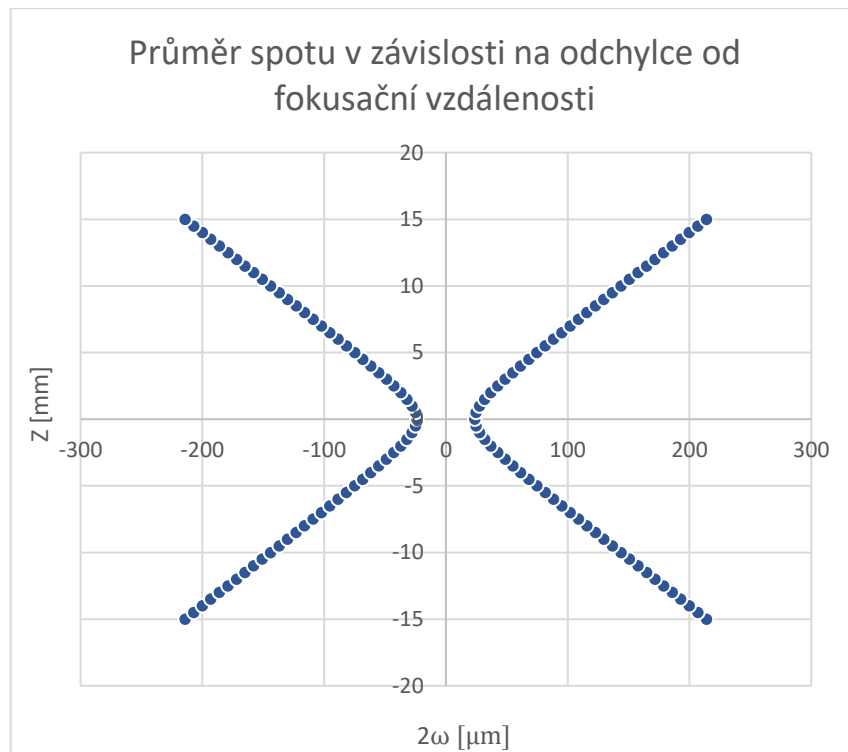
## 4.5 Pre-experiment

Z důvodu velkého množství variováných parametrů, které zasahují a ovlivňují proces laserového leštění, nebylo při pre-experimentu přikročeno k plně faktoriálnímu experimentu. Vzorky byly tvořeny iteračním postupem tak, že následující vzorek byl tvořen upravenými parametry vzorků předcházejících.

### 4.5.1 Návrh pre-experimentu

Pro volbu optimální odchylky od fokusační vzdálenosti byly vypočteny teoretické hodnoty průměru svazku v závislosti na velikosti odchylky. Dle těchto hodnot jsou dále vypočteny použité překryvy laserového svazku

a fluence, která udává množství energie dodané na plochu spotu. Výsledky průměrů spotu jsou uvedeny v grafu na Obr. 37, pro jejich získání byla použita rovnice 15. Teoretickým výpočtem byla stanovena hodnota poloměru svazku v ohnisku  $\omega_0 = 23,79 \mu m$ . Od této hodnoty se dále průměr zvětšuje dle hyperbolické závislosti viz Obr. 37, až po odchylku od fokusační vzdálenosti  $Z = \pm 15 mm$ .

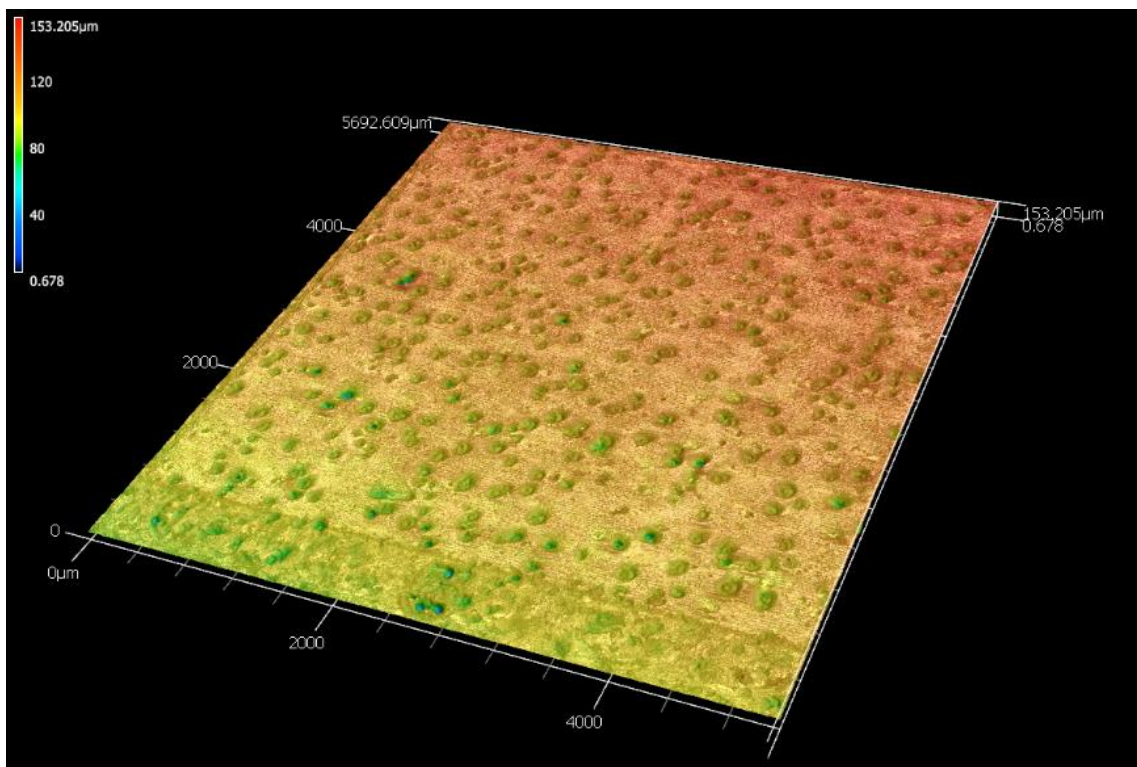


Obr. 37 – Závislost průměru laserového spotu na velikosti odchylky od fokusační vzdálenosti

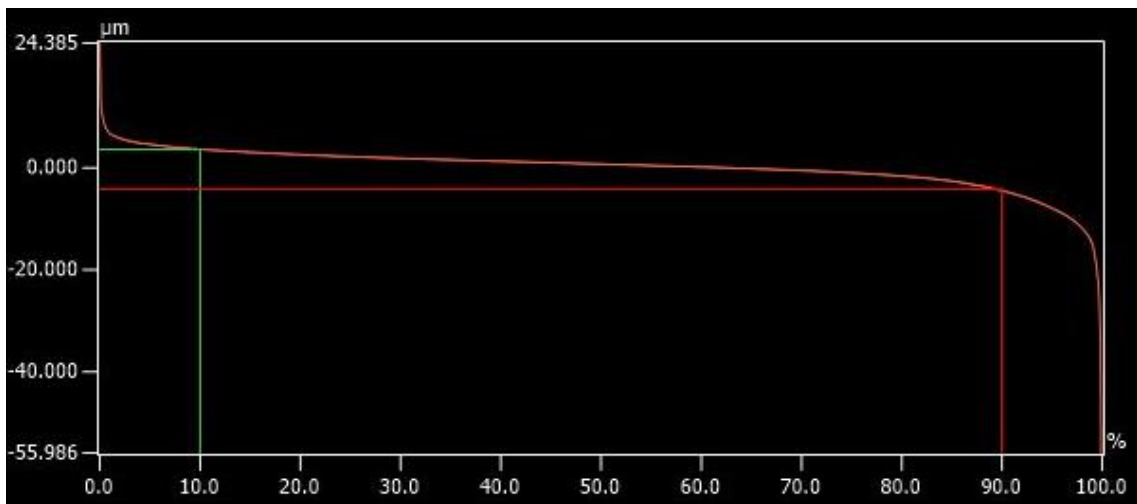
Pro laserové leštění delšími nanosekundovými pulzy viz kapitola 3.6 je podstatné správné zvolení parametrů tak, aby docházelo k tavení materiálu. Leštění tavícím způsobem bylo zvoleno s ohledem na morfologii a stav povrchu po předchozím obrábění, kde na povrchu vznikly struktury, které jiným způsobem nelze eliminovat. V prvních krocích experimentů laserového leštění bylo cílem stanovit některé parametry procesu, jako výkon, rychlost a odchylku od fokusační vzdálenosti tak, aby při procesu docházelo k natavení povrchové vrstvy materiálu.

#### 4.5.2 Provedení a vyhodnocení pre-experimentu

V této kapitole je naznačen logický postup optimalizace laserových parametrů. Pro prezentaci tohoto postupu bylo vybráno a uvedeno několik vzorků (konkrétně vzorky č. 5, 25, 54 a 73), které přinesly významnější posun k lepším výsledkům. Hlavním sledovaným parametrem v průběhu pre-experimentu byl fakt, zda použité laserové parametry dostatečně taví povrch materiálu, ale zároveň nedochází k úběru materiálu. Pro tento účel bylo vytvořeno celkem 98 vzorků. První z těchto vzorků s označením 5 je na Obr. 38 a jemu odpovídající křivku materiálového podílu na Obr. 39.



Obr. 38 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku č. 5



Obr. 39 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku č. 5

V Tab. 6 jsou uvedeny parametry, kterými byl vytvořen povrch vzorku č. 5 a v následující Tab. 7 jsou uvedeny výsledky parametrů drsnosti měřených na tomto vzorku.

Tab. 6 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek č. 5

Vzorek č.	Výkon [W]	Odchylka od fokusační vzdálenosti [mm]	Rychlost skenování [mm/s]
5	40	2,5	200

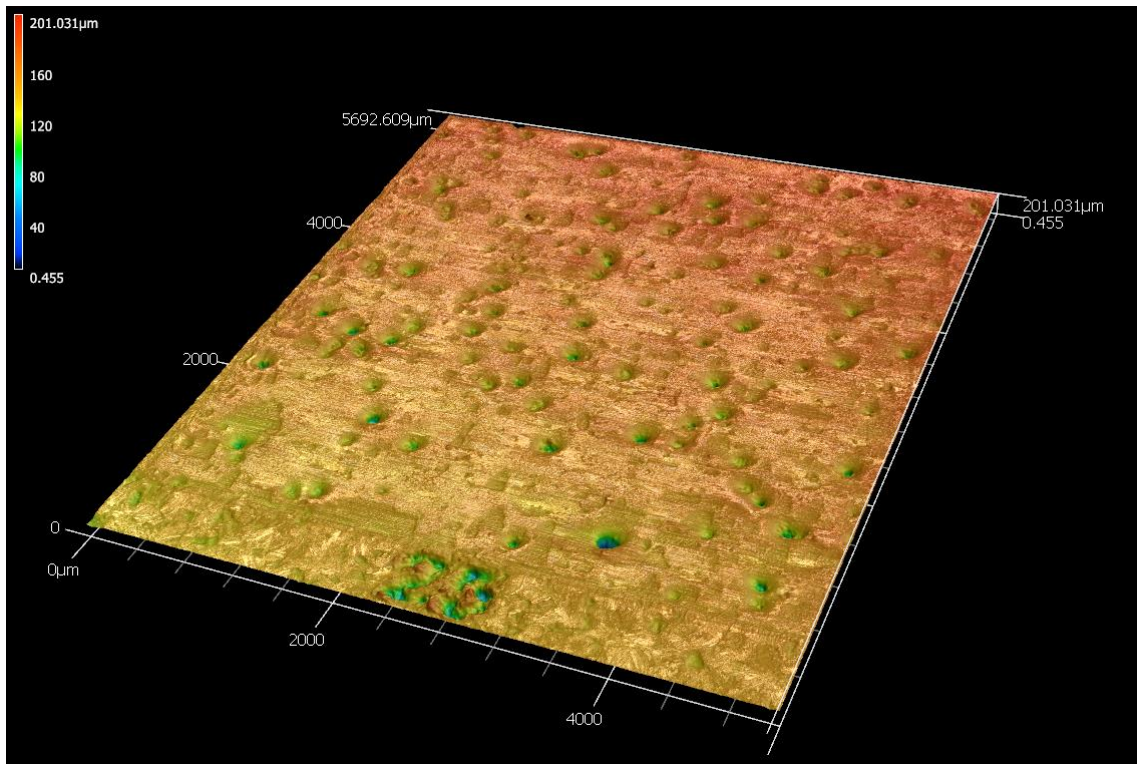
Tab. 7 – Výsledky měření drsnosti vzorku č. 5

č. měření	Ra [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sxp [μm]
1	1,365	2,854	80,370	
2	1,213	2,441	52,565	
3	1,496	2,697	77,087	
4	0,978	2,299	52,953	
5	1,368	2,629	55,916	
Průměr	1,284	2,584	63,778	8,065
Odchylka	0,177	0,195	12,306	

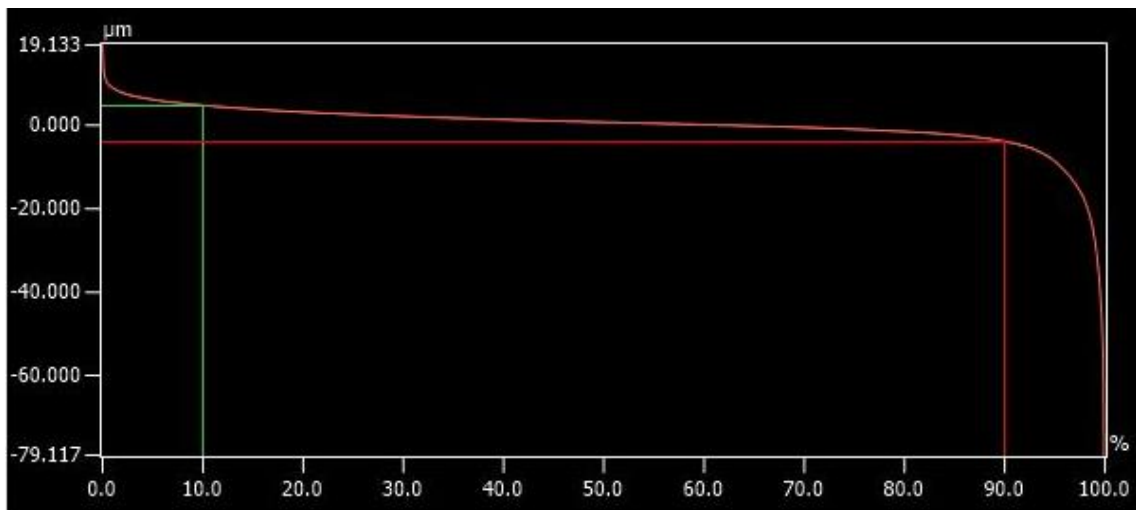
Na vzorku č. 5 došlo po laserovém procesu k odhalení velkého množství důlků po kuličkovém grafitu. Nedošlo k natavení povrchové vrstvy materiálu z důvodu nízkého použitého výkonu v kombinaci s vysokou rychlostí skenování. Z důvodu odkrytí důlků byla také navýšena drsnost povrchu oproti referenčním hodnotám a 80 % materiálu je rozloženo ve

výškovém rozdílu 8,065  $\mu\text{m}$ . Došlo k mírnému navýšení lesku povrchu oproti obroběnému referenčnímu povrchu.

Vzorek č. 25 viz Obr. 40 a jemu odpovídající křivka materiálového podílu na Obr. 41 je upraven parametry uvedenými v Tab.8. Oproti vzorku č. 5 byl zdvojnásoben použitý výkon laseru při stejných skenovacích parametrech. Tento jev vedl ke zintenzivnění tavení povrchové vrstvy materiálu a eliminaci menších prohlubní po kuličkovém grafitu. Došlo také k mírnému zhoršení parametrů drsnosti povrchu viz Tab. 9, a to z důvodu změny výšek v okolí důlků, které nebyly zcela eliminovány. Lesk povrchu zůstal oproti vzorku č. 5 nezměněn. Při vizuálním ohledání vzorku jsou na jeho povrchu důlky v menším zastoupení, nicméně patrnější oproti vzorku č. 5.



Obr. 40 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku č. 25



Obr. 41 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku č. 25

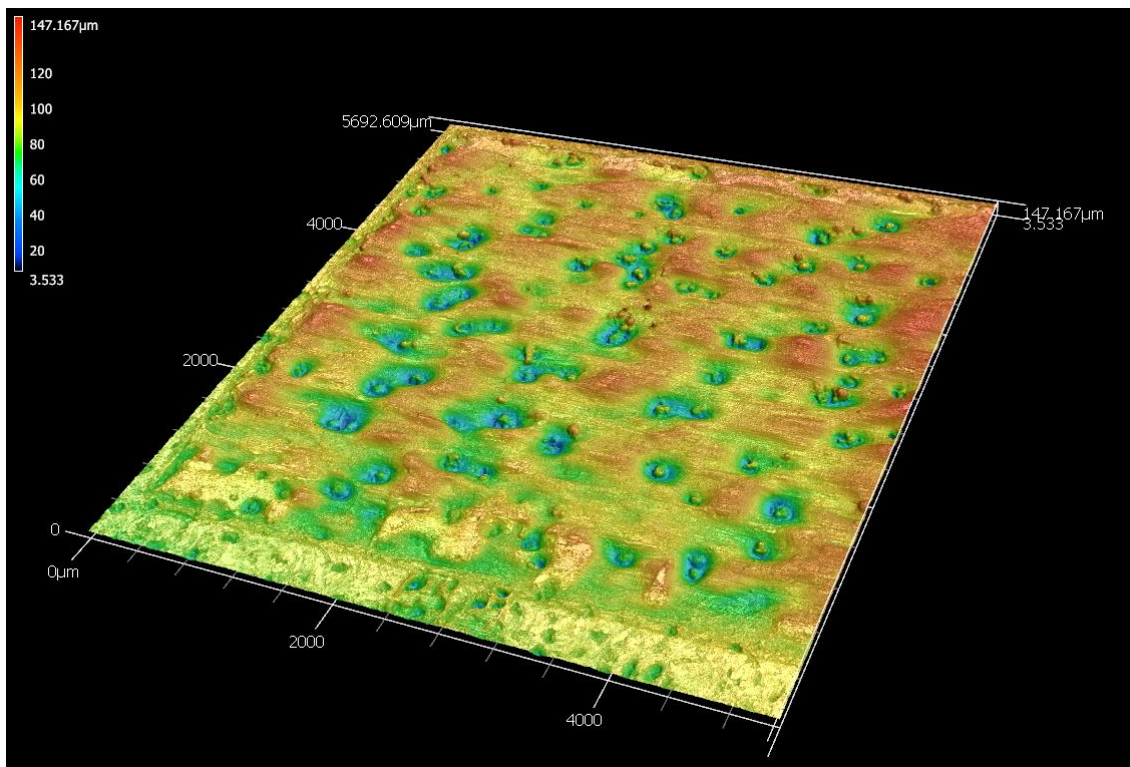
Tab.8 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek č. 25

Vzorek č.	Výkon [W]	Odchylka od fokusační vzdálenosti [mm]	Rychlost skenování [mm/s]
25	80	2,5	200

Tab. 9 – Výsledky měření drsnosti vzorku č. 25

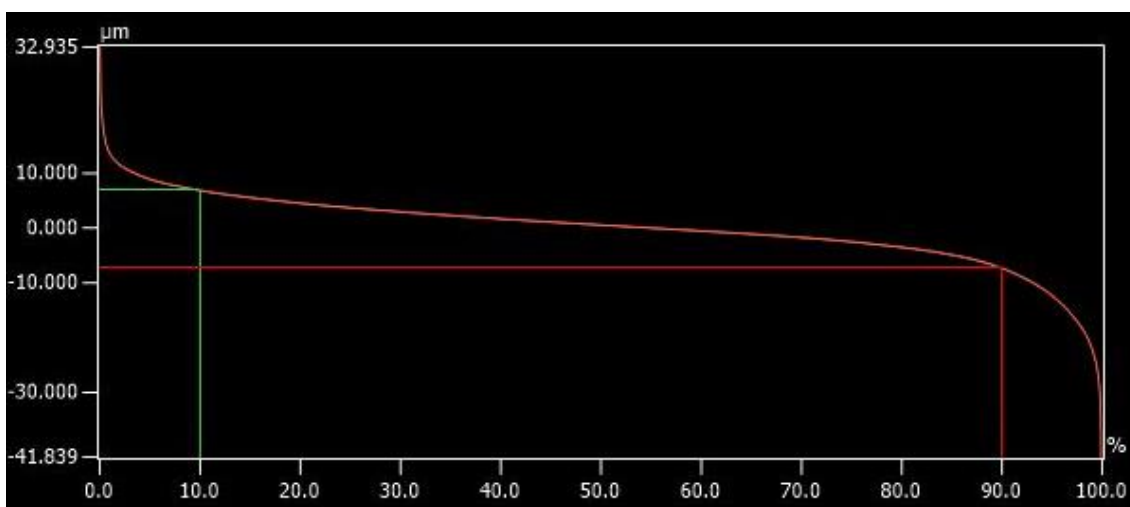
č. měření	Ra [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sxp [μm]
1	1,188	2,926	88,992	
2	1,764	3,092	90,461	
3	1,33	3,108	81,482	
4	2,486	2,879	87,839	
5	1,166	3,050	92,316	
Průměr	1,587	3,011	88,218	8,606
Odchylka	0,498	0,092	3,686	

Pro lepší optimalizaci tavení materiálu, které je pro laserové leštění zásadní, bylo u dalšího vzorku, konkrétně u vzorku č. 54 viz Obr. 42 použito vyšší odchylky od fokusační vzdálenosti.



Obr. 42 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku č. 54

Jak lze vidět na Obr. 42 a Obr. 43, požadovaného výsledku nebylo dosaženo, a i přes vyšší míru tavení materiálu opět nedošlo ke kompletní eliminaci povrchových struktur. Došlo také ke zhoršení parametrů drsnosti a 80 % objemu materiálu se nacházelo na výškovém rozmezí 14,138 μm. Data z měření a použité parametry pro vzorek č. 54 jsou uvedeny v Tab. 10 a Tab. 11.



Obr. 43 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku č. 54

Tab. 10 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek č. 54

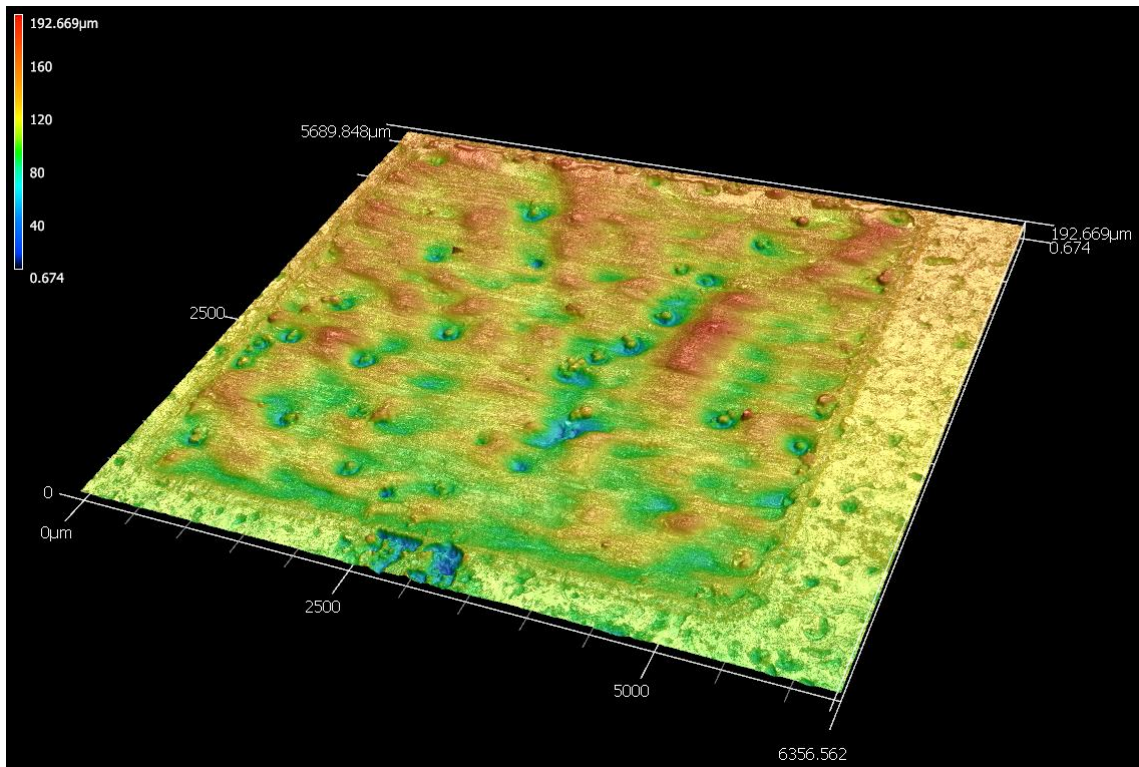
Vzorek č.	Výkon [W]	Odchylka od fokusační vzdálenosti [mm]	Rychlost skenování [mm/s]
54	70	4	150

Tab. 11 – Výsledky měření drsnosti vzorku č. 54

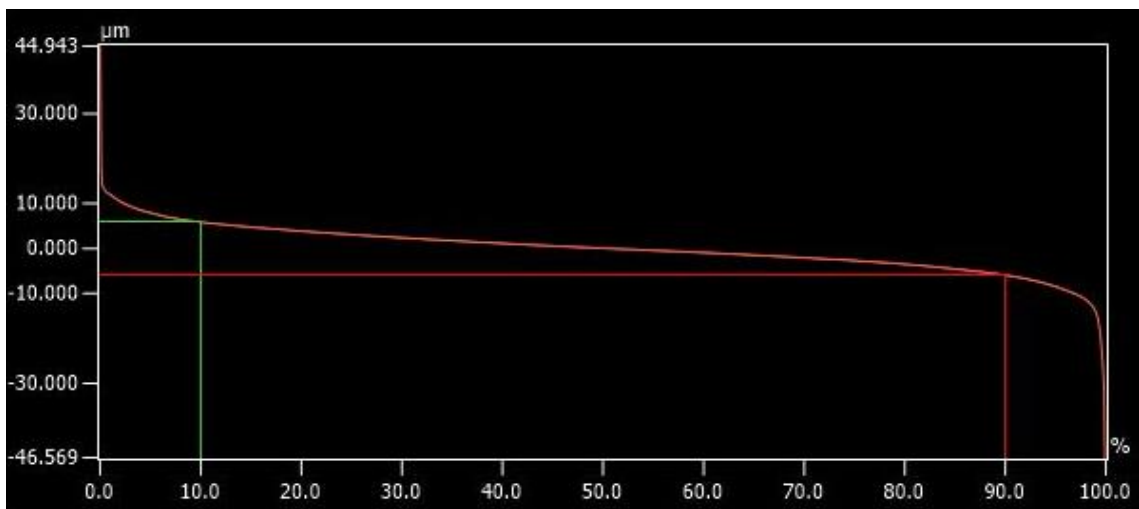
č. měření	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	Sxp [ $\mu\text{m}$ ]
1	1,397	4,505	73,073	
2	2,957	4,927	102,136	
3	2,167	4,406	70,269	
4	1,345	3,783	75,809	
5	1,564	4,526	74,679	
Průměr	1,886	4,429	79,193	14,138
Odchylka	0,610	0,369	11,622	

Na Obr. 44 a Obr. 45 je uveden sken a křivka nosného podílu vzorku č. 73. Tento vzorek byl skenován s odchylkou od fokusační vzdálenosti 6 mm, což napomohlo k výraznějšímu tavení materiálu. Ostatní parametry laserového procesu a výsledky měření drsnosti jsou uvedeny v Tab. 12 a Tab. 13. Na Obr. 44, stejně jako na Obr. 42 jsou patrné solidifikované výstupky materiálu v místech, ve kterých byly před laserovým procesem důlky po kuličkovém grafitu. Tento jev může být způsoben nemožností pohybu taveniny do plochy. Vysoký překryv pulzů způsobený nízkou rychlostí skenování může zapříčinit výstup taveniny nad povrch materiálu, kde dochází k jeho chladnutí a tuhnutí. Tento jev je nežádoucí, degraduje výsledný povrch materiálu a zhoršuje parametry drsnosti povrchu.





Obr. 44 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku č. 73



Obr. 45 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku č. 73

Tab. 12 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek č. 73

Vzorek č.	Výkon [W]	Odchylka od fokusační vzdálenosti [mm]	Rychlost skenování [mm/s]
73	70	6	50

Tab. 13 – Výsledky měření drsnosti vzorku č. 73

č. měření	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	Sxp [ $\mu\text{m}$ ]
1	1,642	3,775	91,513	
2	1,328	3,955	64,665	
3	1,851	3,893	65,150	
4	1,234	3,890	88,635	
5	0,839	4,232	77,097	
Průměr	1,379	3,949	77,412	11,701
Odchylka	0,348	0,153	11,294	

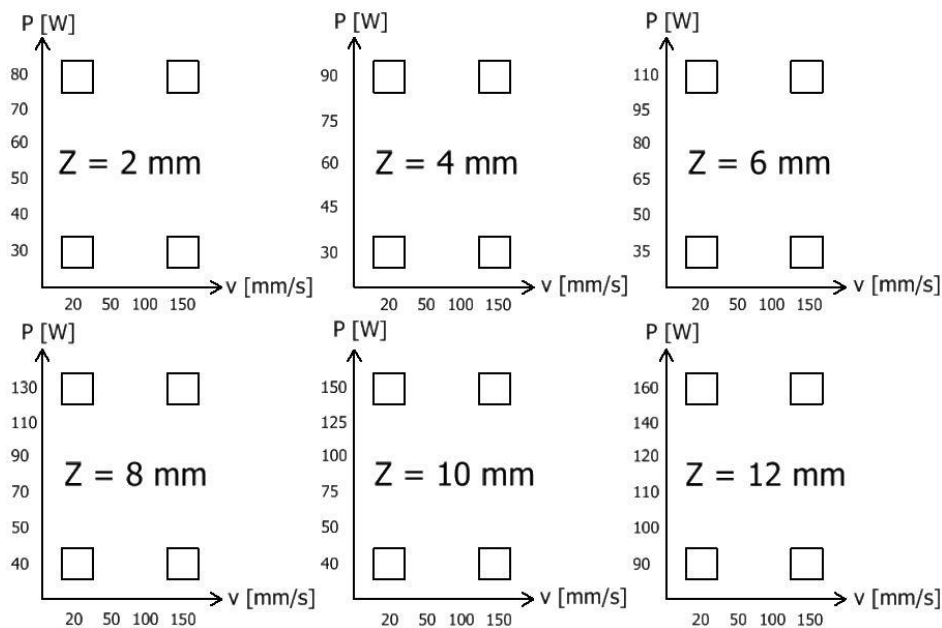
Závěrem pre-experimentu lze říci, že byl zvolen správný přístup k problematice laserového leštění a technologie přetavování povrchové vrstvy se jeví jako vhodná. To je dáno původní morfologií povrchu, která je závislá na předchozím zpracování, a hlavně materiálu vzorku. Z pre-experimentu vyplývá použitelnost odchylky od fokusační vzdálenosti v rozmezí od 2 do 12 mm a maximální použitelný průměrný výkon přibližně 160 W. Vliv rychlosti skenování právě s těmito parametry byl podrobněji zkoumán v hlavním experimentu.

## 4.6 Hlavní experiment

Laserové parametry zjištěné v pre-experimentu byly použity pro definici mezních hodnot výkonů, rychlostí skenování a odchylek od fokusační vzdálenosti pro hlavní experiment.

### 4.6.1 Návrh hlavního experimentu

Maximální použité výkony uvedené na Obr. 46 byly nastaveny tak, aby v kombinaci s uvedenými rychlostmi skenování docházelo k maximálnímu tavení materiálu, ale ne k jeho úběru. Variované výkony musely být nastavovány zvlášť pro každou odchylku od fokusační vzdálenosti z důvodu zvětšování průměru laserového spotu. Z většího průměru spotu na povrchu materiálu vyplývá klesající fluence, tedy energie na plochu spotu.



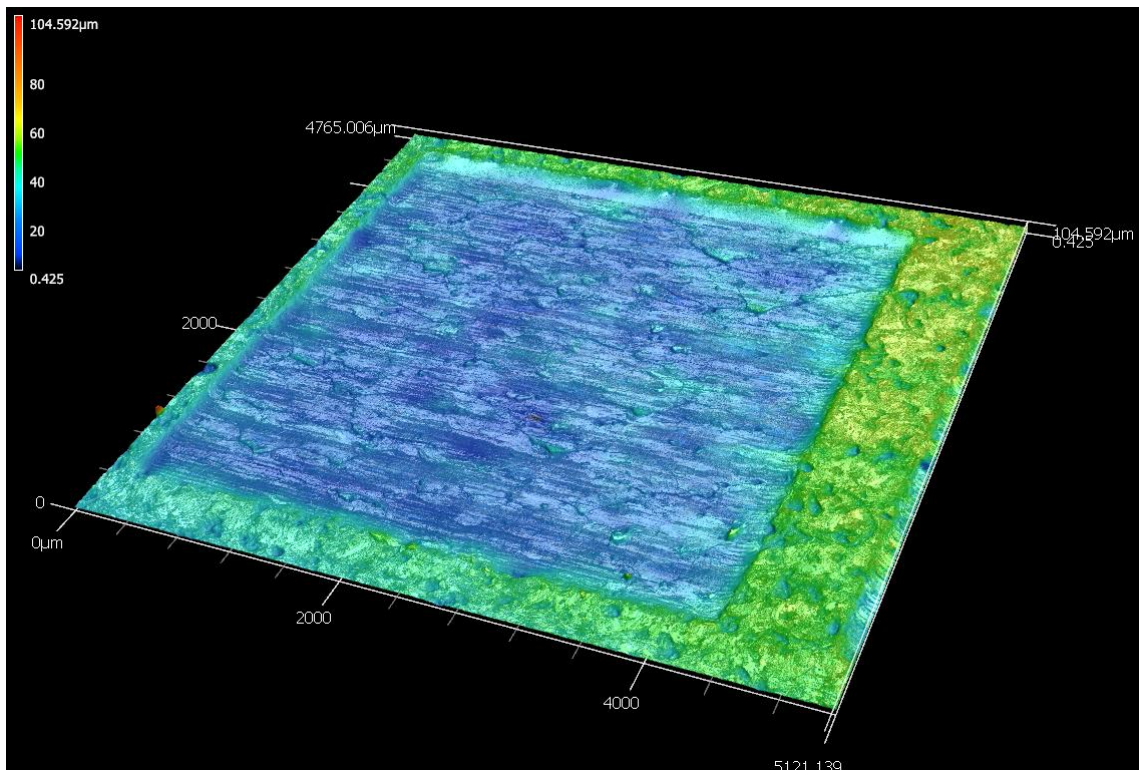
Obr. 46 – Rozložení výkonů, rychlostí skenování a odchylek od fokusační vzdálenosti při plně faktoriálním experimentu formou matic

Cílem plně faktoriálního experimentu je zjištění optimálních podmínek pro tavení materiálu bez možného přehlédnutí některých z možností. Vzorky z maticově uspořádaného návrhu experimentu, které budou vykazovat potenciálně využitelné výsledky, budou dále použity v následujícím iteračním postupu hledání vhodných parametrů laserového leštění. Na následujících obrázcích a v následujících tabulkách jsou uvedeny nejlepší výsledky z výše zmíněného experimentu, které byly dále použity do iteračního postupu. Lze říci, že slibné výsledky vykazovaly vzorky s maximálním použitým výkonem a minimální rychlostí. Na povrchu ostatních vzorků nedocházelo k dostatečnému tavení a relokaci materiálu, aby byly zakryty a eliminovány povrchové struktury. Nevýhodou této technologie leštění je vyšší tepelné ovlivnění povrchu.

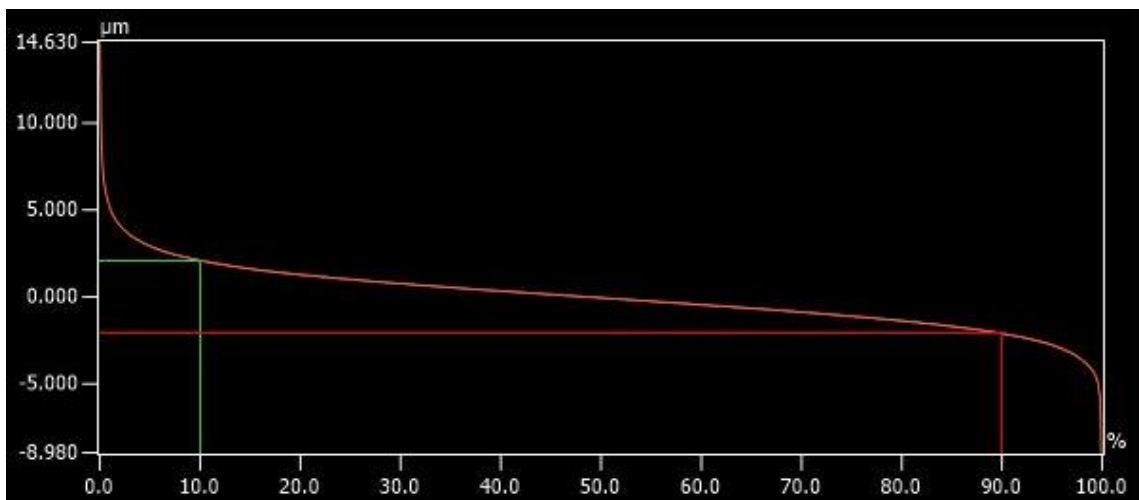
#### 4.6.2 Realizace a vyhodnocení hlavního experimentu

Vzorky s maximem použitého výkonu a minimální rychlostí v každé z matic vykazovaly nejlepší výsledky s ohledem na optimální natavení materiálu, a proto byly vybrány k bližší analýze. Prvním uvedeným vzorkem z výše popsaného experimentu je vzorek s označením Z2–80–20 (hodnota odchylky od fokusační vzdálenosti–výkon–skenovací rychlost), který je na Obr. 47. Na Obr. 48 je uvedena křivka materiálového podílu tohoto vzorku

a v Tab. 14 a Tab. 15 jsou uvedeny použité laserové parametry a výsledky měření parametrů drsnosti povrchu.



Obr. 47 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením Z2-80-20



Obr. 48 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením Z2-80-20

Tab. 14 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek s označením Z2-80-20

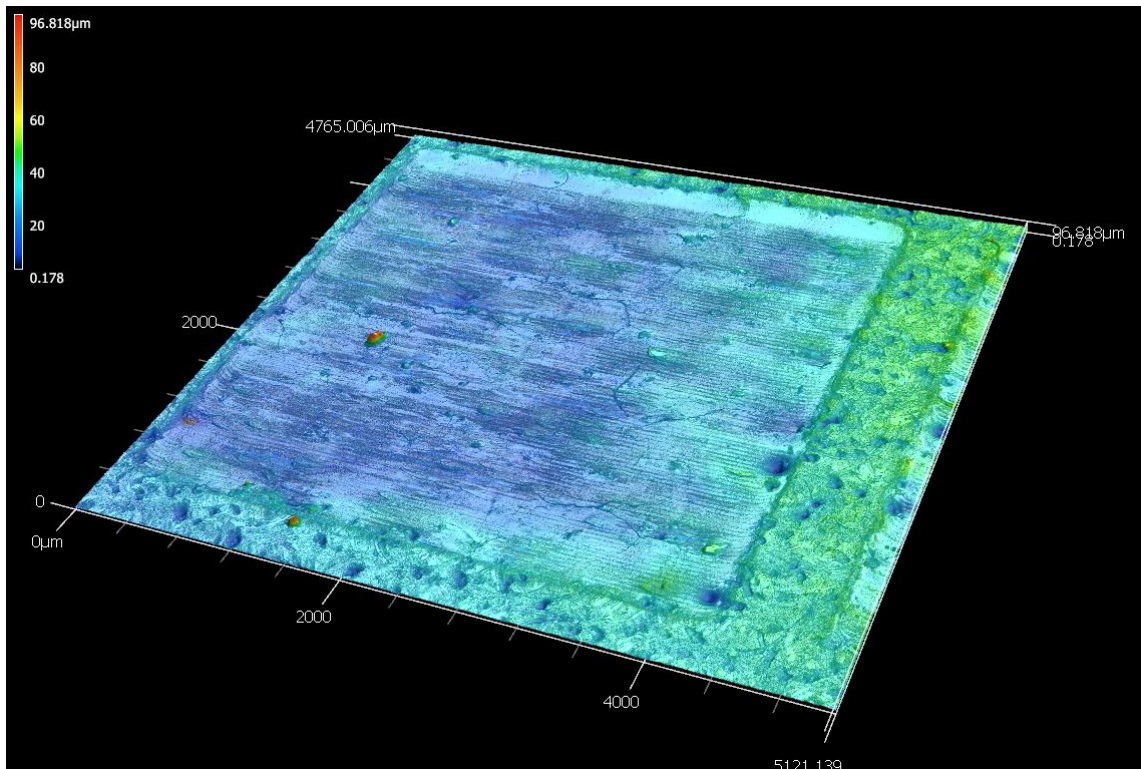
Vzorek ozn.	Výkon [W]	Odchylka od fokusační vzdálenosti [mm]	Rychlost skenování [mm/s]
Z2-80-20	80	2	20

Oproti vzorkům č. 5, 25, 54 a 73 vykazuje tento vzorek snížení hodnoty  $S_{xp}$  na 4,197  $\mu\text{m}$ . To je dáno viditelnou vyšší mírou tavení a relokace materiálu, který poměrně úspěšně zaplnil povrchové prohlubně způsobené původním zpracováním. Zároveň se ale také na povrchu vyskytují praskliny, které jsou způsobeny silnou tepelnou zátěží vzorku.

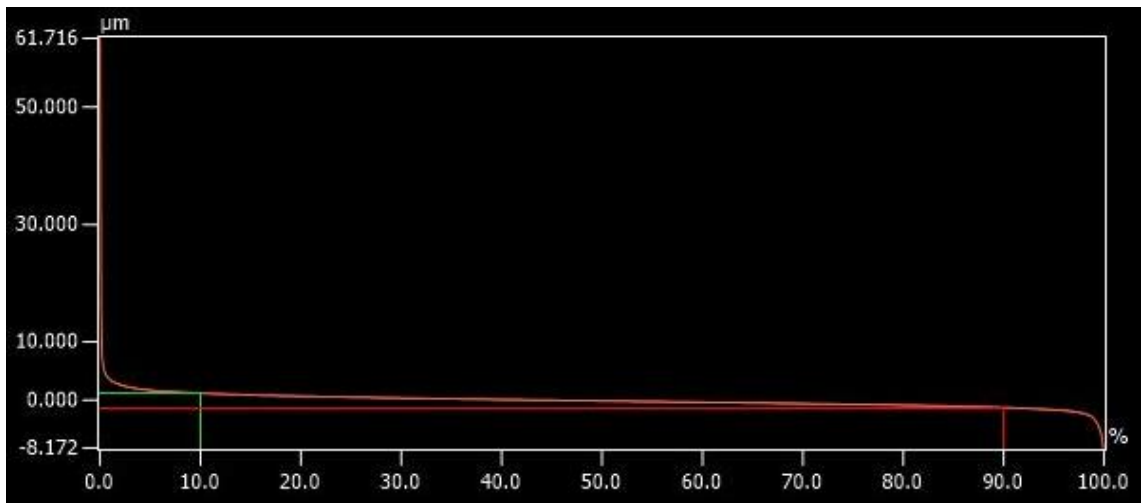
Tab. 15 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením Z2–80–20

č. měření	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	Sxp [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,441	1,332	21,676	
2	0,921	1,372	23,610	
3	0,567	1,376	22,033	
4	0,776	1,215	31,416	
5	0,745	1,327	22,421	
Průměr	0,690	1,324	24,231	4,197
Odchylka	0,168	0,058	3,651	

Následující vzorek s označením Z4–90–20 uveden na Obr. 49 je opět výkonovým maximem matice, tentokrát s odchylkou od fokusační vzdálenosti 4 mm. Ostatní procesní parametry jsou uvedeny v Tab. 16. Na Obr. 50 je uvedena křivka materiálového podílu odpovídající vzorku č. Z4-90-20. Na vzorku jsou opět patrné praskliny vzniklé tepelným namáháním povrchu.



Obr. 49 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením Z4-90-20



Obr. 50 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením Z4-90-20

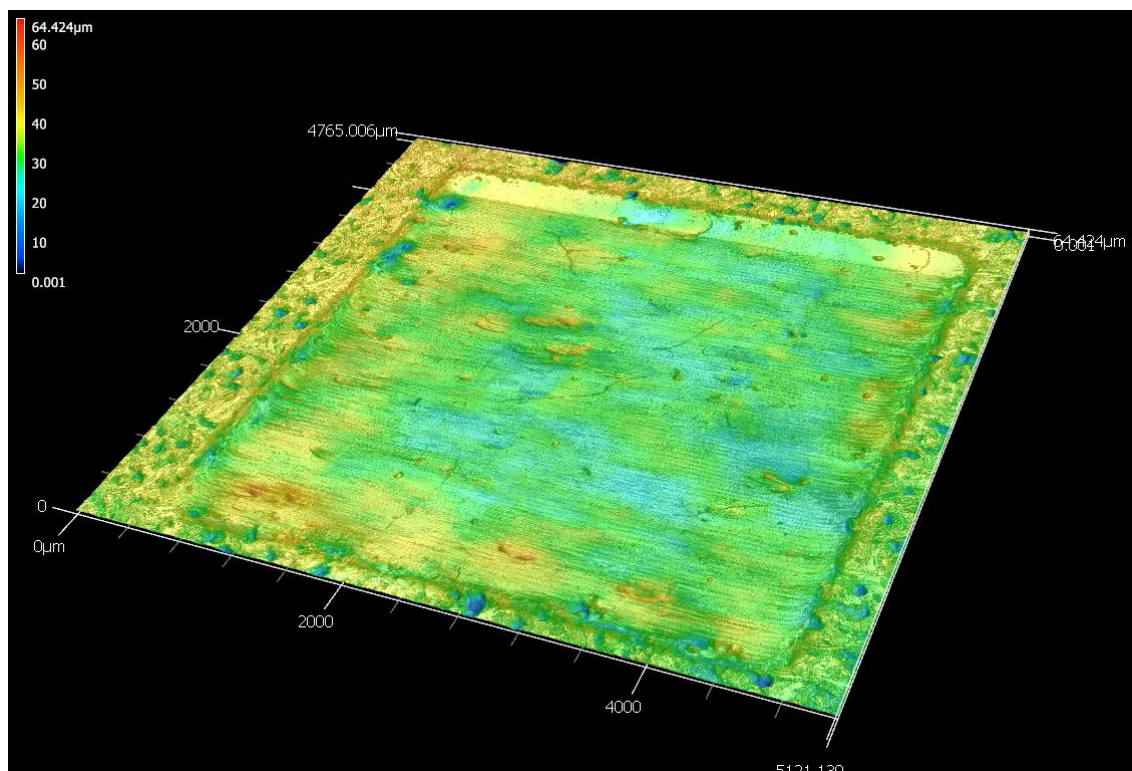
Tab. 16 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek s označením Z4-90-20

Vzorek ozn.	Výkon [W]	Odchylka od fokusační vzdálenosti [mm]	Rychlost skenování [mm/s]
Z4-90-20	90	4	20

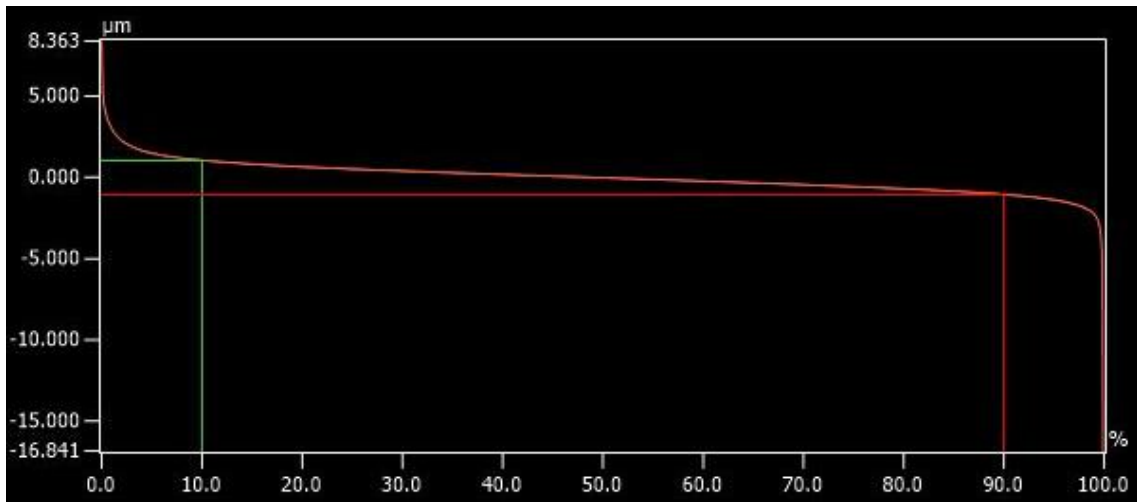
Tab. 17 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením Z4-90-20

č. měření	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	Sxp [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,443	0,745	21,805	
2	0,358	0,796	16,803	
3	0,401	0,823	20,573	
4	0,407	0,797	12,253	
5	0,428	0,777	16,481	
Průměr	0,407	0,788	17,583	2,449
Odchylka	0,029	0,026	3,376	

Vzorek s označením Z6-110-20 uveden na Obr. 51 vykazuje prozatím nejuniformnější povrch, na kterém se podařilo zakrýt téměř všechny důlky po kuličkovém grafitu. Parametry, kterými byl tento vzorek vytvořen, jsou uvedeny v Tab. 18 a měřené drsnosti parametry v Tab. 19. Oproti vzorku s označením Z4-90-20 vykazuje tento vzorek zlepšení ve všech měřených parametrech drsnosti i v parametru Sxp, který vyplývá z křivky materiálového podílu na Obr. 52. Tento parametr klesl na hodnotu 2,098  $\mu\text{m}$ . V porovnání se vzorky s označením Z2-80-20 a Z4-90-20 poklesla také míra praskání povrchu. Praskliny jsou stále patrné, ale jejich zastoupení není tak časté jako na předchozích vzorcích.



Obr. 51 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením Z6-110-20



Obr. 52 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením Z6–110–20

Tab. 18 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek s označením Z6–110–20

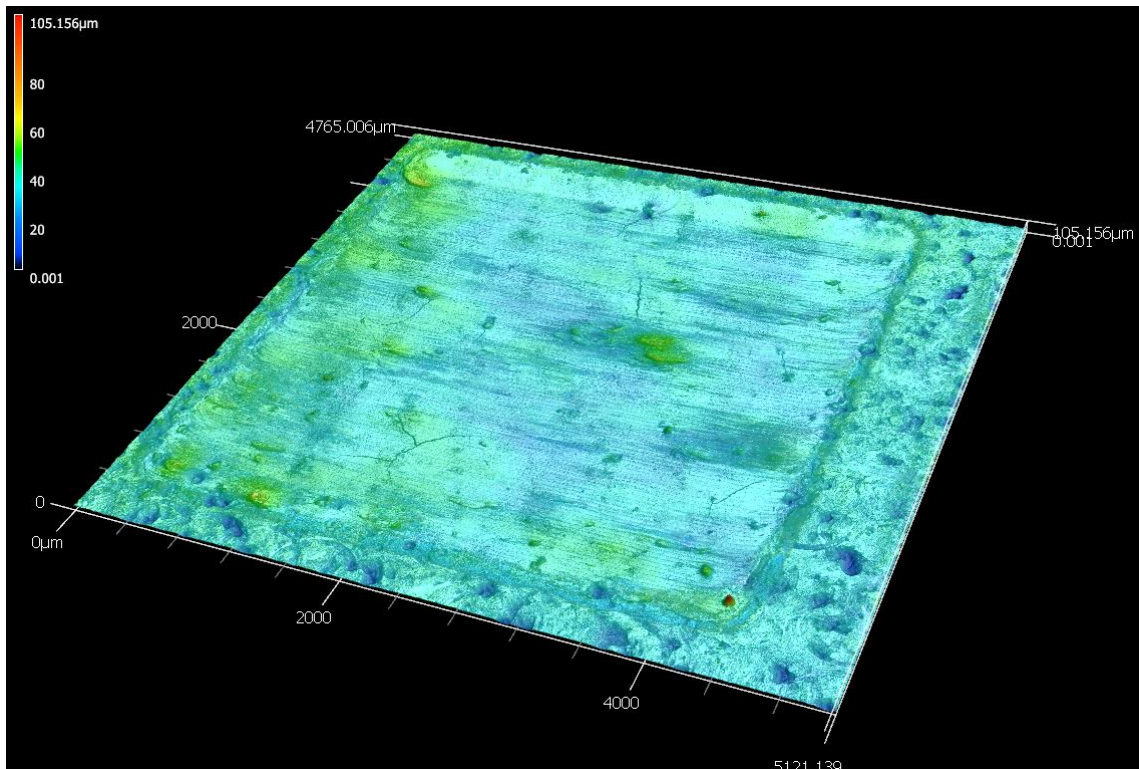
Vzorek ozn.	Výkon [W]	Odchylka od fokusační vzdálenosti [mm]	Rychlost skenování [mm/s]
Z6-110-20	110	6	20

Tab. 19 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením Z6–110–20

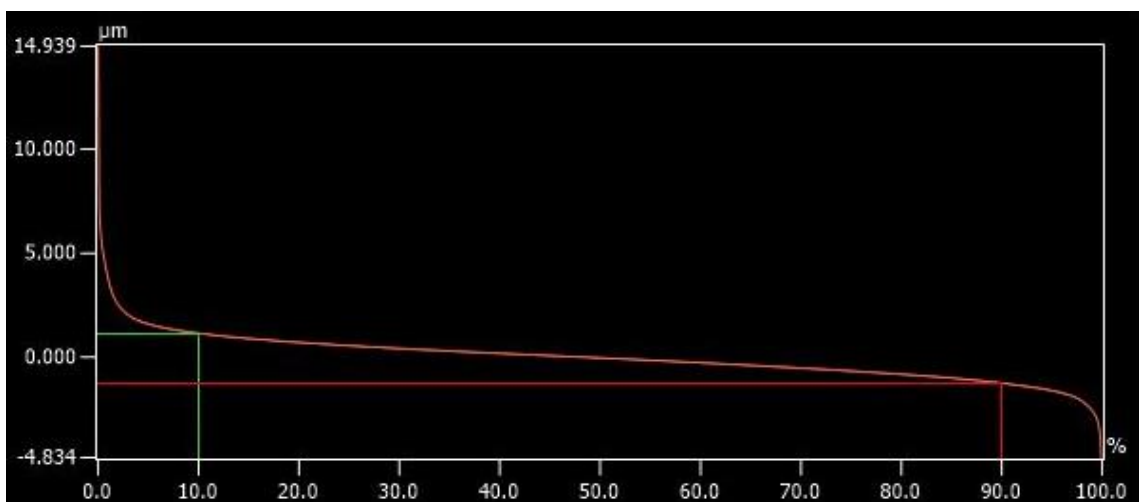
č. měření	Ra [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sxp [μm]
1	0,231	0,745	15,678	
2	0,319	0,705	14,453	
3	0,253	0,679	10,642	
4	0,295	0,686	11,471	
5	0,375	0,693	14,453	
Průměr	0,295	0,702	13,340	2,098
Odchylka	0,051	0,023	1,935	



Vzorek s označením Z8-130-20 a jeho parametry a měření jsou vedeny na Obr. 53, Obr. 54 a v Tab. 20 a Tab. 21. Hodnoty měření tohoto vzorku vykazují zhoršení oproti předchozímu vzorku s označením Z6-110-20. Míra popraskání povrchu byla vyhodnocena jako obdobná. U vzorku Z8-130-20 došlo k uspokojivé eliminaci důlků na povrchu materiálu.



Obr. 53 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením Z8-130-20



Obr. 54 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením Z8-130-20

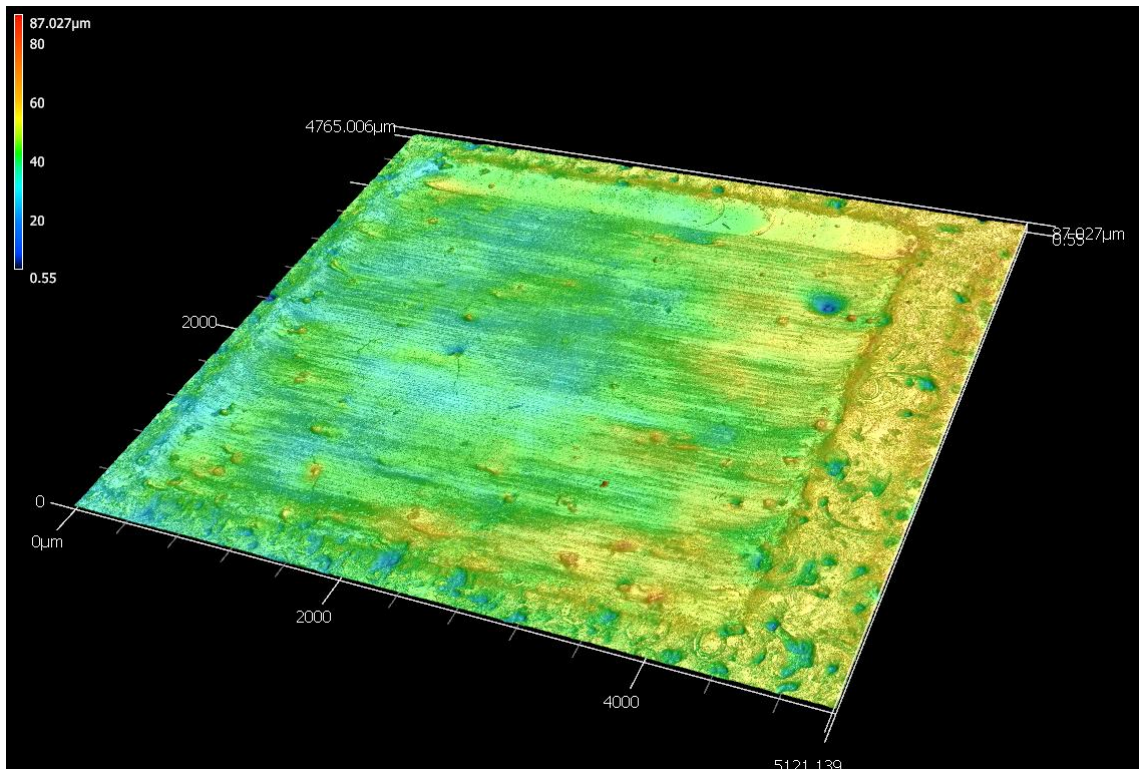
Tab. 20 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek s označením Z8–130–20

Vzorek ozn.	Výkon [W]	Odchylka od fokusační vzdálenosti [mm]	Rychlost skenování [mm/s]
Z8-130-20	130	8	20

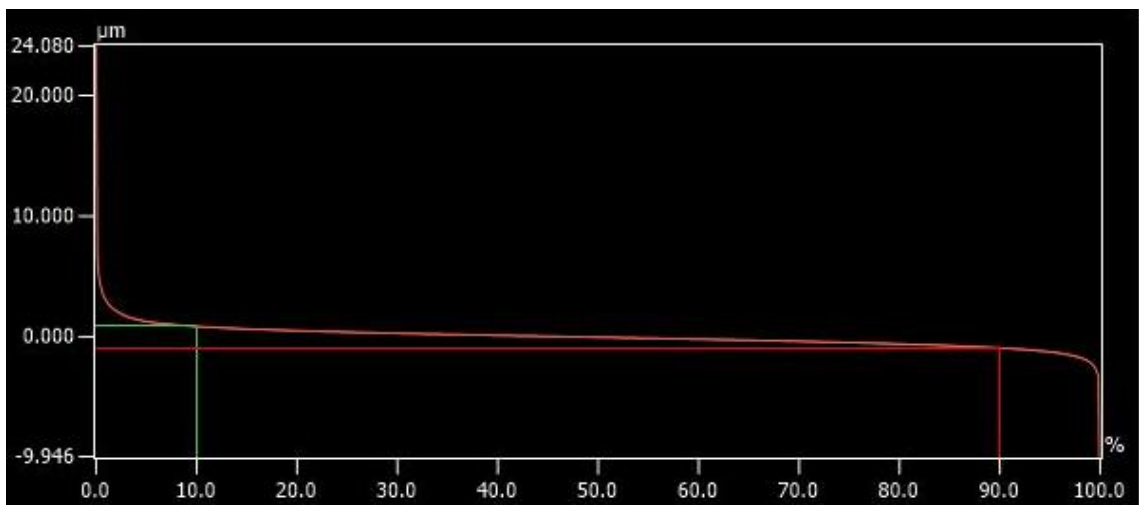
Tab. 21 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením Z8–130–20

č. měření	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	Sxp [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,295	0,714	21,823	
2	0,247	0,845	21,823	
3	0,313	0,808	24,393	
4	0,3	0,840	19,128	
5	0,396	0,826	19,773	
Průměr	0,310	0,806	21,388	2,388
Odchylka	0,048	0,048	1,851	

Následující vzorek, tedy vzorek s označením Z10-150-20, který je na Obr. 55 byl vytvořen parametry v Tab. 22, byl nejlepším vzorkem z celého plně faktoriálního experimentu. Drsnost povrchu, viz Tab. 23, dokonce klesla pod referenční naměřenou hodnotu ručně leštěného vzorku, a to z důvodu vysokého podílu eliminovaných důlků po kuličkovém grafitu. Také míra praskání povrchu byla vyhodnocena, jako nejnižší z upravovaných vzorků. Dle parametru Sxp se 80 % procent materiálu vyskytuje na výškovém rozmezí 1,786  $\mu\text{m}$  a křivka materiálového podílu na Obr. 56 vykazuje v nosné části velmi pomalý pokles. Právě vzorek Z10-150-20 byl určen k dalšímu experimentu viz níže.



Obr. 55 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením Z10–150–20



Obr. 56 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením Z10–150–20

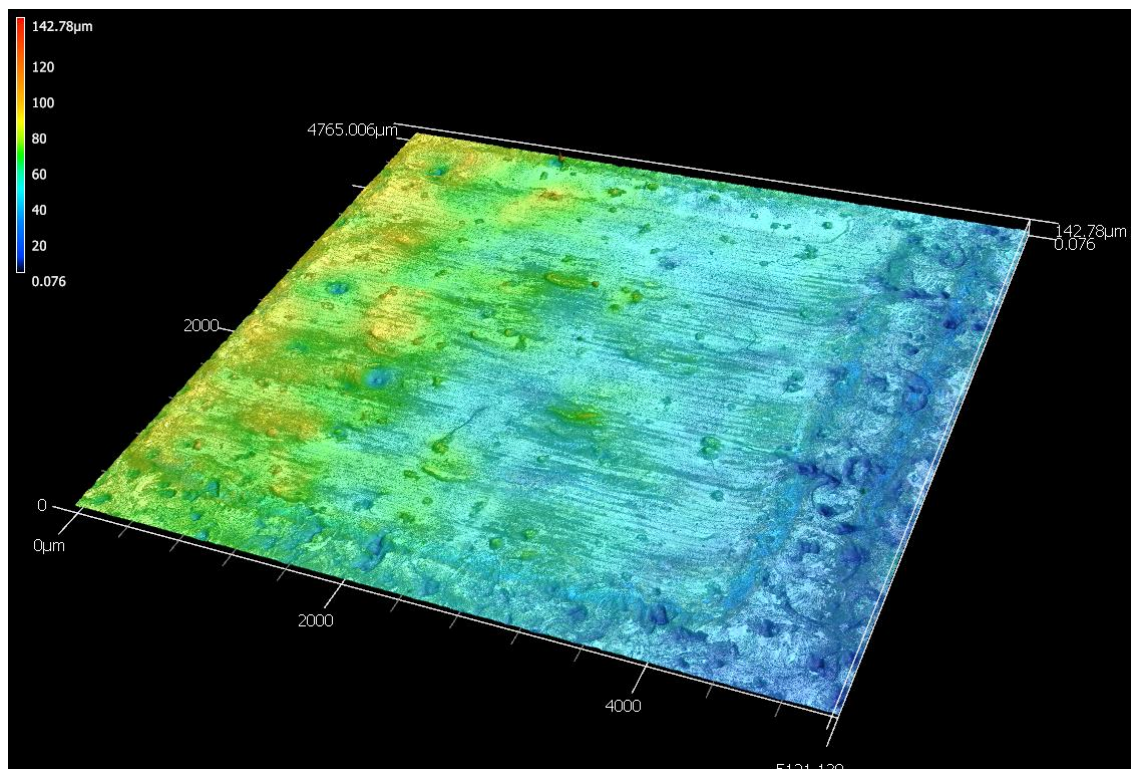
Tab. 22 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek s označením Z10–150–20

Vzorek ozn.	Výkon [W]	Odchylka od fokusační vzdálenosti [mm]	Rychlost skenování [mm/s]
Z10-150-20	150	10	20

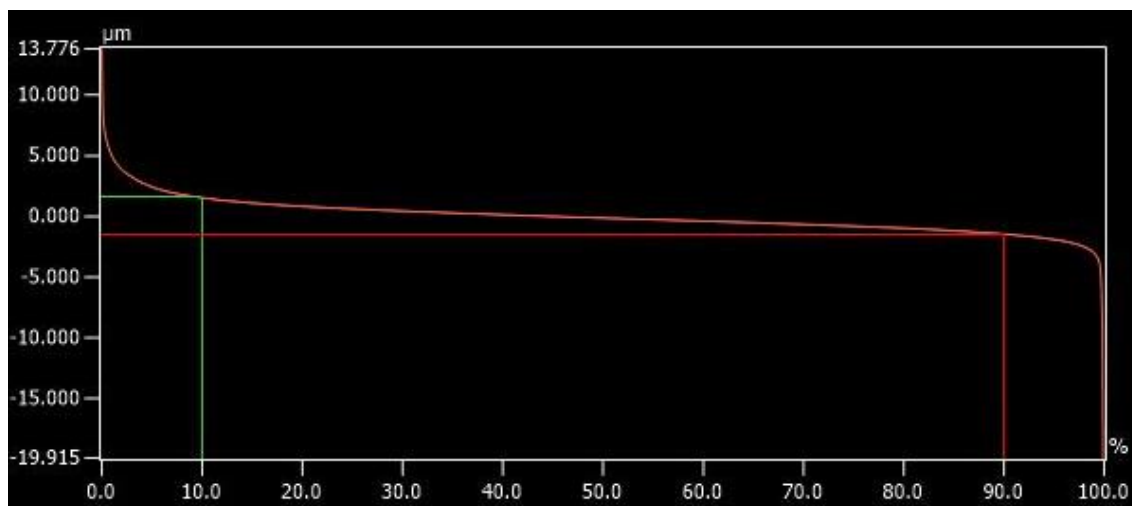
Tab. 23 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením Z10–150–20

č. měření	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	Sxp [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,406	0,600	23,777	
2	0,251	0,623	32,959	
3	0,188	0,679	20,991	
4	0,34	0,625	31,012	
5	0,262	0,582	34,026	
Průměr	0,289	0,622	28,553	1,786
Odchylka	0,076	0,033	5,204	

Vzorek s označením Z12-160-20, který je uveden na Obr. 57 je posledním popsáným z maticového experimentu. Lze tedy říci, že pozitivní vliv na vlastnosti povrchu měly pouze okrajové podmínky experimentu. Na Obr. 58 je opět uvedena křivka materiálového podílu a v Tab. 24 a Tab. 25 parametry laserového procesu a měřené hodnoty parametrů drsnosti. Tento vzorek již nevykazuje tak dobré hodnoty, jako vzorky Z10-150-20 a Z6-110-20. Na povrchu vzorku se vyskytují místa s relokovaným materiálem a některé důlky po kuličkovém grafitu nejsou dostatečně vyplněny.



Obr. 57 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením Z12–160–20



Obr. 58 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením Z12–160–20

Tab. 24 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek s označením Z12–160–20

Vzorek ozn.	Výkon [W]	Odchylka od fokusační vzdálenosti [mm]	Rychlost skenování [mm/s]
Z12-160-20	160	12	20

Tab. 25 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením Z12–160–20

č. měření	Ra [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sxp [μm]
1	0,37	1,001	34,802	
2	0,528	0,960	20,965	
3	0,45	1,078	30,023	
4	0,779	0,994	16,779	
5	0,486	1,029	33,691	
Průměr	0,523	1,012	27,252	2,996
Odchylka	0,138	0,040	7,146	

V hlavním experimentu bylo na všech uvedených vzorcích dosaženo přijatelného výsledku z hlediska natavení povrchové vrstvy materiálu. Vzorek s označením Z10-150-20 vykazoval nejlepší hodnoty co se týče parametrů drsnosti povrchu, a proto byl vybrán k dalším experimentům. Oproti ručně leštěnému vzorku došlo ke kompletní eliminaci důlků po kuličkovém grafitu, což napomohlo ke snížení celkové drsnosti povrchu. Veškeré vzorky ale také obsahují na svém povrchu viditelné praskliny po přetavení a tepelném ovlivnění.

## 4.7 Finální experiment

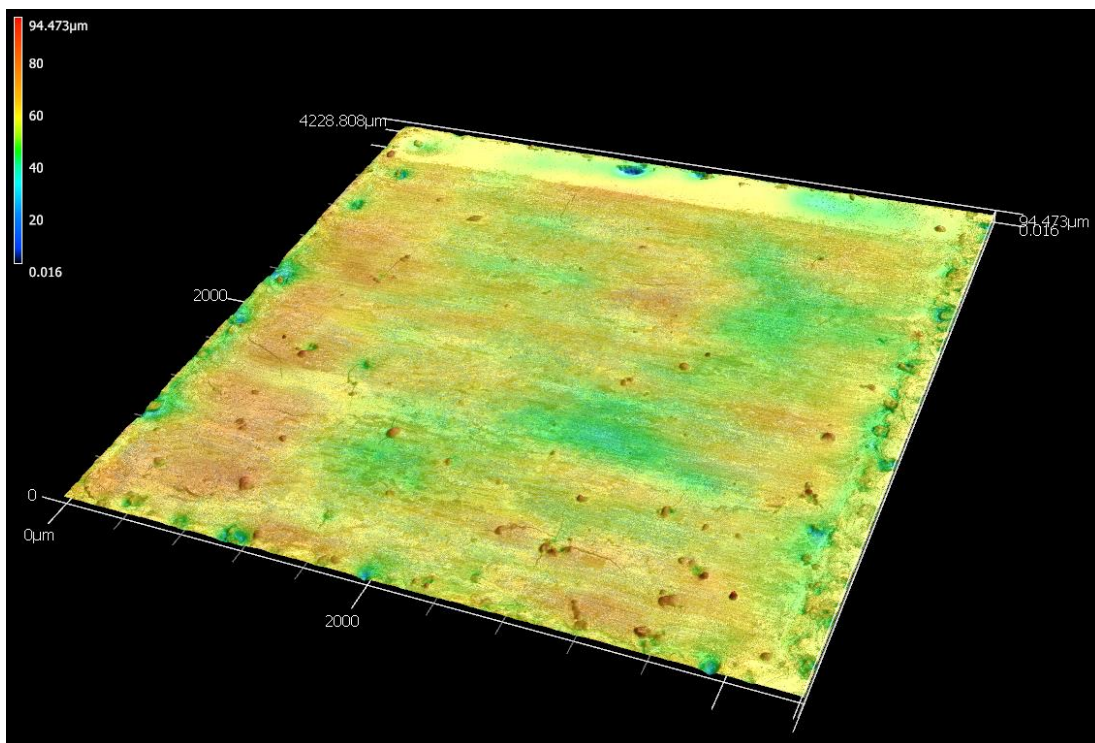
Finální experiment vychází z vyhodnocení hlavního experimentu a jeho cílem byla eliminace nedostatků, které se nepodařilo eliminovat v hlavním experimentu. Konkrétně jde o zlepšení lesku leštěné plochy.

### 4.7.1 Návrh finálního experimentu

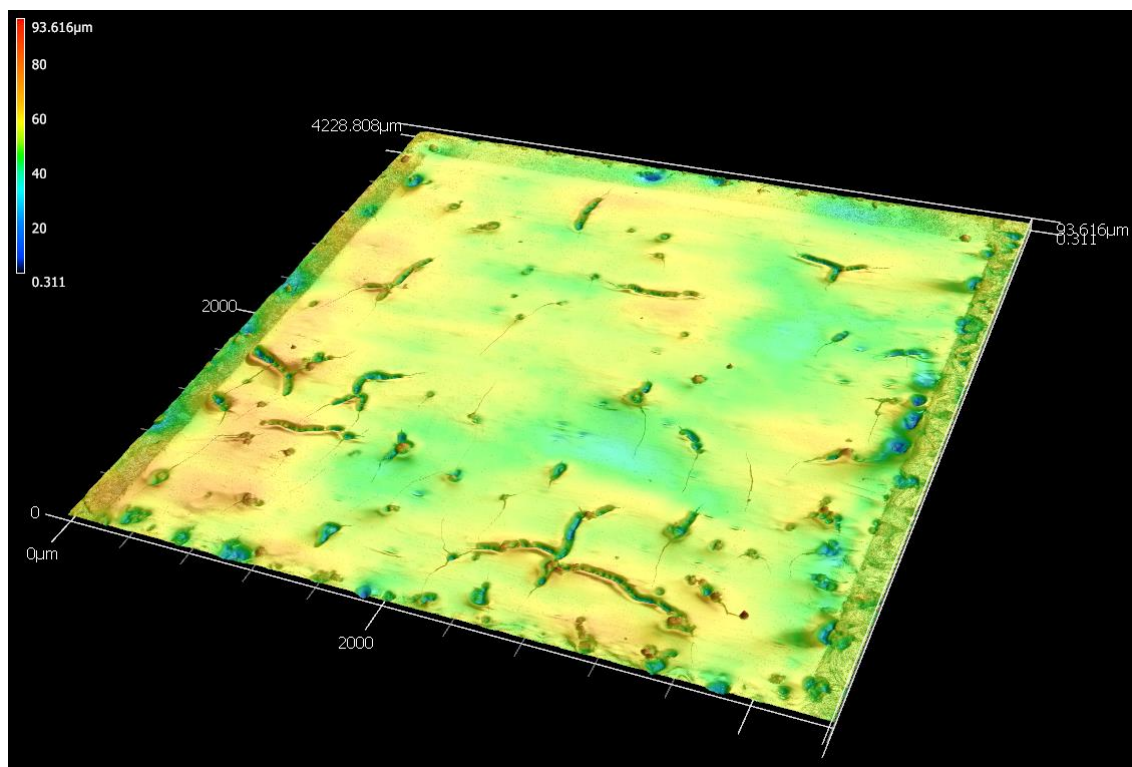
Výsledkem plně faktoriálního maticového experimentu byl fakt, že i přes použití ochranné atmosféry nebylo dosaženo vysokého lesku. Byly nalezeny parametry laserového procesu, které dostatečně eliminují důlky po kuličkovém grafitu, vzniklé přechozím obráběním, nicméně ne jejich lesk, viz vzorek s označením Z10-150-20. Na základě tohoto vzorku byl definován první přejezd procesu leštění, jehož cílem je maximální zlepšení drsnostních parametrů povrchu i přes nevýhodu nízkého lesku. Tento nedostatek je u následujícího vzorku kompenzována druhým přejezdem laserového svazku, který není určen k tavení a relokaci materiálu, ale pouze k odstranění povrchové vrstvy bránící lesku.

### 4.7.2 Realizace a vyhodnocení finálního experimentu

Na Obr. 59 je uveden první přejezd na vzorku č. 105, který byl vytvořen parametry uvedenými v Tab. 26.



Obr. 59 – Vzorek č. 105 po prvním přejezdu při laserovém leštění



Obr. 60 – Vzorek č. 105 po druhém přejezdu při laserovém leštění

Na Obr. 60 je vidět vzorek č. 105 již po druhém přejezdu, jehož parametry jsou taktéž uvedeny v Tab. 26.

Tab. 26 – Parametry použité pro tvorbu povrchu vzorku č. 105

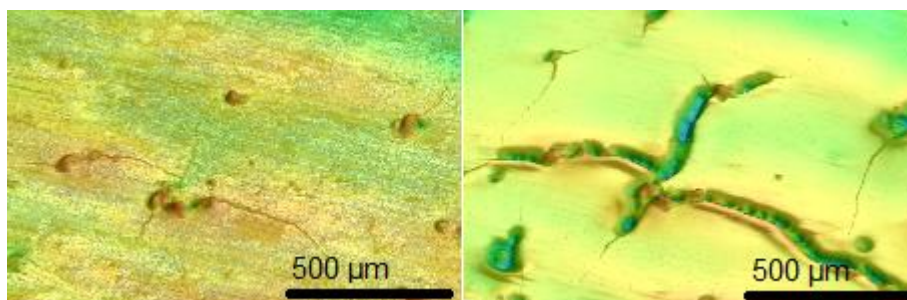
Přejezd	Výkon [W]	Odchylka od fokusační vzdálenosti [mm]	Rychlost skenování [mm/s]
1	150	10	20
2	40	2	1860

Druhý přejezd aplikován na povrch ihned po prvním přejezdu v ochranné atmosféře výrazně zvýšil lesk vzorku. Efekt druhého (čistícího) přejezdu měl ale také negativní vliv na parametry drsnosti povrchu, jejichž výsledek je pozorovatelný na hodnotách v Tab. 27. Zhoršení parametrů drsnosti je způsobené rozvojem a odhalením prasklin po druhém přejezdu.

Tab. 27 – Měřené parametry drsnosti povrchu po prvním a druhém přejezdu laserového svazku na vzorku č. 105

První přejezd (tavící a relokační)					Druhý přejezd (čistící)				
č. měření	Ra [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sxp [μm]	č. měření	Ra [μm]	Sa [μm]	Sz [μm]	Sxp [μm]
1	0,238	0,689	32,816		1	0,481	0,833	30,939	
2	0,198	0,604	22,048		2	0,358	0,782	30,286	
3	0,215	0,737	34,708		3	0,401	1,131	40,660	
4	0,2	0,833	35,684		4	0,437	1,159	44,014	
5	0,23	0,646	26,375		5	0,508	0,832	38,287	
Průměr	0,216	0,702	30,326	2,117	Průměr	0,437	0,947	36,837	2,529
Odchylka	0,016	0,079	5,258		Odchylka	0,054	0,163	5,403	

Druhý čistící přejezd sám o sobě nebyl příčinou vzniku těchto prasklin, ale způsobil jejich odhalení a rozšíření. Tento fakt dokládá Obr. 61, na němž je znázorněna stejná oblast po prvním přejezdu (vlevo) a po druhém přejezdu (vpravo).



Obr. 61 – Porovnání shodného místa na vzorku č. 105 po prvním přejezdu (vlevo) a druhém přejezdu (vpravo)

V levé části Obr. 61 je zřetelně vidět prasklina vzniklá tepelným namáháním povrchu materiálu po prvním přejezdu s vysokým tepelným vlivem. V pravé části Obr. 61 je tato prasklina vlivem druhého přejezdu velice zvětšena a zvýrazněna. Z mikroskopické kontroly je také patrné, že praskliny mají iniciační bod na místech předchozích důlků po kuličkovém grafitu.



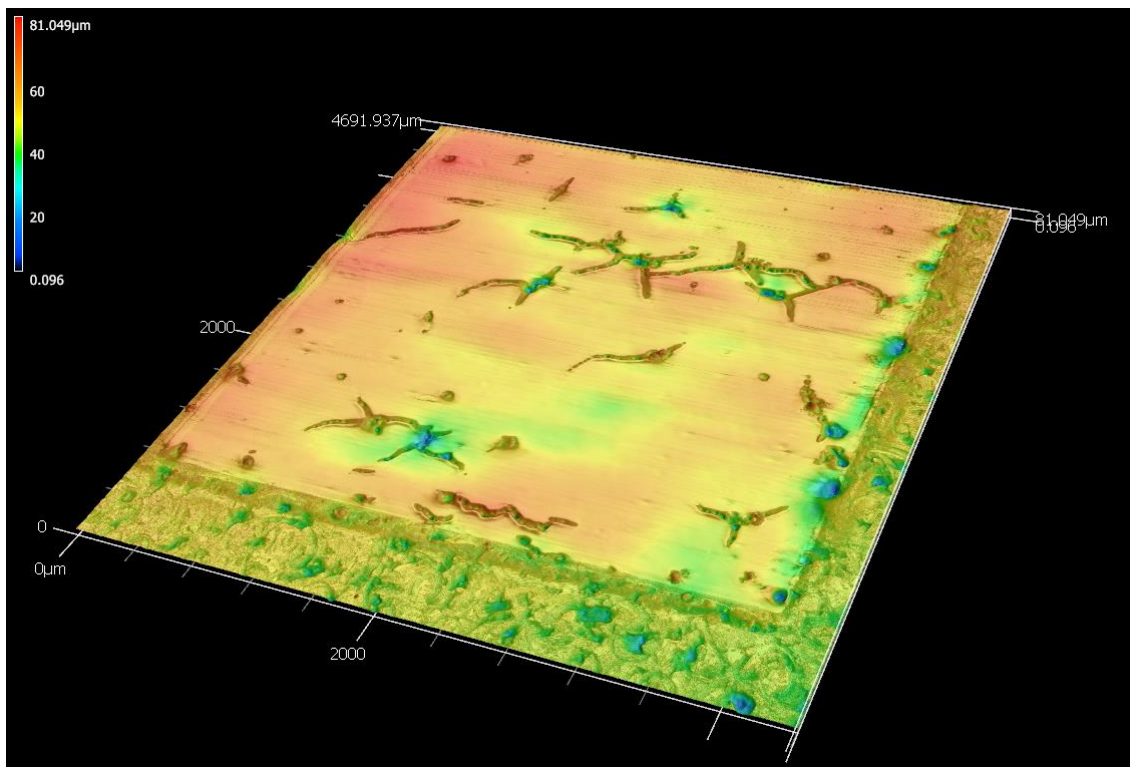
Na Obr. 62 je ukázka lesku, kterého bylo dosaženo na vzorku č. 105 po druhém přejezdu. Presentace lesku je realizována odrazem hrotu pinzety v upravené ploše.



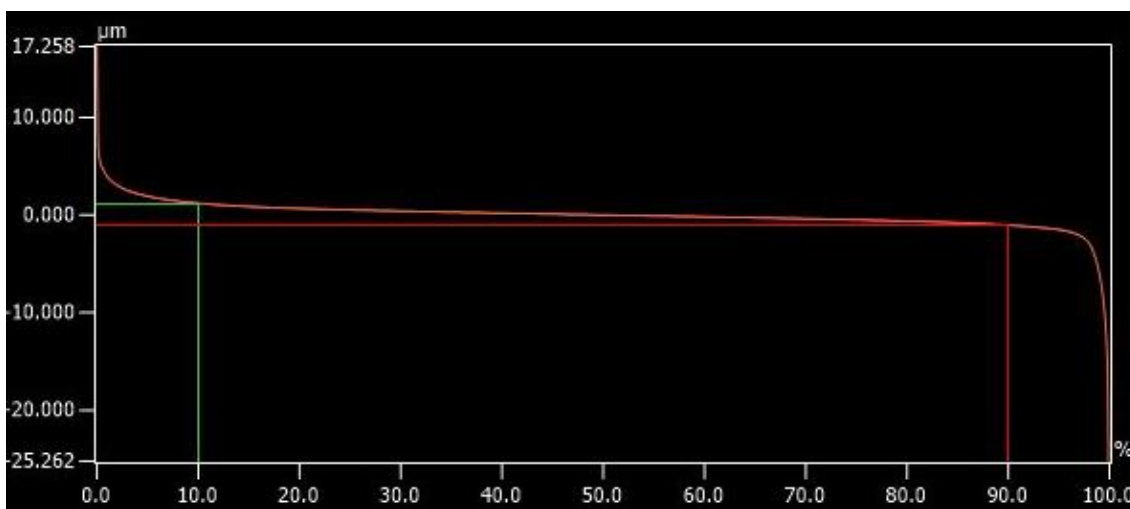
*Obr. 62 – Presentace dosaženého lesku na vzorku č. 105 s rozměrem 4x4 mm*

Posledním vzorkem finálního experimentu je vzorek s označením č. 107, který je vidět na Obr. 63. Na Obr. 64. je uvedena křivka materiálového podílu tohoto vzorku. Parametry, kterými byl tento vzorek vytvořen jsou uvedeny v Tab. 28 a výsledné parametry drsnosti povrchu v Tab. 29.

Tento vzorek byl tvořen celkem čtyřmi přejezdy, ve snaze redukovat tepelné zatížení vzorku rozložením do více kroků.



Obr. 63 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením č. 107



Obr. 64 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením č. 107

Tab. 28 – Parametry použité pro tvorbu povrchu vzorku č. 107

Přejezd	Výkon [W]	Odchylka od fokusační vzdálenosti [mm]	Rychlost skenování [mm/s]
1	130	10	20
2	150	10	40
3	30	2	2000
4	10	0	2500

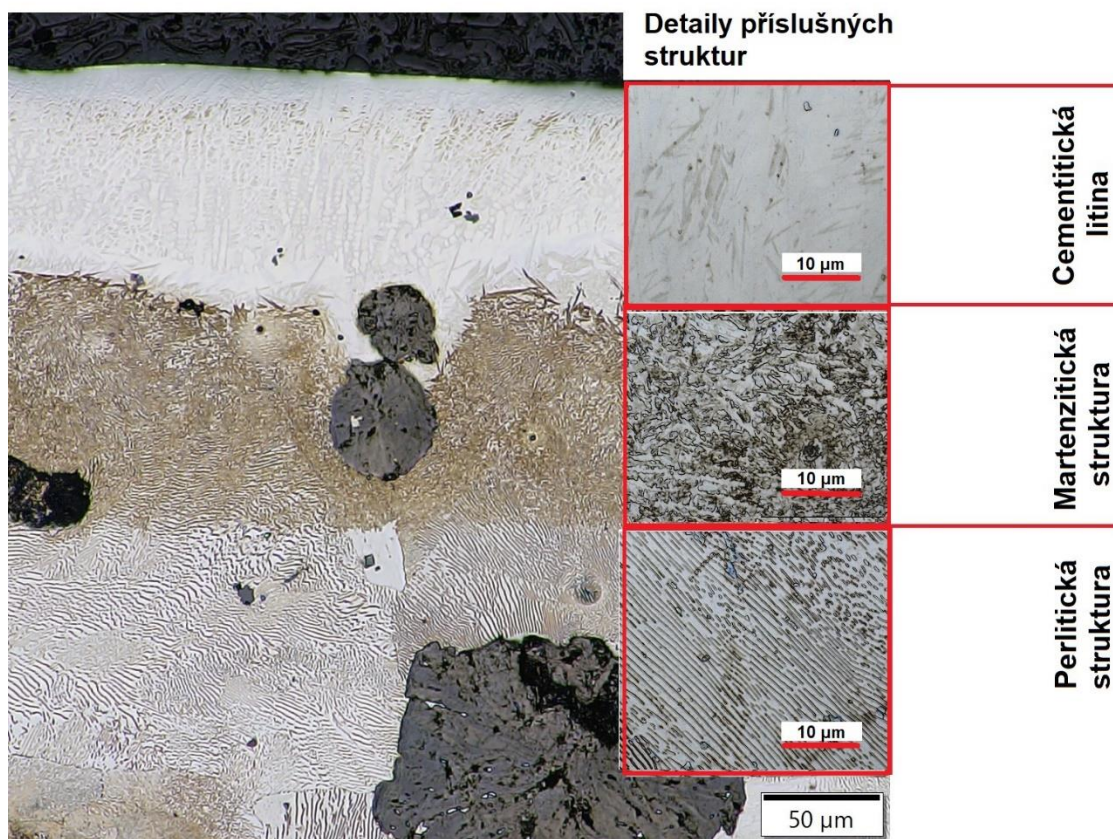
Tab. 29 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením č. 107

č. měření	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sz [ $\mu\text{m}$ ]	Sxp [ $\mu\text{m}$ ]
1	0,341	0,888	32,679	
2	0,6	0,988	42,520	
3	0,15	0,725	32,936	
4	0,198	0,728	37,245	
5	0,289	0,921	41,450	
Průměr	0,316	0,850	37,366	2,239
Odchylka	0,157	0,106	4,119	

Povrch vzorku č. 107 obsahuje opět velké praskliny, které nebyly eliminovány rozložením tepelného zatížení, ale došlo k eliminaci menších prasklin, které nejsou iniciovány na kuličkovém grafitu. Vzorek č. 107 vykazoval ve výsledku nejvýraznější snížení hodnot drsnosti povrchu se stejnou úrovní lesku, jako vzorek č. 105.

#### **4.8 Metalografická analýza a měření mikrotvrlosti**

Na vzorku č. 105 byla provedena metalografická analýza. Cílem této analýzy bylo porozumění, z jakého důvodu se na povrchu vzorků vyskytují praskliny a k jakým strukturálním změnám při přetavování povrchu dochází. Vzorek č. 105 byl z celého vzorku vyříznut pomocí elektroerozivního obrábění, nařezán na metalografické pile, vyleštěn a naleptán tak, aby byla mikrostruktura pozorovatelná v řezu kolmém na leštěný povrch. Snímek z této analýzy je uveden na Obr. 65.

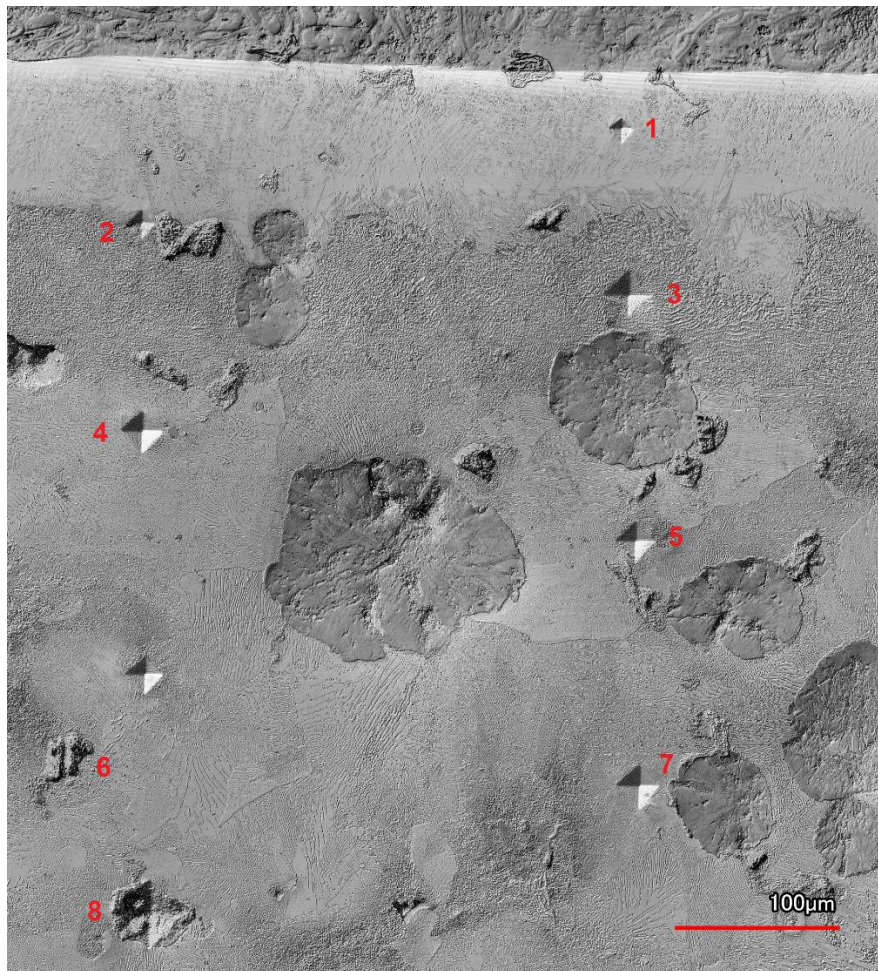


Obr. 65 – Rozložení struktury materiálu po přetavení

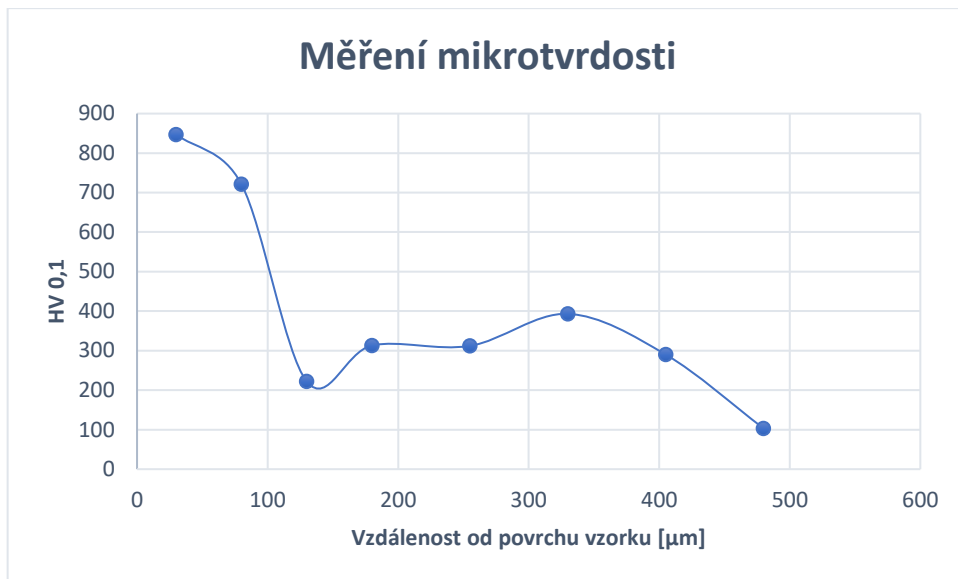
Základní struktura litiny EN – GJS 2070 je perlitická, což je zřejmé ze spodní části Obr. 65. Nad perlitickou strukturou je pásmo struktury martenzitické, která je typická svým jehlicovitým tvarem a směrem k povrchu vzorku se dále mění na strukturu cementitické litiny. Vlivem vysokých výkonů a nízké rychlosti skenování došlo při laserovém působení k rozpuštění grafitových částic v litině a tuhnutí dle metastabilního diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C. Tento fakt dokazuje také absence částic grafitu v podpovrchové přetavené vrstvě. Pásmo cementitické litiny nacházející se na povrchu leštěného dílu je široké přibližně 85 µm. Na něj navazující pásmo martenzitické struktury lze nalézt až do hloubky 200 µm a je tedy široké přibližně 115 µm. Lze tedy říci, že přetavení povrchu a tepelně ovlivněná oblast mírně přesáhla hloubku 200 µm.

Dalším faktorem dokládající změnu struktury z grafitické litiny na cementitickou je mikrotvrdost. Mikrotvrdost byla měřena také na řezu kolmém k upravovanému povrchu metodou dle Vickerse. Bylo vytvořeno

osm vtisků se zatěžující silou odpovídající 100 gramům. Výsledný průběh mikrotvrdosti je uveden v grafu na Obr. 67. První vtisk umístěný 30  $\mu\text{m}$  pod povrchem s číselnou hodnotou mikrotvrdosti rovnou 847 HV 0,1 se vyskytuje v oblasti cementitické litiny viz Obr. 66, č.1. Druhý vtisk s hodnotou 721 HV 0,1 se nachází v oblasti výskytu martenzitické struktury viz Obr. 66, č.2. Od čtvrtého vtisku viz Obr. 66 č.4 se již vtisky nacházejí v oblasti s výskytem perlitické struktury. Vtisk s číselnou hodnotou mikrotvrdosti 222 HV 0,1 (Obr. 66 č.3) a 103 HV 0,1 (Obr. 66 č. 8) se nachází v blízkosti, nebo přímo v grafitu. Z tohoto důvodu vykazuje tak nízké hodnoty mikrotvrdosti, které neodpovídají perlitické struktuře.

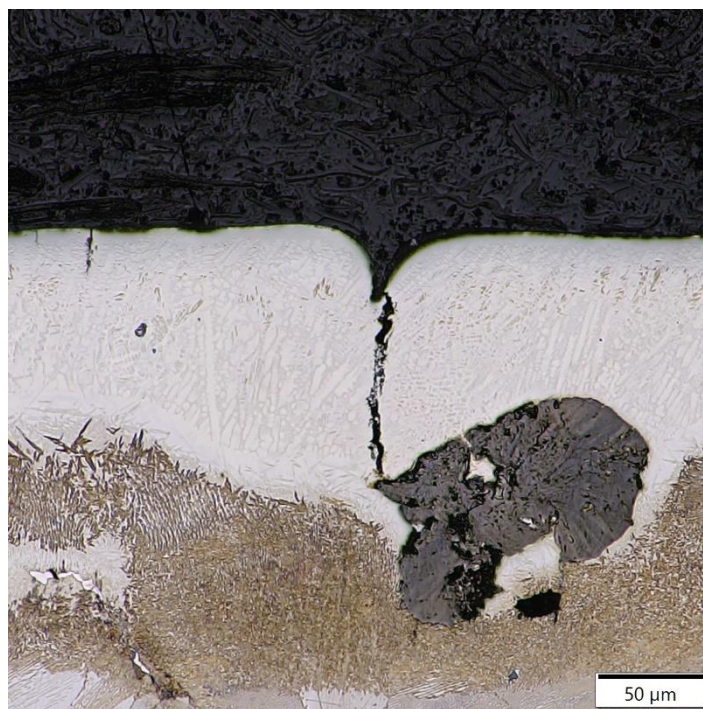


Obr. 66 – Rozložení vtisků pro měření mikrotvrdosti pod laserově leštěným povrchem materiálu



Obr. 67 – Průběh mikrotvrdomosti dle Vickerse v závislosti na vzdálenosti od povrchu vzorku

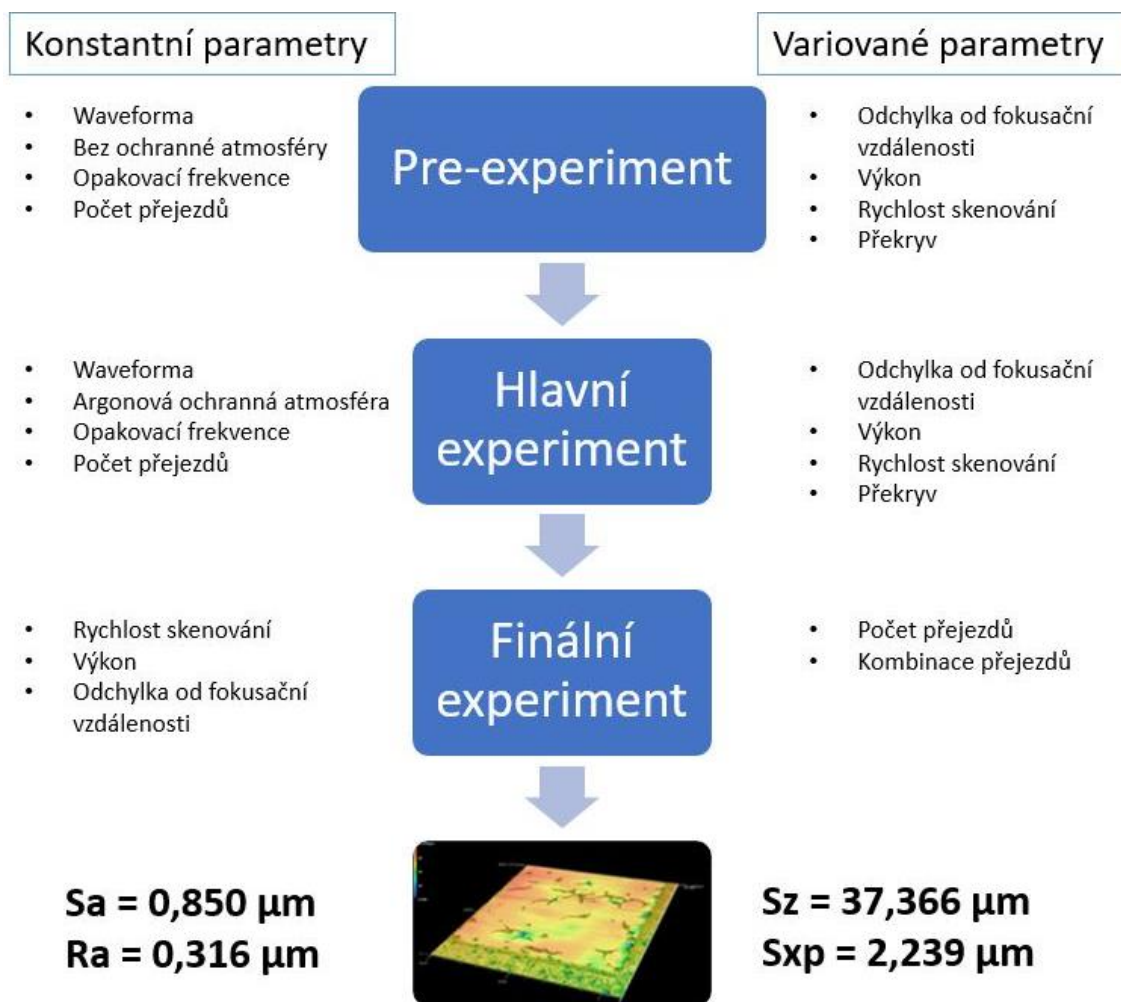
Vlastností cementitické litiny je velmi vysoká tvrdost, a tudíž také křehkost. Z tohoto důvodu také docházelo k praskání povrchu vlivem tak vysokého tepelného namáhání. Ve většině pozorovaných případů docházelo k iniciaci trhliny na kuličkách grafitu, což je také vidět na Obr. 68



Obr. 68 – Iniciace trhliny na kuličkovém grafitu

## 5 Shrnutí experimentální části

Celkově bylo v experimentální části práce vytvořeno na povrchu frézovaných vzorků z litiny s kuličkovým grafitem za účelem zjištění vhodných parametrů pro laserové leštění 246 vzorků. 98 vzorků bylo vytvořeno v rámci pre-experimentu, 140 v rámci plně faktoriálního experimentu v maticovém uspořádání a zbylých 8 vzorků bylo vytvořeno pro finální experiment. Vstupní parametry a logická struktura pro jednotlivé experimenty jsou shrnuty ve schématu na Obr. 69 včetně výsledných parametrů drsnosti povrchu.



Obr. 69 – Schéma shrnující experimentální část práce

Metalografickou analýzou a měřením mikrotvrdosti bylo doloženo, že přítomnost prasklin na povrchu je způsobeno strukturální změnou litiny s kuličkovým grafitem na litinu cementitickou. Takto modifikovaný povrch

vykazuje odlišné vlastnosti od původního povrchu, konkrétně vyšší mikrotvrdot, ale zároveň také křehkost. Výskyt prasklin na povrchu je samozřejmě nežádoucí a jednou z možností jejich eliminace je předehřev a řízené ochlazování tak, aby litina zpětně krystalizovala dle metastabilního diagramu a nedocházelo k tvorbě cementitické litiny. Tato hypotéza však není v diplomové práci ověřována.

V Tab. 30 je uvedeno výsledné porovnání mezi frézovaným, ručně leštěným a laserově leštěným povrchem. Pro porovnání byl použit vzorek č. 107, který vykazoval nejslibnější výsledky dle hodnot drsnosti povrchu. Parametr drsnosti povrchu  $S_z$  vykazoval u laserově leštěného vzorku velice vysoké hodnoty, a to z důvodu tvorby prasklin, které tento parametr výrazně ovlivňují, ale zároveň nemají příliš vysoký vliv na ostatní parametry drsnosti.

Tab. 30 – Finální porovnání hodnot parametrů drsnosti

Povrch	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S_{xp}$ [ $\mu\text{m}$ ]
Frézovaný povrch	$1,061 \pm 0,232$	$1,531 \pm 0,094$	$29,045 \pm 2,355$	4,57
Ručně leštěný vzorek	$0,341 \pm 109$	$0,584 \pm 0,048$	$17,589 \pm 1,467$	1,204
Laserově leštěný vzorek (č. 107)	$0,316 \pm 0,157$	$0,850 \pm 0,106$	$37,366 \pm 4,119$	2,234

Ostatní parametry drsnosti se podařilo oproti frézovanému povrchu zredukovat a přiblížit tak ručně leštěnému povrchu. Parametr  $R_a$  byl snížen o 70 %, parametr  $S_a$  o 45 % a parametr  $S_{xp}$  se podařilo snížit o 51 %.



## 6 Závěr

Cílem této práce bylo přiblížení se referenčnímu ručně leštěnému povrchu litiny s kuličkovým grafitem EN – GJS 2070, která je používána pro tvářecí nástroje. K problematice bylo přistoupeno metodou přetavování pomocí nanosekundového laseru s délkou pulzu 265 ns. Touto metodou lze upravit povrchovou vrstvu tak, že dojde k natavení materiálu na povrchu a takto vzniklá tavenina vyplní prostor prohlubní, čímž dojde ke snížení drsnostních parametrů a navýšení lesku povrchu. Leštění tímto způsobem bylo ztíženo faktem, že povrch vzorků po předchozím obrábění obsahoval velké množství důlků po kuličkovém grafitu.

Lze říci, že laserové leštění je použitelné, nikoliv však vhodné pro úpravu litiny s kuličkovým grafitem. Referenční ručně leštěný povrch, stejně jako frézovaný povrch obsahoval důlky po vytrhnutí kuliček grafitu. Laserovým leštěním nelze tyto důlky ignorovat, a proto je třeba povrch přetavit do takové hloubky, aby tyto důlky byly eliminovány. Eliminace důlků proběhla úspěšně. Celkový lesk povrchu se úpravou v ochranné atmosféře zvýšil a parametry drsnosti povrchu se také blíží ručně leštěným vzorkům. Vlivem vysokého tepelného namáhání při přetavování vznikly na povrchu praskliny, které jsou ve většině případů iniciované na kuličkách grafitu viz kapitola 4.8. Důvodem vzniku prasklin jsou strukturální změny, při kterých se výchozí litina s kuličkovým grafitem v povrchové vrstvě přibližně 85  $\mu\text{m}$  mění na litinu cementitickou, jejíž vlastnosti jsou velice odlišné. Převážně její mikrotvrdost byla změřena téměř trojnásobná. Vzhledem k takovému nárůstu tvrdosti narůstá také křehkost této vrstvy a dochází k iniciaci a rozšíření prasklin.

Vytyčené cíle diplomové práce byly naplněny a byly navrženy technologické parametry laserového leštění, jimiž se lze přiblížit referenčnímu ručně leštěnému povrchu.

## 7 Literatura

- [1] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění 3. díl. 2. vydání*. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [2] *Polishing of mould steel*. 6. EU: Halmstad University in Sweden, 2014. UDDEHOLM 140701.300 / STROKIRK KNAPPEN 1407.
- [3] ŠTEFAN, Vojtěch. *Filtrace dat při měření drsnosti povrchu*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Zdeněk Pospěch.
- [4] GADELMAWLA, E.S., M.M. KOURA, T.M.A. MAKSOU, I.M. ELEWA a H.H. SOLIMAN. Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2002, **123**(1), 133-145 [cit. 2022-02-01]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(02)00060-2
- [5] CLUETT, John. *Cleanability of Certain Stainless Steel Finishes in the Brewing Process*. Johannesburg, 2001. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.36752.10246 Disertační práce. University of Johannesburg.
- [6] ČSN EN ISO 4287: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Český normalizační institut, 1999.
- [7] *MarSurf. Parametry drsnosti povrchu* [online]. Proboštov, ČR: Mahr, spol s.r.o [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910230/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>
- [8] OLYMPUS. In: *Olympus* [online]. USA: Olympus corporation [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: [https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms\[focus\]=cmsContent14708](https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/#!cms[focus]=cmsContent14708)
- [9] BHUSNAN, Bharat. Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques. *Modern Tribology Handbook, Two Volume Set: Surface*

- Roughness Analysis and Measurement Techniques*. 1. Ohio, USA: CRC Press, 2001, s. 49-121. ISBN 9780849384035.
- [10] MX Surface Texture Parameters. In: *Zygo* [online]. Zygo corporation, 2017 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/files/zygo.pdf>
- [11] *ASME B46.1-2009: Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)*. New York, USA: IHS, 2009.
- [12] HORVÁTH, Richárd, Ágota DRÉGELYI-KISS a Gyula MÁTYÁSI. The examination of surface roughness parameters in the fine turning of hypereutectic aluminium alloys. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2015, **77**, 205-216.
- [13] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [14] HE, Baofeng, Siyuan DING a Zhaoyao SHI. A comparison between profile and areal surface roughness parameters. *Metrology and Measurement Systems*. Polish Academy of Sciences Committee on Metrology and Scientific Instrumentation, 2021, **28**(3), 413. Dostupné z: doi:10.24425/mms.2021.137133
- [15] Alicona's optical roughness measurement. In: *Alicona* [online]. Graz, Austria, 2021 [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: [https://www.alicon.com/fileadmin/user\\_upload/Alicona/Downloads/Pocketposter\\_Roughness\\_Measurement\\_EN.pdf](https://www.alicon.com/fileadmin/user_upload/Alicona/Downloads/Pocketposter_Roughness_Measurement_EN.pdf)
- [16] SLANEC, Karel. *Základy konstruování: geometrická přesnost*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-010-1494-0.
- [17] KUNDRÁK, J., K. GYANI a V. BANA. Roughness of ground and hard-turned surfaces on the basis of 3D parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2008, **38**(1-2), 110-119 [cit. 2022-03-04]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-007-1086-9
- [18] HAMDÍ, Amine, Sidi Mohammed MERGHACHE a Toufik ALIOUANE. Effect of cutting variables on bearing area curve parameters (BAC-P) during

- hard turning process. *Czasopisma PAN* [online]. 2020, **2020** [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: doi:10.24425/ame.2020.131684
- [19] BLATEYRON, François. The Areal Field Parameters. *Characterisation of Areal Surface Texture* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, **2013**, 15-43 [cit. 2022-05-30]. ISBN 978-3-642-36457-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-36458-7\_\_2
- [20] REBEGGIANI, Sabina, A SANDBERG a Bengt-Göran ROSÉN. *Tool steel polishing and topography characterization*. 2007.
- [21] REBEGGIANI, Sabina. *On Polishability of Tool Steels*. 1. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology Department of Materials and Manufacturing Technology, 2013. ISBN 978-91-7385-828-1.
- [22] KERKSTRA, Randy a Steve BRAMMER. *Injection molding advanced troubleshooting guide*. Munich: Hanser Publishers, 2018. ISBN 978-1-56990-645-3.
- [23] ZHOU, Jing, Hong SHEN, Yiwei LIN, Conghao LIAO a Qinghua YU. Microstructural evolution during multiple scans in laser polishing of Ti6Al4V. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2022, **75**, 1202-1216 [cit. 2022-03-15]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2022.01.072
- [24] DUŠEK, Jiří. *Tvrdomost, mikrotvrdomost, nanotvrdomost – čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. Disertační práce. Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Vladislav Navrátil.
- [25] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [26] SKOČOVSKÝ, Petr, Otakar BOKŮVKA, Radomila KONEČNÁ a Eva TILLOVÁ. *Náuka o materiálu pro obory strojnictví*. 1. Žilina: EDIS, 2001. ISBN 80-7100-831-1.
- [27] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.

- [28] HOLMGREN, D. Thermal conductivity of cast iron influences of microstructure on the thermal conductivity of cast iron. *Doktorsavhandlingar vid Chalmers Tekniska Hogskola*. 2006, 1-67.
- [29] WILLENBORG, E., K. WISSENBACH a Reinhart POPRAWA. Polishing by laser radiation. *Proceedings of the Second International WLT Conference on Lasers in Manufacturing*. 2003, 297-300.
- [30] KRISHNAN, Arun a Fengzhou FANG. Review on mechanism and process of surface polishing using lasers. *Frontiers of Mechanical Engineering* [online]. 2019, 14(3), 299-319 [cit. 2022-03-15]. ISSN 2095-0233. Dostupné z: doi:10.1007/s11465-019-0535-0
- [31] PERRY, Tyler, Dirk WERSCHMOELLER, Xiaochun LI, Frank PFEFFERKORN a Neil DUFFIE. *Micromelting for Laser Micro Polishing of Meso/Micro Metallic Components*. 2007. Dostupné z: doi:10.1115/MSEC2007-31173
- [32] RAJA, R Samuel Sanjay, P SELVAKUMAR, P Dinesh BABU, B Jacob RUBASINGH a K SURESH. Influence of laser parameters on superhydrophobicity- A review. *Engineering Research Express* [online]. 2021, 3(2) [cit. 2022-03-17]. ISSN 2631-8695. Dostupné z: doi:10.1088/2631-8695/abf35f
- [33] HAMADI, F., El-Hachemi AMARA a H. KELLOU. *Optimization of laser marking process parameters for surface roughness and surface reflectance*. 2017.
- [34] PASCHOTTA, Rüdiger. Pulse Duration. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-03-17]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/pulse\\_duration.html](https://www.rp-photonics.com/pulse_duration.html)
- [35] HAMAD, Abubaker. *Effects of Different Laser Pulse Regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the Ablation of Materials for Production of Nanoparticles in Liquid Solution*. 2016, s. 21. ISBN 978-953-51-2606-5. Dostupné z: doi:10.5772/63892
- [36] JAECCI, B., B. NEUENSCHWANDER, M. SCHMID, M. MURALT, J. ZUERCHER a U. HUNZIKER. Influence of the Pulse Duration in the ps-Regime on the

- Ablation Efficiency of Metals. *Physics Procedia* [online]. 2011, **12**, 164-171 [cit. 2022-03-17]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2011.03.118
- [37] LEITZ, Karl-Heinz, Benjamin REDLINGSHÖFER, Yvonne REG, Andreas OTTO a Michael SCHMIDT. Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses. *Physics Procedia* [online]. 2011, **12**, 230-238 [cit. 2022-04-09]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2011.03.128
- [38] Pulsed Lasers Introduction to Power and Energy Calculations. In: *Thorlabs* [online]. Newton, New Jersey, United States, c1999-2022 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/images/tabimages/Laser\\_Pulses\\_Power\\_Energy\\_Equations.pdf](https://www.thorlabs.com/images/tabimages/Laser_Pulses_Power_Energy_Equations.pdf)
- [39] BUCHFINK, Gabriela, Nikola LEIBINGER-KAMMÜLLER, ed. *The Laser as a Tool*. 1. vydání. Vogel Communications Group, 2007. ISBN 978-3-8343-3072-7.
- [40] DING, Josh, Mark GITIN a Jim KAFKA. *MKS INSTRUMENTS HANDBOOK: Principles and Applications in Photonics Technologies*. Office of the CTO, 2019. Dostupné také z: [https://www.newport.com/mam/celum/celum\\_assets/resources/MKS\\_PHOTONICS\\_HANDBOOK.pdf](https://www.newport.com/mam/celum/celum_assets/resources/MKS_PHOTONICS_HANDBOOK.pdf)
- [41] RUSS, S., R. GEBS a L. BAUER. Shorter than short: How does the pulse duration influence the process efficiency of conductive materials?. *Lasers in Manufacturing Conference 2015* [online]. 2015 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: [https://www.wlt.de/lim/Proceedings2015/Stick/PDF/Contribution161\\_final.pdf](https://www.wlt.de/lim/Proceedings2015/Stick/PDF/Contribution161_final.pdf)
- [42] PADMANABHAM, G. a B. SHANMUGARAJAN. *Laser-Assisted Fabrication Materials*. Germany: Springer, 2013.
- [43] PALNEEDI, Haribabu, Jung Hwan PARK, Deepam MAURYA et al. Laser Irradiation of Metal Oxide Films and Nanostructures: Applications and

- Advances. *Advanced Materials* [online]. 2018, **30**(14) [cit. 2022-03-20]. ISSN 0935-9648. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201705148
- [44] HASHMI, Saleem. *Comprehensive materials processing*. Newnes, 2014. ISBN 0080965334.
- [45] ČERMÁK, Adam. *LASER v procesech mikroobrábění monolitních řezných nástrojů*. Plzeň, 2017. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta strojní.
- [46] BRUECKNER, Frank, Mirko RIEDE, Michael MÜLLER et al. Enhanced manufacturing possibilities using multi-materials in laser metal deposition. *Journal of Laser Applications* [online]. 2018, **30**(3) [cit. 2022-06-14]. ISSN 1042-346X. Dostupné z: doi:10.2351/1.5040639
- [47] SILFVAST, William Thomas. *Laser fundamentals*. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. ISBN 978-0521541053.
- [48] PASCHOTTA, Rüdiger. Rayleigh Length. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/rayleigh\\_length.html](https://www.rp-photonics.com/rayleigh_length.html)
- [49] PASCHOTTA, Rüdiger. M2 Factor. In: *RP Photonics Encyclopedia* [online]. [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/m2\\_factor.html](https://www.rp-photonics.com/m2_factor.html)
- [50] HAJNOVÁ, Anna. *Diagnostika laserových svazků*. Olomouc, 2010. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci. Vedoucí práce Zdeněk Bouchal.
- [51] RÖMER, G.R.B.E. a P. BECHTOLD. Electro-optic and Acousto-optic Laser Beam Scanners. *Physics Procedia* [online]. 2014, **56**, 29-39 [cit. 2022-03-28]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2014.08.092
- [52] JOFRE, M., G. ANZOLIN, F. STEINLECHNER, N. OLIVERIO, J. P. TORRES, V. PRUNERI a M. W. MITCHELL. Fast beam steering with full polarization control using a galvanometric optical scanner and polarization controller. *Optics Express* [online]. 2012, **20**(11) [cit. 2022-03-28]. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.20.012247

- [53] UNDERSTANDING LASER AUTOMATION – AXIS CONTROL. In: *Controllaser* [online]. Orlando, Florida: Control Laser Corporation, 2021 [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.controllaser.com/blog/2018/12/11/understanding-laser-automation-axis-controls/>
- [54] SCHNELL, Georg, Ulrike DUENOW a Hermann SEITZ. Effect of Laser Pulse Overlap and Scanning Line Overlap on Femtosecond Laser-Structured Ti6Al4V Surfaces. *Materials* [online]. 2020, **13**(4) [cit. 2022-03-28]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13040969
- [55] TAYLOR, Lauren L. *Ultrafast Laser Polishing for Optical Fabrication*. Rochester, 2019. Disertační práce. Rochester Institute of Technology.
- [56] SASSMANNSHAUSEN, Astrid, Andreas BRENNER a Johannes FINGER. Ultrashort pulse laser polishing by continuous surface melting. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2021, **293** [cit. 2022-04-09]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2021.117058
- [57] BRENNER, Andreas, Leon RÖTHER, Martin OSBILD, Johannes FINGER, Udo KLOTZBACH, Rainer KLING a Akira WATANABE. Laser polishing using ultrashort pulse laser. *Laser-based Micro- and Nanoprocessing XIV* [online]. SPIE, 2020, 23- [cit. 2022-04-09]. ISBN 9781510632998. Dostupné z: doi:10.1117/12.2551481
- [58] OSBILD, M., A. BRENNER, L. RÖTHER a J. FINGER. Ultrashort pulse laser micro polishing of steel – Investigation of the melt pool depth. *Procedia CIRP* [online]. 2020, **94**, 936-941 [cit. 2022-04-09]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2020.09.094
- [59] METZNER, Daniel, Peter LICKSCHAT a Steffen WEIßMANTEL. High-quality surface treatment using GHz burst mode with tunable ultrashort pulses. *Applied Surface Science* [online]. 2020, **531** [cit. 2022-04-09]. ISSN 01694332. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2020.147270
- [60] BiBurst option: Tunable GHz and MHz Burst with Burst-in-Burst Capability. In: *Light Conversion* [online]. Lithuania: Light Conversion,



- 2022 [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: [https://lightcon.com/wp-content/uploads/datasheets/Light\\_Conversion-Tunable\\_GHz\\_and\\_MHz\\_Burst\\_with\\_Burst-in-Burst\\_Capability-20220105.pdf](https://lightcon.com/wp-content/uploads/datasheets/Light_Conversion-Tunable_GHz_and_MHz_Burst_with_Burst-in-Burst_Capability-20220105.pdf)
- [61] KUMSTEL, Judith, John FLEMMER a André TEMMLER. Laser Polishing of Metallic Freeform Surfaces. *Proceedings of the 4M/ICOMM2015 Conference* [online]. Singapore: Research Publishing Services, 2015, **2017**, 352-355 [cit. 2022-04-09]. ISBN 978-981-09-4609-8. Dostupné z: doi:10.3850/978-981-09-4609-8\_089
- [62] BORDATCHEV, Evgueni V., Abdullah M. K. HAFIZ a O. Remus TUTUNEA-FATAN. Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2014, **73**(1-4), 35-52 [cit. 2022-04-09]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-014-5761-3
- [63] CHOW, Michael T. C., Evgueni V. BORDATCHEV a George K. KNOFF. Experimental study on the effect of varying focal offset distance on laser micropolished surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, **67**(9-12), 2607-2617 [cit. 2022-04-10]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-012-4677-z
- [64] BUSTILLO, Andrés, Eneko UKAR, Juan José RODRIGUEZ a Aitzol LAMIKIZ. Modelling of process parameters in laser polishing of steel components using ensembles of regression trees. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* [online]. 2011, **24**(8), 735-747 [cit. 2022-04-10]. ISSN 0951-192X. Dostupné z: doi:10.1080/0951192X.2011.574155
- [65] HAFIZ, Abdullah Mohammad Khalid. *Applicability of a Picosecond Laser for Micro-Polishing of Metallic Surfaces*. Ontario, Canada, 2013. Disertační práce. The University of Western Ontario.
- [66] HAFIZ, Abdullah M. Khalid, Evgueni V. BORDATCHEV a Remus O. TUTUNEA-FATAN. Influence of overlap between the laser beam tracks

- on surface quality in laser polishing of AISI H13 tool steel. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2012, **14**(4), 425-434 [cit. 2022-04-10]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2012.09.004
- [67] ĆWIKŁA, Michał, Robert DZIEDZIC a Jacek REINER. Influence of Overlap on Surface Quality in the Laser Polishing of 3D Printed Inconel 718 under the Effect of Air and Argon. *Materials* [online]. 2021, **14**(6) [cit. 2022-04-10]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14061479
- [68] UKAR, Eneko, Aitzol LAMIKIZ, Silvia MARTÍNEZ, Fernando ESTALAYO a Iván TABERNERO. Laser Polishing of GGG70L Cast Iron with 2D Scan-head. *Procedia Engineering* [online]. 2013, **63**, 53-59 [cit. 2022-06-16]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2013.08.199
- [69] RYBKA, Pavel. *Porovnání opotřebení nástroje pro vybrané tvary ostrých designových hran*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta strojní.
- [70] *G4 Pulsed Fiber Laser Specification: SPI Lasers*. UK: SPI Lasers, 2017.
- [71] Alicona products. In: *Bruker Alicona* [online]. Graz, Austria: Bruker Alicona, 2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.alicon.com/en/products/infinitefocus/>
- [72] *Keyence 3D Laser Scanning Confocal Microscope VK-X Series*. Belgium, 2018.
- [73] Argon 5.0. In: *Linde Gas a.s.* [online]. Linde, 2022 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.linde-gas.cz/shop/cs/cz-ig/plyny-a-z/argon/argon-50-tlakov%C3%A1-lahev-262-1>

## 8 Seznam použitých zkratek a symbolů

A	Plocha pro vyhodnocení plošné drsnosti povrchu	[m <sup>2</sup> ]
Ag	Stříbro	
Al	Hliník	
Au	Zlato	
c	Označení výšky při měření parametru drsnosti R <sub>mr</sub>	[m]
Cu	Měď	
d	Úhlopříčný rozměr vtisku při zkoušce dle Vickerse	[m]
E <sub>p</sub>	Energie v pulzu	[J]
F	Zatěžovací síla	[N]
f	Ohnisková vzdálenost	[m]
F(r)	Intenzita energie ve vzdálenosti r od osy svazku	[J/m <sup>2</sup> ]
F <sub>0</sub>	Špičková intenzita energie	[J/m <sup>2</sup> ]
Fe-Fe <sub>3</sub> C	Železo – Karbid železa	
f <sub>rep</sub>	Opakovací frekvence	[Hz]
H	Překryv paprsků kolmo ke směru skenování	[%]
hm. %	Hmotnostních procent	
h <sub>t</sub>	Hloubka ostrosti	[m]
HV	Označení tvrdosti dle Vickerse	
I(0)	Intenzita záření těsně pod povrchem materiálu	[J/m <sup>2</sup> ]
I(z)	Intenzita záření v hloubce z	[J/m <sup>2</sup> ]
k <sub>e</sub>	Extinkční koeficient	
l	Délka měřeného úseku pro vyhodnocení profilové drsnosti povrchu	[m]
M <sup>2</sup>	Parametr popisující kvalitu laserového svazku	
P profil	Označení základního profilu	
P	Výkon	[W]
P <sub>avg</sub>	Průměrný výkon laseru	[W]
P <sub>peak</sub>	Špičkový výkon laseru	[W]
R profil	Označení profilu drsnosti	
r	Vzdálenost od osy svazku	[m]
R <sub>a</sub>	Střední hodnota drsnosti povrchu profilu	[m]

$R_k$	Plocha hlavní drsnosti	[m]
$R_{mr}$	Materiálový podíl drsnosti povrchu	[%]
$R_{pk}$	Objem materiálu v peakových oblastech drsnosti	[m]
$R_{sm}$	Průměrná šířka prvků profilu	[m]
$R_{vk}$	Oblast prohlubní	[m]
$R_z$	Výška nerovností profilu z 10 bodů	[m]
$S_a$	Střední hodnota drsnosti povrchu plochy	[m]
$S_p$	Překryv paprsků ve směru skenování	[%]
$S_{xp}$	Extrémní výška peaku	[m]
$S_z$	Výška nerovností plochy z 10 bodů	[m]
$t$	čas	[s]
$T_M$	Teplota tavení	[K]
$T_V$	Teplota vaporizace	[K]
$v$	Skenovací rychlost	[m/s]
W profil	Označení profilu vlnitosti	
WF	Waveforma	
WFO	Waveforma s označením 0	
$x$	Označení souřadnice na vodorovné ose	
$X_{s_i}$	i-tá délka periody při měření parametru $R_{sm}$	[m]
$y_{pm_i}$	Výška i-tého nejvyššího výstupku profilu	[m]
$y_{vm_i}$	Hloubka i-té největší prohlubně profilu	[m]
$z$	Hloubka pod povrchem materiálu	[m]
$Z$	Odchylka od fokusační vzdálenosti	[m]
$Z(x)$	Výška profilu v místě $x$	[m]
$Z(x;y)$	Výšková souřadnice na místě $x; y$	[m]
$z_R$	Rayleigho vzdálenost	[m]
$\alpha$	Absorpční koeficient	
$\delta$	Penetrační hloubka	[m]
$\Delta d$	Mezera mezi pulzy kolmo ke směru skenování	[m]
$\theta$	Divergentní úhel	[°]
$\lambda$	Vlnová délka	[m]
$\lambda_c$	Krátkovlnný filtr definující rozdíl mezi drsností a vlnitostí	

$\lambda_f$	Dlouhovlnný filtr definující rozdíl mezi vlnitostí a tvarem	
$\lambda_s$	Krátkovlnný filtr definující rozdíl mezi nejkratšími složkami profilu a drsností	
T	Perioda	[s]
$\tau_p$	Délka pulzu	[s]
$\omega(z)$	Poloměr svazku ve vzdálenosti z od pasu svazku	[m]
$\omega_0$	Poloměr svazku v ohnisku	[m]

## 9 Seznam Obrázků

Obr. 1 – Faktory ovlivňující kvalitu povrchu výsledného výrobku [2] .....	4
Obr. 2 – Základní profil, profil vlnitosti a profil drsnosti [3] .....	5
Obr. 3 – Grafické znázornění výpočtu $R_a$ [8] .....	6
Obr. 4 – Schéma pro stejné hodnoty parametru $R_a$ na různých profilech [9] .....	6
Obr. 5 – Grafické znázornění významu parametru plošné drsnosti povrchu $S_a$ [8] .....	7
Obr. 6 – Definice výšky nerovností profilu z deseti bodů (ten-point height parameter) [4] .....	8
Obr. 7 – Abbottova – Firestonova křivka [18] .....	9
Obr. 8 – Schéma zkoušky tvrdosti podle Vickerse [25] .....	11
Obr. 9 – Rozdělení laserového leštění [29] .....	13
Obr. 10 – Zobrazení délky pulzu (upraveno) [35] .....	14
Obr. 11 – Interakce dlouhých a krátkých pulzů s materiálem [37] .....	15
Obr. 12 – Závislost absorpce na vlnové délce pro různé materiály [46] .....	18
Obr. 13 – Diagram popisující parametry Gaussovského svazku (vlevo) a normalizované záření svazku v závislosti na radiální vzdálenosti (vpravo) (upraveno) [40] .....	19
Obr. 14 – Schématická konstrukce galvo skeneru (upraveno) [51] .....	20
Obr. 15 – Schématické zobrazení parametrů překryvu (upraveno) [54] .....	21
Obr. 16 – Schéma vývoje teploty na povrchu materiálu v čase při tepelné akumulaci [56] .....	22
Obr. 17 – Možnost nastavení BiBurst módu od společnosti Light Conversion [60] .....	23
Obr. 18 – Schéma vývoje teploty na povrchu materiálu v čase při technologii tepelné akumulace s využitím burst módu [57] .....	24
Obr. 19 – Schématické zobrazení technologie přetavování povrchu [62] ...	25
Obr. 20 – Schématická reprezentace režimů působení laserového svazku v závislosti na odchylce od fokusační vzdálenosti [65] .....	27
Obr. 21 – Srovnání laserem leštěného povrchu (vlevo) a původního povrchu (vpravo) litiny s kuličkovým grafitem [68] .....	29
Obr. 22 – Ilustrační fotografie poskytnutých vzorků pro laserové leštění ...	31

Obr. 23 – a) 2D sken, b) výšková mapa, c) 3D sken učně leštěného referenčního povrchu materiálu EN – GJS 2070 .....	32
Obr. 24 – Měření důlků na ručně leštěném povrchu .....	32
Obr. 25 – Porovnání profilu ručně leštěného vzorku (b) a frézovaného vzorku (c), vizualizace obráběného povrchu k vyleštění (a).....	34
Obr. 26 – Abbottova-Firestonova křivka z měření neleštěného frézovaného povrchu.....	35
Obr. 27 – Abbottova-Firestonova křivka z měření referenčního ručně leštěného vzorku .....	35
Obr. 28 – Laserová stanice Master 1 .....	36
Obr. 29 – Specifikace nastavitelných waveforem a závislost energie v pulzu na opakovací frekvenci pro WFO [70].....	37
Obr. 30 – Optický mikroskop Alicona Infinite Focus G5 [71] .....	37
Obr. 31 – Konfokální mikroskop Keyence VK X–1000 [72] .....	38
Obr. 32 – Aplikace argonové ochranné atmosféry tryskou.....	39
Obr. 33 – Srovnání použití ochranné atmosféry formou ofuku (vlevo) a formou argonové komory (vpravo).....	40
Obr. 34 – Rozložení dvou dílů ochranné argonové komory na tiskové podložce ve sliceru Ultimaker Cura .....	40
Obr. 35 – Šroub s osovou dírou pro napojení ochranné atmosféry do 3D tištěné komory .....	40
Obr. 36 – Instalace komory pro ochrannou atmosféru do laserové stanice Master 1 .....	41
Obr. 37 – Závislost průměru laserového spotu na velikosti odchylky od fokusační vzdálenosti .....	42
Obr. 38 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku č. 5 .....	43
Obr. 39 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku č. 5 .....	44
Obr. 40 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku č. 25 .....	45
Obr. 41 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku č. 25 .....	46
Obr. 42 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku č. 54 .....	47
Obr. 43 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku č. 54 .....	47
Obr. 44 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku č. 73 .....	49

Obr. 45 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku č. 73.....	49
Obr. 46 – Rozložení výkonů, rychlostí skenování a odchylek od fokusační vzdálenosti při plně faktoriálním experimentu formou matic.....	51
Obr. 47 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením Z2–80–20 .....	52
Obr. 48 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením Z2–80–20.....	52
Obr. 49 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením Z4–90–20 .....	54
Obr. 50 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením Z4–90–20.....	54
Obr. 51 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením Z6–110–20 .....	55
Obr. 52 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením Z6–110–20 .....	56
Obr. 53 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením Z8–130–20 .....	57
Obr. 54 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením Z8–130–20 .....	57
Obr. 55 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením Z10–150–20 .....	59
Obr. 56 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením Z10–150–20 .....	59
Obr. 57 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením Z12–160–20 .....	60
Obr. 58 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením Z12–160–20 .....	61
Obr. 59 – Vzorek č. 105 po prvním přejezdu při laserovém leštění.....	62
Obr. 60 – Vzorek č. 105 po druhém přejezdu při laserovém leštění .....	63
Obr. 61 – Porovnání shodného místa na vzorku č. 105 po prvním přejezdu (vlevo) a druhém přejezdu (vpravo) .....	64



Obr. 62 – Prezence dosaženého lesku na vzorku č. 105 s rozměrem 4x4 mm .....	65
Obr. 63 – Sken z konfokálního mikroskopu vzorku s označením č. 107 .....	66
Obr. 64 – Abbottova-Firestonova křivka z měření vzorku s označením č. 107 .....	66
Obr. 65 – Rozložení struktury materiálu po přetavení .....	68
Obr. 66 – Rozložení vtisků pro měření mikrotvrlosti pod laserově leštěným povrchem materiálu .....	69
Obr. 67 – Průběh mikrotvrlosti dle Vickerse v závislosti na vzdálenosti od povrchu vzorku .....	70
Obr. 68 – Iniciační trhliny na kuličkovém grafitu .....	70
Obr. 69 – Schéma shrnující experimentální část práce .....	71

## 10 Seznam tabulek

Tab. 1 – Přehled dosažených výsledků leštění pomocí ultra krátkopulzních laserů [56], [57], [58].....	25
Tab. 2 – Přehled dosažených výsledků pomocí nanosekundových laserů [63], [64], [66], [67].....	28
Tab. 3 – Naměřené hodnoty průměrů a hloubek důlků po kuličkovém grafitu .....	33
Tab. 4 – Vyhodnocení parametrů drsnosti dodaných vzorků materiálu EN – GJS 2070 .....	34
Tab. 5 – Výsledky měření referenčních hodnot $S_{xp}$ .....	35
Tab. 6 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek č. 5 .....	44
Tab. 7 – Výsledky měření drsnosti vzorku č. 5.....	44
Tab.8 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek č. 25.....	46
Tab. 9 – Výsledky měření drsnosti vzorku č. 25 .....	46
Tab. 10 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek č. 54 .....	48
Tab. 11 – Výsledky měření drsnosti vzorku č. 54.....	48
Tab. 12 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek č. 73 .....	49
Tab. 13 – Výsledky měření drsnosti vzorku č. 73.....	50
Tab. 14 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek s označením Z2–80–20.....	52
Tab. 15 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením Z2–80–20 .....	53
Tab. 16 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek s označením Z4–90–20.....	54
Tab. 17 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením Z4–90–20 .....	55
Tab. 18 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek s označením Z6–110–20 .....	56
Tab. 19 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením Z6–110–20.....	56
Tab. 20 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek s označením Z8–130–20 .....	58
Tab. 21 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením Z8–130–20.....	58
Tab. 22 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek s označením Z10–150–20 .....	59

Tab. 23 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením Z10–150–20 .....	60
Tab. 24 – Použité parametry laserového leštění pro vzorek s označením Z12–160–20 .....	61
Tab. 25 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením Z12–160–20 .....	61
Tab. 26 – Parametry použité pro tvorbu povrchu vzorku č. 105 .....	63
Tab. 27 – Měřené parametry drsnosti povrchu po prvním a druhém přejezdu laserového svazku na vzorku č. 105 .....	64
Tab. 28 – Parametry použité pro tvorbu povrchu vzorku č. 107 .....	66
Tab. 29 – Výsledky měření drsnosti vzorku s označením č. 107 .....	67
Tab. 30 – Finální porovnání hodnot parametrů drsnosti .....	72