

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití povrchového leštění s ohledem na vlastnosti povrchu 3D
tištěných dílů

Autor: **Bc. Martin Bureš**

Vedoucí práce: **doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Martin BUREŠ
Osobní číslo:	S18N0036P
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie – technologie obrábění
Téma práce:	Využití povrchového leštění s ohledem na vlastnosti povrchu 3D tištěných dílů
Zadávací katedra:	Katedra technologie obrábění

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh a realizace vlastních experimentů
4. Zhodnocení výsledků a doporučení
5. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

- STEEN, William M. a MAZUMDER, Jyotirmoy. *Laser material processing*. 4th ed. London: Springer, 2010. xvii, 558 s. ISBN 978-1-84996-061-8
- KANNATEY-ASIBU, Elijah. *Principles of laser materials processing*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. xxvi, 819 s. ISBN 978-0-470-17798-3
- GIBSON, Ian, ROSEN, David a STUCKER, Brent. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Second edition. New York: Springer, 2015. xxi, 498 stran. ISBN 978-1-4939-2112-6
- CHUA, Chee Kai a LEONG, Kah Fai. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. The 4th edition of Rapid prototyping: principles and applications. New Jersey: World Scientific, 2015. xxviii, 518 stran. ISBN 978-981-4571-41-8

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Jiří Martan, Ph.D.**
Nové technologie – výzkumné centrum
Datum zadání diplomové práce: **16. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 16. října 2019

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovy své diplomové práce doc. Ing. Jířímu Martanovi, Ph.D. Velké díky také patří celé laboratoři LaserApplikationsZentrum na vysoké škole v Aalenu, která mi umožnila provést experimenty. Obzvláště velké díky patří MSc. Max – Jonathan Kleefoot, který mi pomáhal s experimenty týkající se laserové aplikace. V neposlední řadě bych rád poděkoval celé své rodině, že mi umožnila nejen finančně dostudovat vysokou školu, ale byla mi i oporou po celou dobu své studie.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bureš	Jméno Martin	
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie – technologie obrábění		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Využití povrchového leštění s ohledem na vlastnosti povrchu 3D tištěných dílů		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	74	TEXTOVÁ ČÁST	62	GRAFICKÁ ČÁST	12
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato práce pojednává o aplikaci laserového leštění na součásti tisknuté pomocí 3D tisku a odstraněním jejich povrchových nedostatků. Teoretická část je zaměřena především na lasery obecně, na procesní parametry laseru a na 3D tisk. Cílem bylo zredukovat povrchovou drsnost a odstranit nedostatky na povrchu po 3D tisku a následně provedení komplexní analýzy materiálových změn po aplikaci laserového leštění.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">Laserové leštění, 3D tisk, procesní parametry, materiálové zkoušky, drsnost povrchu, CW laser</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Bureš	Name Martin	
FIELD OF STUDY	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Application of laser polishing with respect to surface properties of 3D printed parts		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	74	TEXT PART	62	GRAPHICAL PART	12
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis is concentrated on application of laser polishing and removal of surface impurities after 3D printing. The theoretical part is focused on lasers in general, on proces parameters and on 3D printing. The aim of this work was to reduce surface roughness and do komplex analysis of material changes after laser polishing.
KEY WORDS	Laser polishing, 3D printing, proces parameters, materiál testing, surface roughness, CW laser

Obsah

1	Úvod.....	14
1.1	Cíl práce.....	14
2	Rozbor současného stavu	15
2.1	Úvod do problematiky laserové technologie	15
2.1.1	Spontánní emise, stimulovaná emise a absorpce	15
2.1.2	Vlastnosti laseru	17
2.1.3	Typy laseru a jejich části	18
2.2	Interakce laseru s materiálem	20
2.2.1	Propagace světla v materiálu.....	20
2.2.2	Mechanismus energetické absorpce	21
2.2.3	Šíření tepla v materiálu	22
2.3	Parametry laseru a jejich vliv na interakci laseru s materiálem	23
2.3.1	Pulzní a CW režim	23
2.3.2	Délka pulzu	24
2.3.3	Procesní parametry	25
2.3.4	Poloha laserového spotu.....	28
2.4	Laserové leštění pomocí přetavení povrchu	29
2.5	Úvod do problematiky aditivní výroby	30
2.5.1	Typy defektů vznikající během aditivní výroby.....	31
3	Návrh a realizace experimentů	34
3.1	Použité zařízení k pro zhotovení a vyhodnocení experimentů	34
3.2	Obráběný materiál	36
3.3	Návrh a tisk vzorků pro experimenty	36
3.4	Změření průběhu laserového spotu.....	40
3.5	Očištění tištěných vzorků před aplikací laserového leštění.....	43
3.6	Využití ochranné atmosféry při laserovém leštění	44
3.7	Nalezení vhodného parametru z pohledu drsnosti.....	45

3.7.1	Nalezení vhodného parametru u vzorků tisknutých pod úhlem 90 stupňů (kolmo na platformu)	46
3.7.2	Nalezení vhodného parametru u vzorků tisknutých pod úhlem 45 stupňů	50
3.7.3	Nalezení vhodného parametru u vzorků s povrchem rovnoběžným s platformou	52
3.8	Aplikace laserových parametrů na vzorky určené pro materiálové zkoušky, provedení materiálových zkoušek a následné vyhodnocení.....	54
3.8.1	Únavová zkouška	54
3.8.2	Zkouška tahem	58
3.8.3	Metalografický výbrus a zkouška tvrdosti	61
3.8.4	Měření zbytkového napětí na povrchu vzorků metodou XRD	65
3.8.5	Tribologické zkoušky	66
4	Zhodnocení výsledků a doporučení.....	67
5	Závěr.....	70

Seznam zkratk

DMLS	direct metal laser sintering – technologie 3D tisku kovů
CAD	počítačem podporované kreslení
3D	trojrozměrný prostor
E	energetická hladina
Nd: Yag	aktivním materiálem je izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu dopovaný o ionty neodymu
N ₂	dusík
He	helium
CW	kontinuální délka pulzu
AM	aditivní výroba
RP	rapid prototyping
XRD	rentgenová difrakce
CNC	počítačem řízený obráběcí stroj
FWHM	full width at half maximum – plná tloušťka v polovině maxima
MS1	Prášková nástrojová ocel určená pro tisk metodou DMLS třídy 19
DOF	hloubku fokusu
IFM – G4	infinite focus measurement
HAZ	tepelně ovlivněná oblast
HV1	zkouška dle Vickerse se zatížením 1 kp
HV10	zkouška dle Vickerse se zatížením 10 kp

Seznam veličin a jednotek

h	[J*s]	Plancova konstanta
f	[Hz]	frekvence
E	[J]	energetická hladina
R	[-]	koeficient odrazivosti
θ _i	[°]	úhel dopadu

$I(z)$	[W/m]	intenzita světla v závislosti na hloubce
I_0	[W/m]	intenzita na povrchu
α	[-]	absorpční koeficient
z	[m]	hloubka penetrace
l_T	[m]	délka tepelné difuze
D	[m ² /s]	tepelná difuzivita
τ	[s]	délka pulzu
P	[W]	velikost výkonu
S	[m ²]	obsah plocha
E	[J]	energie
v	[m/s]	rychlost
d	[mm]	průměr spotu
SP	[%]	stupeň překrytí
λ	[nm]	vlnová délka
R_a	[μ m]	střední aritmetická úchylka povrchu
R_q	[μ m]	střední kvadratická odchylka profilu
R_z	[μ m]	největší výšku profilů z naměřených 10 bodů
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti
A	[%]	tažnost
LO	[%]	boční překrytí laserových stop
t_{line}	[s]	čas, za který se laserový svazek posune za délku L_{line}
L_{line}	[m]	délka jedné drážky

Seznam obrázků

Obr. 1 Grafické vyobrazení spontánní emise [3]	16
Obr. 2 Grafické vyobrazení stimulované emise [3]	16
Obr. 3 Grafické vyobrazení absorpce [3]	17
Obr. 4 Schéma částí Nd:Yag laseru buzený pomocí lampy [5]	18
Obr. 5 Schéma částí CO ₂ laseru buzený metodou RF [5]	19
Obr. 6 Závislost hloubky optické penetrace na materiálu a vlnové délce [10]	21
Obr. 7 Grafické znázornění CW a pulzního režimu [12]	23
Obr. 8 Interakce laseru s materiálem v závislosti na délce pulzu [16].....	25
Obr. 9 Rozdíl v obrábění pomocí nanosekundového a femtosekundového laseru [17].....	25
Obr. 10 Vliv špičkového výkonu na hloubku a šířku ovlivněné oblasti [19].....	26
Obr. 11 Pohled v řezu na velikost a tvar ovlivněné oblasti [19]	27
Obr. 12 Grafické znázornění překrytí laserových stop [21].....	28
Obr. 13 Závislost stupně překrytí na topologii povrchu [20].....	28
Obr. 14 Parametry laserového paprsku [23].....	28
Obr. 15 Změna tvaru laserového paprsku s posuvem laserové hlavy ve směru osy z [21].....	28
Obr. 16 a) schématické vyjádření procesu laserového leštění pomocí přetavení povrchu při kontinuálním režimu b) schématické vyjádření laserového leštění pomocí přetavení povrchu při pulzním režimu [25].....	30
Obr. 17 Příklad laserového leštění u tvarově složitější součásti [26].....	30
Obr. 18 Příklad aproximace tisknutého dílu k digitálnímu modelu v závislosti na tloušťce vrstvy [27]	31
Obr. 19 Klasifikace defektů vyskytujících se v tištěných dílech [29].....	32
Obr. 20 Identifikace polohy šíření trhliny zkušební vzorku. Na obrázku a) b) c) jsou vyznačeny polohy vniku trhliny, které jsou v těsné blízkosti povrchu. Na obrázcích d) e) f) můžeme vidět póry, které vznikly na hranici přechodu mezi parametry kontury a jádrem. [30]	33
Obr. 21 Laser použitý při experimentu	35
Obr. 22 Nanosekundový laser použitý pro laserové čištění	35
Obr. 23 Velikost projevu schodišťového efektu v závislosti na úhlu [31].....	36
Obr. 24 Velikost povrchové drsnosti v závislosti na úhlu tisknuté plochy [32]	37

Obr. 25 3D modely vzorků určené pro optimalizaci parametrů a) vzorek tisknutý pod úhlem 45 stupňů b) vzorek tisknutý pod úhlem 90 stupňů c) vzorek tisknutý pod úhlem 0 stupňů	38
Obr. 26 Zakótovaný model tahovky	39
Obr. 27 Zakótovaný model vzorku pro únavové zkoušky	39
Obr. 28 Vytisknutá platforma se všemi vzorky použitými v experimentu	40
Obr. 29 Měřicí zařízení Focus Monitor FM+	41
Obr. 30 Měřicí zařízení Focus Monitor P100	41
Obr. 31 Proces opracování vzorků od původního vzorku až po laserové leštění.....	43
Obr. 32 Povrch před a po aplikaci laserového čištění	44
Obr. 33 Soustava proudění argonu, czduchová komora a měřič kyslíku	45
Obr. 34 Naměřený povrch pomocí IFM - G4 a vyhodnocené hodnoty drsností u vzorků tisknutých pod úhlem 90 stupňů.....	46
Obr. 35 Naměřená laserovaná plocha s různou vzdáleností překrytí po celé délce povrchu ...	49
Obr. 36 Naměřený povrch pomocí IFM – G4 a vyhodnocení hodnoty drsností u vzorků tisknutých pod úhlem 45 stupňů.....	50
Obr. 37 Naměřený povrch pomocí IFM – G4 a vyhodnocení hodnoty drsností u ploch tisknutých rovnoměrně s platformou.....	52
Obr. 38 Grafické znázornění ohnutí vzorků po aplikaci zvolených parametrů.....	54
Obr. 39 Leštěný vzorek pomocí parametrů č. 1	56
Obr. 40 Leštěný vzorek pomocí parametrů č. 2	56
Obr. 41 Leštěný vzorek pomocí parametrů č. 3	56
Obr. 42 Popsané vzorky pro zkoušku tahem parametrem č. 1	59
Obr. 43 Popsané vzorky pro zkoušku tahem parametrem č. 2.....	59
Obr. 44 Popsané vzorky pro zkoušku tahem parametrem č. 3	59
Obr. 45 Zkušební tyč prasklá v oblasti vrubu	59
Obr. 46 Napojení rádiusu na laserovanou plochu	59
Obr. 47 Materiálový výbrus celé zkušební části po aplikaci parametru č. 1	62
Obr. 48 Ovlivněná oblast po laserovém leštění parametrem č. 1	62
Obr. 49 Materiálový výbrus celé zkušební části po aplikaci parametru č. 2.....	63
Obr. 50 Ovlivněná oblast po laserovém leštění parametrem č. 2.....	63

Obr. 51 Materiálový výbrus celé zkušební části po aplikaci parametru č. 3..... 63

Obr. 52 Ovlivněná oblast po laserovém leštění po aplikaci parametru č. 3 63

Seznam tabulek

Tabulka 1 Tabulka hodnot poloměrů laserového spotu s měnící se vzdáleností z..... 42

Tabulka 2 Tabulka závislosti drsnosti na změně vzdálenosti od fokální roviny..... 47

Tabulka 3 Tabulka závislosti drsnosti na změnu výkonu 48

Tabulka 4 Tabulka závislosti drsnosti na změnu stupně překrytí 49

Tabulka 5 Tabulka závislosti drsnosti na změnu výkonu 51

Tabulka 6 Tabulka závislosti drsnosti na změnu stupně překrytí 52

Tabulka 7 Tabulka závislosti drsnosti na změnu výkonu 53

Tabulka 8 Tabulka závislosti drsnosti na změnu stupně překrytí 54

Tabulka 9 Parametry aplikované na vzorky pro cyklické namáhání 55

Tabulka 10 Tabulka s výsledky z únavových zkoušek 58

Tabulka 11 Výsledné hodnoty po zkoušce tahem 61

Tabulka 12 Zbytkové napětí na povrchu 66

Seznam grafů

Graf 1 Naměřený průběh laserové kaustiky 42

Graf 2 Proložení přímkou lineární části laserové kaustiky a zjištění rovnice přímky 42

Graf 3 Graficky znázorněna závislost drsnosti na změně fokální vzdálenosti..... 47

Graf 4 Graficky znázorněná závislost drsnosti na změně výkonu 48

Graf 5 Graficky znázorněná závislost drsnosti na změně výkonu 51

Graf 6..... 53

Graf 7 Grafické znázornění výsledků z únavové zkoušky 58

Graf 8 Provedený řez vzorku pro tahovou zkoušku s křivkou znázorňující tvar povrchu..... 60

Graf 9 Grafické znázornění průběhu tahové zkoušky 61

Graf 10 Průběh tvrdosti HV10 napříč vzorkem 64

Graf 11 Průběh tvrdosti HV1 napříč vzorkem 65

Graf 12 Grafické znázornění výsledků koeficientu tření 67

Graf 13 Grafické znázornění výsledků míry opotřebení 67

1 Úvod

Aditivní výroba je poměrně mladý obor, který v současnosti budí velkou pozornost po celém světě. Tato technologie je známá již cca 40 let, nicméně až ve 21. století se dostala do středu zájmu, a to především s klesajícími nároky a náklady na svůj provoz. Jednou z mnoha podskupin řadící se k této technologii je metoda DMLS (direct metal laser sintering). DMLS je jedna z mála metod aditivní výroby, která dokáže vytvořit kovový díl z CAD modelu. Tato metoda má spoustu výhod ale i nedostatků a je potřeba ji neustále zdokonalovat, aby byla zaručena opakovatelnost výroby pomocí 3D tisku se zaručenými vlastnostmi.

Tato diplomová práce je zaměřena na jeden z nedostatků, který vzniká při tvorbě dílu pomocí 3D technologie metodou DMLS. Při této metodě se spékají jednotlivé vrstvy kovového prášku, kdy tento proces zanechává jedinečnou strukturu povrchu tištěných dílů. Tato struktura povrchu vykazuje vysokou průměrnou aritmetickou drsnost povrchu (R_a) pohybující se mezi 8-10 μm u dílů tisknutých kolmo na platformu a vysokou nerovnost povrchu. Velký vliv na takto drsný povrch mají póry a nedostatečně natavený prášek, který je jenom částečně nataven k povrchu. Tyto nečistoty a vysoká drsnost povrchu snižují mechanické vlastnosti součástí, neboť slouží jako koncentrátoři napětí při zatížení. Jmenované nedokonalosti povrchu materiálu se nejvíce projevují při cyklickém zatížení a dynamickém zatížení. Jednou z metod, jíž lze odstranit tyto nedostatky, je modifikace povrchu pomocí laseru. Tato metoda spočívá v přetavení vrstvy materiálu do určité hloubky a následném zchladnutí na vzduchu. Při natavení povrchu dochází ke vzniku povrchového napětí, které vede natavený materiál do prohlubní materiálu. Během tohoto procesu nedochází k odstranění materiálu, ale pouze k jeho natavení, proto musí být zvoleno správné laserové zařízení, které bude schopno materiál pouze natavit. Z toho důvodu bylo zvoleno laserové zařízení s výkonem 400 W, s kontinuálním režimem a s modulovaným režimem v délkách pulzu v hodnotách ms a μs . U nanosekundových vlnových délek a kratších již dochází k ablací povrchu, který je nežádoucí při tomto způsobu leštění.

1.1 Cíl práce

Hlavním cílem této práce je aplikovat nekonvenční metodu obrábění laserového leštění na povrch 3D tištěných dílů za účelem zlepšení drsnosti povrchu a k odstranění nedostatků povrchu po 3D tisku. Mezi nedostatky povrchu patří: výskyt vrcholků a prohlubní na povrchu, póry, částečně natavené částice, povrchové mikrotrhliny. Většina těchto nedostatků způsobuje nárůst povrchové drsnosti, která má zásadní vliv na zhoršení mechanických vlastností.

Dalším dílčím cílem je sledovat materiálové změny při aplikaci laserového leštění. Je možno předpokládat, že při laserovém leštění bude docházet k transformaci povrchové vrstvy pomocí laserového přetavení a tím pádem ke změně povrchových vlastností. Mnoho vědeckých článků pojednává o laserovém leštění, nicméně u většiny se zkoumá pouze vliv laserového leštění na redukci povrchové drsnosti. Jedná se ale o novou metodu transformace povrchu, a proto je třeba

sledovat i její vliv na leštěný díl. Tato práce je navržena nejen z pohledu redukce drsnosti povrchu, ale také z pohledu materiálových vlastností.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Úvod do problematiky laserové technologie

V této úvodní podkapitole budou vysvětleny základní pojmy, co se týče fundamentálních procesů, vlastností a operací laseru potřebných k zajištění správného fungování laseru. Dále budou popsány jednotlivé typy laseru.

Jak již samotný název napovídá, laser je akronym pro light amplification of stimulated emission of radiation, tedy zesilovač světla stimulovanou emisí záření. Lze tedy říct, že lasery jsou zařízení, která produkují nebo zesilují laserový paprsek s jasně definovanou vlnovou délkou. Aby mohl laser pracovat, tak jak pracuje, je třeba zajistit správné fungování základních fyzikálních procesů, jež budou vysvětleny v následujících podkapitolách.[1] [2]

2.1.1 Spontánní emise, stimulovaná emise a absorpce

Uvažujme, že existují dvě energetické hladiny (E) 1 a 2 nějakých atomů či molekul daného materiálu a zároveň platí, že $E_1 < E_2$. Obě hladiny mohou mít různou velikost, nicméně pro lepší představivost budeme uvažovat, že hladina 1 je klidová hladina. Klidová hladina znamená, že zde elektron zaujímá svou energeticky nejvýhodnější polohu. Dále uvažujme, že atom je již vybuzený na energetickou hladinu 2 a jelikož obecně platí, že každý systém se snaží zaujmout takový stav, kdy má systém minimální energii, tak i zde dojde k uvolnění energie a atom klesne na klidovou hladinu 1. Musí tedy zákonitě platit, že velikost uvolněné energie se rovná rozdílu $E_2 - E_1$. Tato uvolněná energie může být uvolněna například ve formě elektromagnetických vln a tento proces se nazývá spontánní emise. Frekvence vyzářené vlny lze vyjádřit známou rovnicí (1):

$$hf_0 = E_2 - E_1 \quad (1)$$

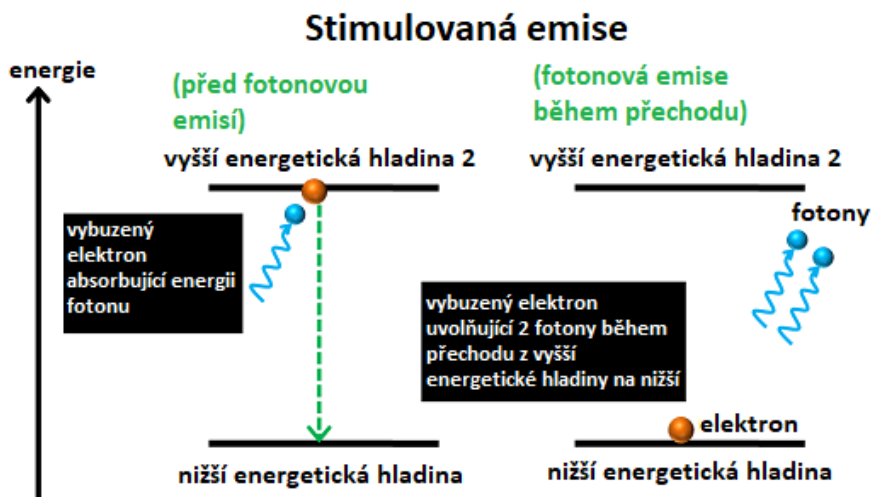
kde h je Planckova konstanta, f_0 je frekvence elektromagnetické vlny a E vyjadřuje energetickou hodnotu jednotlivých hladin.

Existuje více způsobů, jak k uvolnění energie dochází, například ve formě kinetické energie. Ale protože tato práce je zaměřena na laserové technologie, je cílem dosažení uvolnění energie vyzářením ve formě elektromagnetických vln. Celý tento proces je znázorněn na Obr. 1.



Obr. 1 Grafické vyobrazení spontánní emise [3]

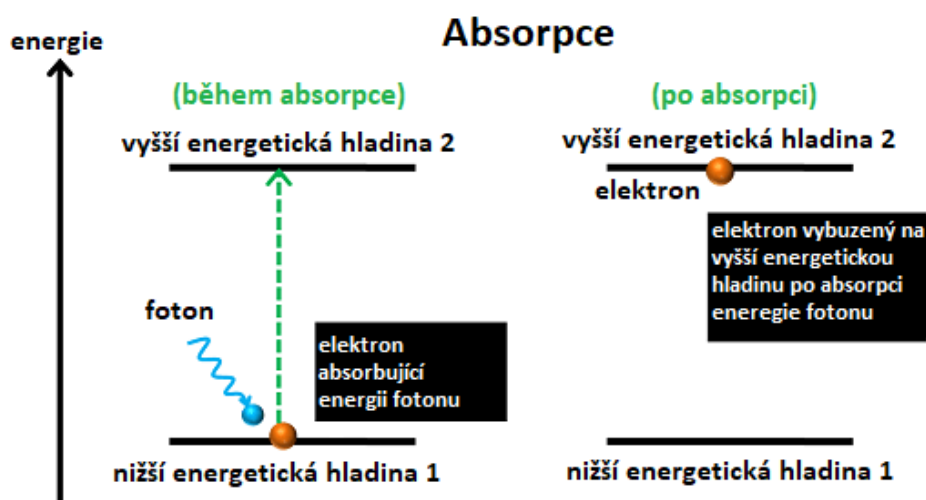
Nyní uvažujme, že atom či molekula je vybuzena na energetickou hladinu 2 a že elektromagnetická vlna o frekvenci $f = f_0$ dopadá na materiál. A kvůli předpokladu, že elektromagnetická vlna má stejnou frekvenci jako je frekvence atomu, dojde k nucené transformaci z energetické hladiny 2 na energetickou hladinu 1. Příčinou této transformace dojde k uvolnění energie o velikosti rozdílu $E_2 - E_1$ ve formě elektromagnetické vlny, jež má stejný směr jako e.m. vlna dopadající viz. Obr. 2. Tento jev se nazývá stimulovaná emise.



Obr. 2 Grafické vyobrazení stimulované emise [3]

Rozdíl mezi stimulovanou a spontánní emisí je tedy takový, že v případě spontánní emise uvolňuje atom elektromagnetickou vlnu, která nemá fázovou závislost na elektromagnetické vlně jiného atomu. Navíc u spontánní emise může být elektromagnetická vlna uvolněna v jakémkoliv směru. U stimulované emise, jejíž proces je vyvolán dopadající elektromagnetickou vlnou, se emise jiného atomu přidá k dopadající elektromagnetické vlně a tyto e.m. vlny mají stejný směr.

Zatím bylo uvažováno pouze to, že je atom či molekula vybuzena již na energetickou hladinu 2. Nicméně abychom u laseru dosáhli stimulované emise, je třeba vybudit elektrony na energetickou hladinu 2. Budeme tedy uvažovat, že atom leží na energetické hladině 1. Pokud budeme uvažovat, že hladina 1 je energeticky nejvýhodnější poloha, atom zůstane v této poloze, dokud mu nebude dodán nějaký vnější impuls. Uvažujeme tedy, že elektromagnetická vlna o frekvenci $f = f_0$ dopadá na materiál. Potom můžeme počítat s vysokou pravděpodobností, že bude atom vybuzen na vyšší energetickou hladinu, tedy hladinu 2. Potřebná energie $E_2 - E_1$ pro vybuzení atomu na vyšší energetickou hladinu 2 je získána z dopadající elektromagnetické vlny. Tento jev se nazývá absorpce a je graficky znázorněn na Obr. 3. [1] [2] [3]



Obr. 3 Grafické vyobrazení absorpce [3]

2.1.2 Vlastnosti laseru

Laserový paprsek má stejné vlastnosti jako světlo, ale má navíc pro laser jedinečné vlastnosti, díky kterým může pracovat, tak jak pracuje. Jedná se o monochromaticnost, koherentnost, přímost a jas, na něž je často zapomínáno.

Normální světlo je polychromatické, to znamená, že je složeno z více vlnových délek, kdy každá barva se vyznačuje rozdílnou hodnotou vlnové délky. Naproti tomu laserový paprsek se vyznačuje pouze jednou vlnovou délkou. Jeho monochromaticnost je vyvolána dvěma procesy. Za prvé může být zesílena pouze elektromagnetická vlna o frekvenci f_0 dána rovnicí (1). Druhým procesem je, že fotony se odrážejí mezi dvěma rovnoběžnými zrcadly a může dojít k zesílení pouze u rezonanční frekvence, která je dána laserovou kavitou.

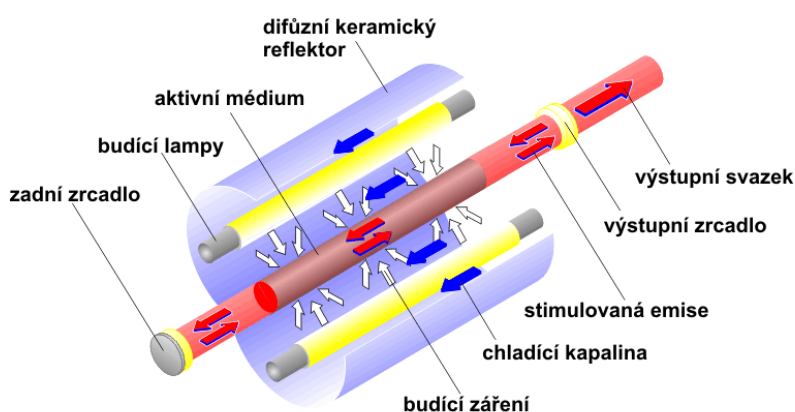
Koherence je definována jako pevná fázová závislost mezi elektromagnetickými vlnami v různém čase a prostoru. Z toho vyplývá, že lze rozlišit koherenci prostorovou a koherenci časovou. Prostorová koherence se vyznačuje silnou korelací mezi elektrickými poli na různých pozicích v průřezu paprsku.

Přímost laseru je přímo odvozena od jevu z kapitoly 2.2, kdy mohou být kvůli stimulované emisi probíhající v rezonanční kavitě stimulovány pouze elektromagnetické vlny, které se šíří po optické ose udržitelné v kavitě. Hodnota přímosti se vyjadřuje u laseru pomocí hodnoty divergenčního úhlu.[2] [4]

2.1.3 Typy laseru a jejich části

Nd: Yag laser

Jedná se o nejstarší typ laseru, kdy aktivní prostředí tvoří matrice umělého YAG krystalu dopovaného ionty neodymu (Nd^{3+}). Tyto lasery jsou buzeny buď pomocí budící lampy, nebo pomocí diod. Nevýhodou buzení pomocí lampy je její malá účinnost. Ta je způsobena tím, že velká část elektrické energie je přeměněna na teplo, proto je nutné zajistit chlazení. Nejčastěji používaná vlnová délka je 1060 nm, nicméně lze použít i jiné délky pohybující se v rozmezí 266–1444 nm. Problém u změny vlnových délek je klesající účinnost. Další nevýhodou jsou vysoké náklady na provoz a malá životnost výbojek (<1000 hodin). Nicméně i v dnešní době najdou tyto lasery uplatnění díky svým vlastnostem, jelikož za použití pulzního režimu disponují tyto typy lasery při svařování hlubokého průvaru s malou tepelně ovlivněnou oblastí. [5],[6]



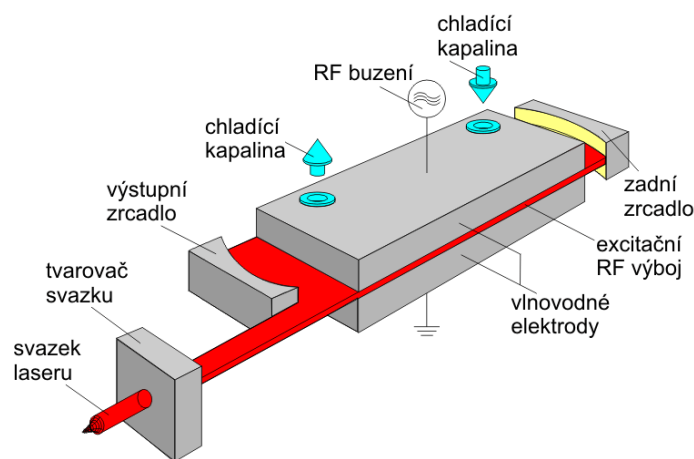
Obr. 4 Schéma částí Nd:Yag laseru buzený pomocí lampy [5]

CO₂ lasery

Tyto lasery využívají jako aktivní médium vhodnou směs plynů CO₂, N₂ a He. Oscilace probíhá mezi dvěma úrovněmi molekuly CO₂, zatímco N₂ a He z velké části zlepšují účinnost laseru. CO₂ lasery patří mezi nejvýkonnější lasery na trhu (lasery s výstupním výkonem vyšším než 100 kW již byly demonstrovány) a mezi lasery nejúčinnější. Pracují s vlnovou délkou 10,6 μm. Právě kvůli této vlnové délce jsou vhodné pro aplikaci povrchové úpravy nekovových materiálů (plast, kůže, papír a sklo). Tyto lasery mohou být buzeny buď rádio-frekvenčně (RF), nebo elektrickým výbojem (DC). DC laser se skládá ze skleněné trubice v níž je umístěn plyn. Pro

ionizaci plynu se používá vysokonapěťová stejnosměrná výbojka. Jelikož sklo špatně vede teplo a stejnosměrný proud má nízkou účinnost, musí být zajištěno chlazení pomocí vody. Tyto lasery mají malou životnost a jsou náročné na údržbu, manipulaci a chlazení.

RF laser má dokonale uzavřenou kovovou komoru obsahující směs plynu. Použití řízené radiofrekvenční energie způsobuje vytvoření plazmatu ionizovaného plynu pro zdroj, který produkuje laserový paprsek. RF lasery jsou zkonstruovány tak, aby nefungovaly na bázi vysokého napětí, tím pádem se vyhnou chlazení vodou. Díky tomu jsou RF kovové lasery bezpečně provozovatelné téměř v jakémkoli prostředí. Protože mohou být doplňovány o směs plynu a nemusí tak dojít k výměně celé funkční části laseru, klesá náročnost jejich údržby a manipulace s nimi.[5] [7]



Obr. 5 Schéma částí CO₂ laseru buzený metodou RF [5]

Vláknové lasery

Vláknový laser je laser, ve kterém je aktivní prostředí optické vlákno, jež je dopované o vzácné materiály jako jsou erbium, ytterbium, neodýmium, dysprosium, praseodymium a thulium. Toto aktivní médium je buzeno diodovým laserem, který disponuje velkou účinností dosahující až 50 % při elektro-optickém převodu. Mezi výhody nasazení tohoto druhu laseru je již výše zmíněná účinnost. Dále tyto lasery disponují vysokým výkonem na výstupu, což prodlužuje jejich aktivní oblast až na několik kilometrů, a tím pádem umožňují vysoké optické zesílení. Dokážou podporovat obrovský výkon na výstupu dosahující několika kilowatů, a to především díky velkému poměru plochy optického vlákna k jeho objemu, což zaručuje efektivní chlazení. Má menší prostorovou náročnost, jelikož optické vlákno se může ohýbat a namotávat. Má také vysokou spolehlivost, nízké náklady na údržbu a životnost až 100 000 h.

Vláknové lasery dokáží vyvinout obrovské špičkové výkony při malých středních výkonech. Nanosekundové lasery s vysokými špičkovými výkony jsou vhodné pro gravírování a

popisování součástí. Jejich pořizovací cena je na rozdíl od výše zmíněných vysoká, ale je vykompenzována nižšími náklady na provoz. [8] [9]

2.2 Interakce laseru s materiálem

Úprava povrchových vlastností je nedílnou součástí optimalizace užitečných vlastností pro danou aplikaci. Například lze měnit kosmetický vzhled a absorpční vlastnosti materiálu prostřednictvím změny jeho struktury a odstranění chemických nečistot na jeho povrchu. Materiálovou náchylnost proti otěru a povrchovému mechanickému poškození lze omezit změnou chemického složení, morfologie a krystalické struktury. Síly smáčivé, třecí a adhezivní působící na styčné ploše lze výrazně ovlivnit pomocí mikro a nano struktur na povrchu materiálu. Jednou z výhod použití laseru jako nástroje pro materiálové zpracování je schopnost přesně kontrolovat kde a v jakém množství je do materiálu dodávána energie. Tato kontrola je řízena zvolením správných procesních parametrů za účelem úpravy povrchu laserem. [10]

2.2.1 Propagace světla v materiálu

Udržení energie a následné dodání uvolněné energie na požadované místo může být dosaženo pomocí kontroly profilu laserového svazku. Základními metodami pro kontrolu řízení svazku jsou galvanometrická zrcadla, optické čočky zajišťující konvergenci paprsku a tvarování paprsku pomocí optických homogenizérů, masek a difrakčních optických elementů.

Při dopadu laserového světla na povrch materiálu dojde k jeho částečnému odrazu od povrchu především kvůli nespojitosti v reálném indexu lomu a zbytek světla prostoupí do materiálu. Část dopadajícího výkonu na povrch materiálu je odražena a tento odraz je závislý na polarizaci, úhlu dopadu světla θ_i a na rozdílu hodnot indexu lomu atmosféry a materiálu. Koeficienty odrazivosti pro p-polarizaci a s-polarizaci lze spočítat podle všeobecné známé Fresnelovy rovnice:

$$R_s = \left[\frac{E_r}{E_i} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_2 \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)} \right]^2 \quad (2.1)$$

$$R_p = \left[\frac{E_r}{E_i} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \cos(\theta_t) - n_2 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_t) + n_2 \cos(\theta_i)} \right]^2 \quad (2.2)$$

podle níž je závislost mezi koeficientem odrazivosti a prostupem světla popsána dle rovnice $T_{s,p} = 1 - R_{s,p}$. Při uvažování ideálního případu, kdy světlo dopadá na ideálně rovný povrch, dojde ke zjednodušení předchozí rovnice na:

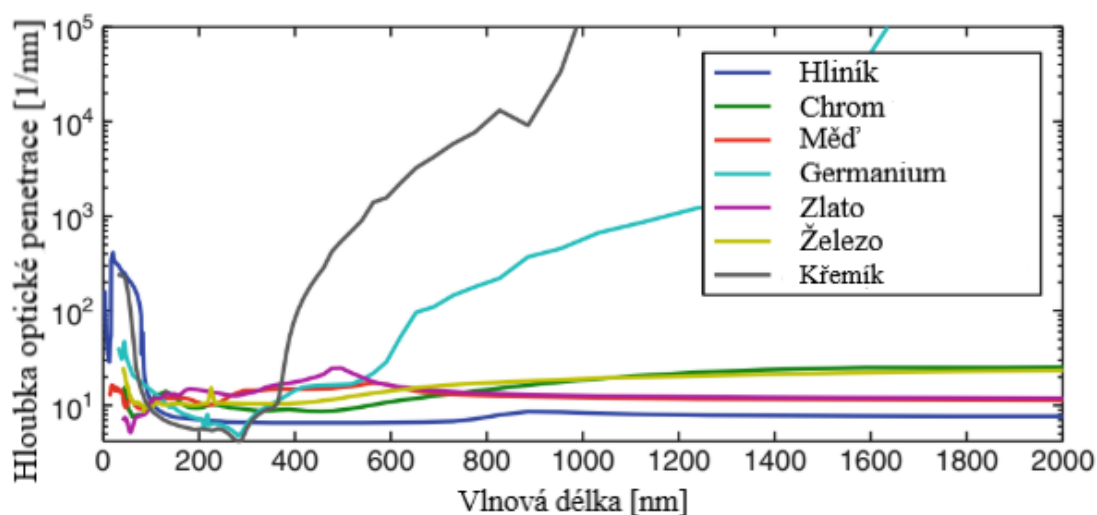
$$R = R_s = R_p = \left[\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2 \quad (2.3)$$

Jakmile světlo prostoupí dovnitř materiálu, absorpční mechanismus způsobí, že dojde ke snížení intenzity s hloubkou takovou rychlostí, jakou znázorňuje absorpční koeficient. Při uvažování konstantního absorpčního koeficientu má intenzita exponenciální pokles s rostoucí hloubkou podle Beer – Lambert zákona:

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (2.4)$$

kdy $I(z)$ je závislost intenzity na hloubce penetrace světla. I_0 je intenzita světla na povrchu před průchodem skrze materiál, po odečtení odražené energie. α vyjadřuje absorpční koeficient závislý na materiálu a vlnové délce.

Hloubka penetrace je tedy převrácená hodnota absorpčního koeficientu a znázorňuje, v jaké hloubce dojde k poklesu intenzity laseru na hodnotu $1/e$ oproti velikosti intenzity na povrchu. Jak bylo zmíněno výše, absorpční koeficient, a tedy i hloubka optické penetrace, je závislý na frekvenci materiálu. Tato informace je důležitá pro pochopení, proč u laserů dochází především k povrchové změně. Na obrázku 6 můžeme vidět závislost hloubky optické penetrace na vlnové délce u jednotlivých materiálů. Je patrné, že u většiny vlnových délek dochází k optické absorpci do hloubky 10 nm. To znamená, že laser umožňuje modifikovat povrch materiálu, aniž by došlo k výraznému ovlivnění objemu [10].



Obr. 6 Závislost hloubky optické penetrace na materiálu a vlnové délce [10]

2.2.2 Mechanismus energetické absorpce

Absorpční koeficient stanovuje absorpci světla jako funkci hloubky a je často označován řeckým písmenem alfa. Mechanismy, při kterých dochází k absorpci, jsou silně závislé na typu materiálu. Pro tuto práci je nejdůležitější pochopit absorpci světla u kovů. U kovů převládá optická absorpce světla volnými elektrony pomocí takzvaného inverzního brzdného záření

(Bremsstrahlung). Energie je následně přenesena na fonony krystalové mřížky. Fonon lze popsat jako kvazičástici zvuku, jež se pohybuje v pevných látkách. Studie fononů je nedílnou součástí pevných látek, neboť fonony přispívají k mnoha fyzikálním vlastnostem materiálů jako je třeba tepelná a elektrická vodivost. Například prostup fononů má na svědomí prostup tepla v pevných látkách.

2.2.3 Šíření tepla v materiálu

Je třeba si uvědomit, že absorpce světla nemá přímo za následek vznik tepla v materiálu. Ten je způsoben zbytkovou energií předanou mezi vybuzenými energiemi vázaných elektronů, kinetickou energií volných nosičů a přebytkem fononů. Existují rovnice, které dokážou popsat šíření tepla v materiálu, nicméně kvůli náročnosti na jejich analytické řešení musí dojít k jejich zjednodušení. Situaci dále komplikují reálné materiály, které mění svoje optické vlastnosti s měnící se teplotou a laserovou intenzitou. Tyto složité výpočty nemají pro tuto práci smysl, nicméně mezi důležité zjednodušené výpočty patří délka tepelné difúze, která se počítá podle vzorce:

$$l_T = \sqrt{2D\tau} \quad (2.5)$$

kde hodnota D vyjadřuje tepelnou difuzivitu daného materiálu a τ vyjadřuje čas, po nějž laser působí na daný materiál. V tom případě můžeme považovat délku tepelné difúze jako hodnotu do jaké vzdálenosti prostoupí energie během laserového záření. Při aplikaci laserového záření dochází k šíření energie skrze materiál nejen během působení laserového záření, ale i po jeho skončení. To má za následek změnu materiálových vlastností. Oblast, v níž dochází k těmto materiálovým změnám vlivem prostupu energie, se nazývá tepelně ovlivněná oblast (HAZ).

Jak již bylo zmíněno výše, τ vyznačuje čas, po který laser působí na daný materiál. Můžeme tedy říct, že u pulzního režimu tato hodnota vyjadřuje čas, během něhož působí jeden pulz na materiál. To znamená, že délka pulzu laseru má na šíření tepla v materiálu zásadní vliv. Vezmeme-li v úvahu dlouhé, krátké a ultrakrátké délky pulzu na materiál a jejich vliv na šíření tepla v něm, tak například u dlouhých délek pulzů se projevuje především takzvaný foto-termální mechanismus. Foto-termální mechanismus je mechanismus, při kterém dochází k přeměně absorbované energie na teplo. Když se podíváme na rovnici délky tepelné difúze, tak s delší dobou působení laseru stoupá i délka tepelné difúze a tím pádem i oblast, která je tepelně ovlivněna. V tom případě materiál potřebuje větší množství energie, aby došlo k jeho odpaření (ablaci), než je potřeba k jeho natavení.

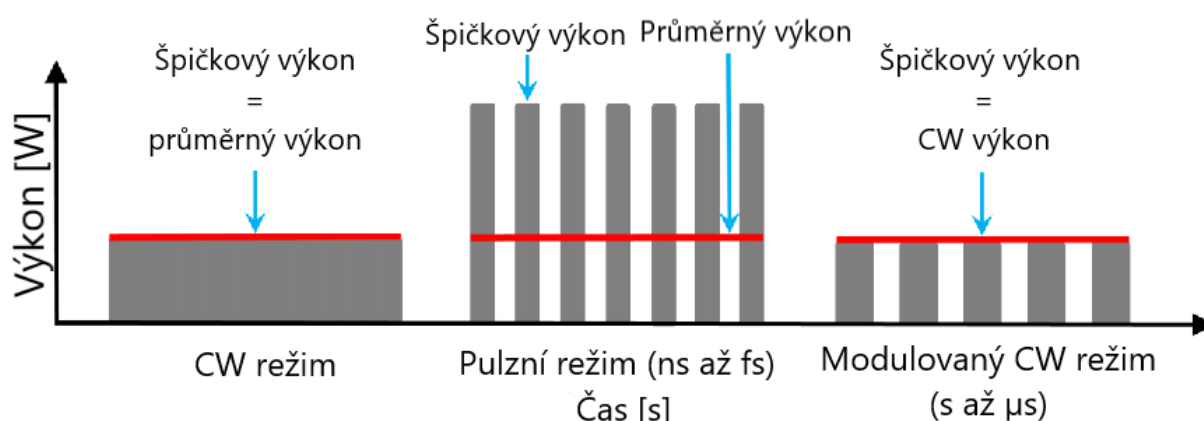
U laserů s krátkou dobou pulzu dochází jak k natavení materiálu, tak i k jeho odpaření. Se snižující se délkou pulzů dojde i ke snížení prahu fluence a zároveň ke zvýšení efektivity energetické penetrace materiálu. U nanosekundových délek pulzů dochází k poměrně vysoké tepelně ovlivněné oblasti, kdy povrch materiálu dosahuje vysokých teplot a s rostoucí hloubkou teplota prudce klesá. Z toho plyne, že zde vznikají velké teplotní gradienty.

U ultrakrátkých dob laserových pulzů v hodnotách femtosekund uvažujeme, že čas pulzů je mnohem kratší, než je čas chladnutí elektronů, a proto dochází k úplnému zanedbání šíření tepla v materiálu. [10] [11]

2.3 Parametry laseru a jejich vliv na interakci laseru s materiálem

2.3.1 Pulzní a CW režim

Hlavní rozdíl mezi CW režimem a pulzním režimem je ten, že při CW režimu je z laserového zdroje energie dodávána na povrch materiálu neustále (kontinuálně), kdežto u pulzních laserů dochází k jejich zapínání a vypínání, k vytváření pulzů. U pulzního režimu tedy dochází k akumulaci energie a jejímu následnému uvolnění, díky kterému lze dosáhnout špičkových výkonů s poměrně malou energií pulzu. U nanosekundových pulzů lze dosahovat špičkových výkonů v hodnotách několika kilowatů při hodnotách středního výkonu několika desítek watů, u femtosekundových délek pulzu lze dosahovat hodnot až několik megawatů. U kontinuálních laserů se v podstatě špičkový výkon rovná průměrnému výkonu. Všechny tyto procesy jsou znázorněny na obrázku 7.



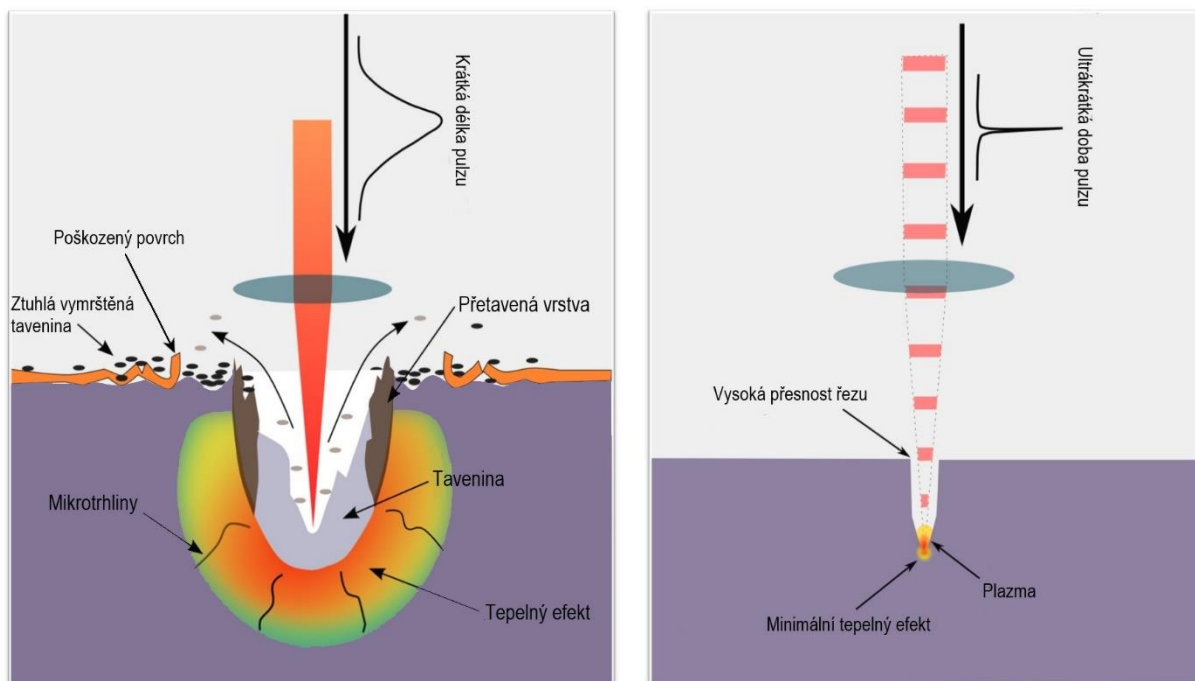
Obr. 7 Grafické znázornění CW a pulzního režimu [12]

Oba režimy našly svoje využití v průmyslu, a to především díky svému všestrannému využití. Například u CW režimu a dlouhých délek pulzů, jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.3, dochází k foto-termálnímu mechanismu, a tedy natavení povrchu materiálu. Toho se využívá při aplikacích jako je například svařování. Dalším využitím je povrchové kalení pomocí laseru, kdy díky rychlému natavení a chladnutí dojde k zakalení povrchu a můžeme tak vytvářet jedinečnou strukturu materiálu. Značnou výhodou CW režimu je rychlost zpracování materiálu, která jde ruku v ruce s výkonem. Čím větší výkon použijeme, tím vyšších rychlostí pohybu laseru můžeme dosahovat. Oproti tomu pulzní režim je limitován jednotlivými pulzy, proto se i rychlost musí přizpůsobovat frekvenci, aby došlo k vytvoření plynulé drážky. Využití pulzních laserů je tak obrovské, že je zde nelze všechny vyjmenovat, nicméně je potřeba zmínit, že tyto lasery jsou využívány v procesech využívajících ablací. U nanosekundových laserů se

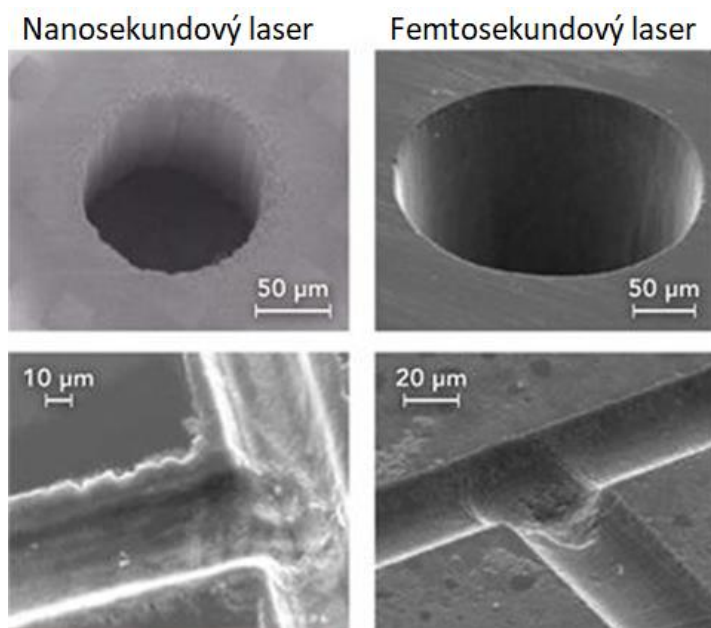
jedná především o značení a mikroobrábění. Ultrakrátké doby pulzů najdou své využití především při strukturování povrchu součástí. [13] [14] [12]

2.3.2 Délka pulzu

V této kapitole je v první řadě nutné definovat potřebné názvosloví, to znamená význam dlouhých, krátkých a ultrakrátkých pulzů. U dlouhých pulzů hovoříme o časových jednotkách v řádech sekund, milisekund a mikrosekund. U krátkých pulzů se jedná o pulzy, které se pohybují řádově v hodnotách nanosekund a u ultrakrátkých pulzů v řádech picosekund a femtosekund. V poslední době budí ultrakrátké lasery obrovský zájem, a to především ve výzkumu či v micro/nano obrábění materiálu. Při použití takto krátkých pulzů dochází totiž k velmi přesnému zpracování materiálu, které je způsobeno tím, že především u pulzů kratších než 10 ps dochází oproti krátkým délkám pulzů k minimální tepelně ovlivněné oblasti a díky tomu lze velmi přesně odebírat materiál. Na obrázku 9 je znázorněn rozdíl v přesnosti obráběného materiálu při změně délky pulzu. Na rozdíl od toho krátké doby pulzů způsobují, že při interakci s materiálem dojde k jeho zahřátí a následnému prostupu tepla skrze materiál. Toto teplo dále prostupuje mimo laserový spot do materiálu, což má za následek jeho „vaření“ a následnou evaporaci. Vaření a následná evaporace vedou ke vzniku několika nežádoucích procesů při laserové ablacii, jak lze vidět na obrázku 8. Mezi tyto procesy patří poškozený povrch, přetavená vrstva, mikrotrhliny v materiálu, tepelný efekt a vymrštěná tavenina, která dopadá zpět na materiál v energeticky nejvýhodnějším tvaru, tedy ve tvaru kapky. Tyto nežádoucí procesy probíhající při materiálovém zpracování především nanosekundovým laserem lze omezit nebo dokonce i zcela odstranit pomocí vhodných variací procesních parametrů, jež jsou zmíněny v následující kapitole. Jmenovaným problémům se věnuje mnoho odborných článků, například (Kawahito et al., 2016) se zabýval pohybem taveniny při svařování a jeho vlivem na vymrštěnou taveninu. [15]



Obr. 8 Interakce laseru s materiálem v závislosti na délce pulzu [16]



Obr. 9 Rozdíl v obrábění pomocí nanosekundového a femtosekundového laseru [17]

2.3.3 Procesní parametry

Jako procesní parametry jsou označovány parametry, které lze změnit a které přímo ovlivňují samotný proces. Patří mezi ně především výkon, rychlost pohybu laserového svazku a frekvence u pulzního režimu.

Výkon laseru

Laserový výkon je jedním ze základních procesních parametrů, který udává množství energie za jednotku času a vyjadřuje se ve wattech (W). Laserový výkon může být vyjádřen i v jiných

fyzikálních veličinách, jako je například laserová intenzita (W/m^2) a tok energie (J/m^2). Laserovou intenzitu lze vyjádřit pomocí zjednodušeného vzorce:

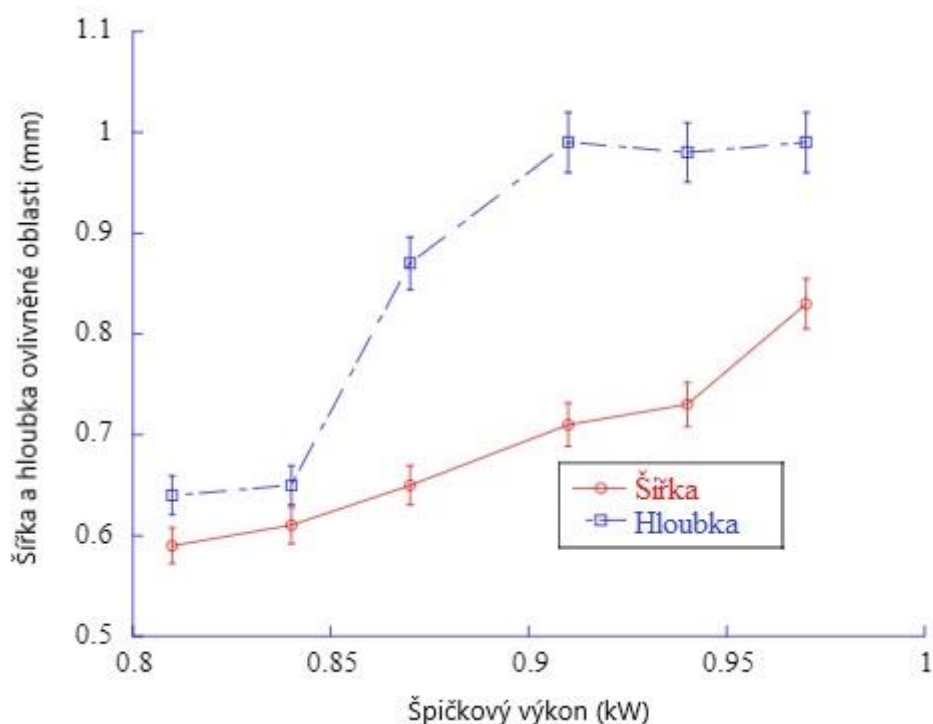
$$I = \frac{P}{S} = \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.6)$$

kdy P vyjadřuje výkon na výstupu (špičkový, nebo průměrný výkon v závislosti na modu laseru) a S vyjadřuje obsah spotu na materiálu. Právě kvůli tomu, že výkon je vyjádřen jako hodnota energie za čas, zde hraje čas významnou roli – díky možnosti aplikace různých délek pulzů. To znamená, že i když je například průměrný výkon v hodnotách několika desítek wattů, na výstupu může laser dosahovat až hodnot špičkového výkonu v jednotkách megawattů. Špičkový výkon se vypočte dle jednoduchého vzorce:

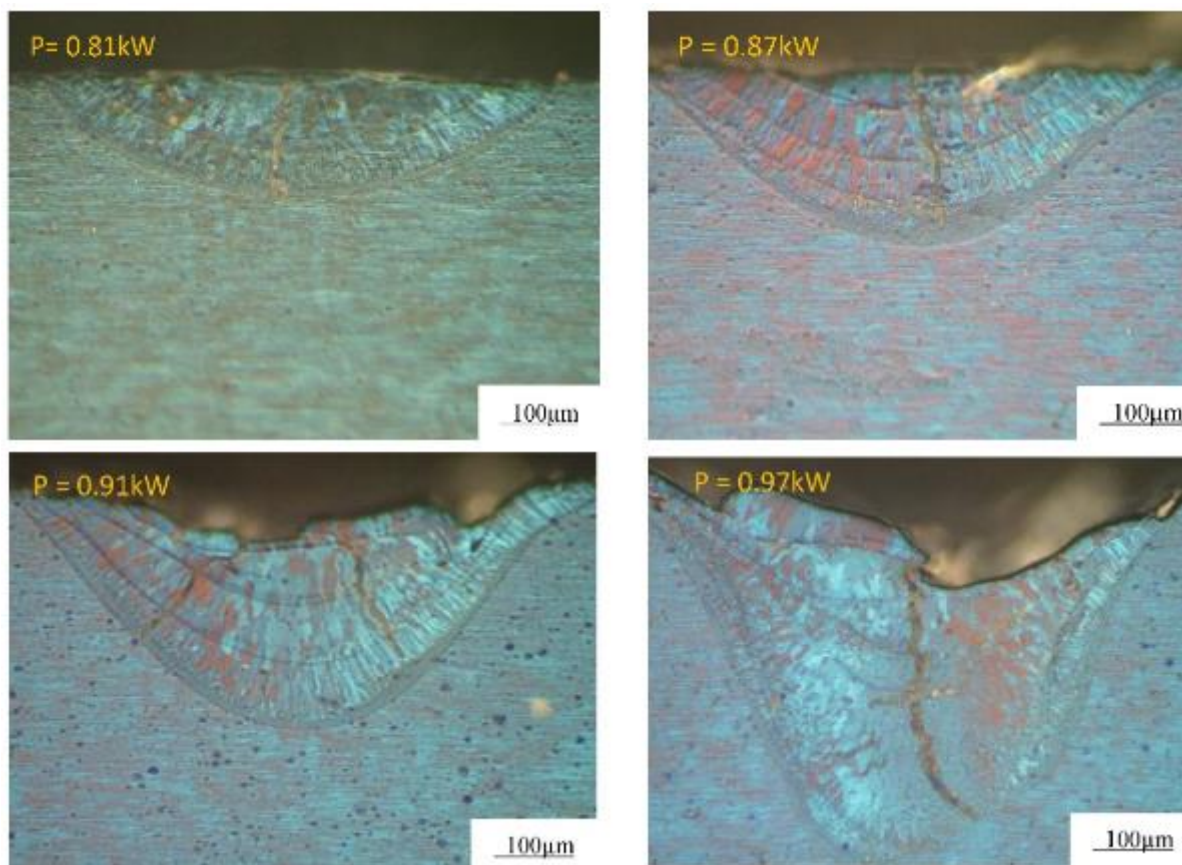
$$P_{\text{špičkový}} = \frac{E}{\tau} = \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} \right] \quad (2.7)$$

právě velikost tohoto špičkového výkonu má zásadní vliv na interakci laseru s materiálem. Z toho vyplývá, že čím větší je špičkový výkon, tím větší je i laserová intenzita. S rostoucí laserovou intenzitou dochází k rychlému nárůstu teplot na povrchu materiálu a následné evaporaci. S rostoucí intenzitou klesá i doba, kdy dochází k prostupu tepla skrze materiál.

Například v článku (Adisa et al., 2018) bylo zkoumáno, jaký vliv má laserový výkon na velikost ovlivněné oblasti. Bylo zjištěno, že s rostoucím výkonem roste i velikost ovlivněné oblasti a že s rostoucím špičkovým výkonem roste i energie dodaná do materiálu, což vede k výrazně většímu množství přetaveného materiálu a evaporaci, jak můžeme vidět na obrázku 10,11. [18] [19]



Obr. 10 Vliv špičkového výkonu na hloubku a šířku ovlivněné oblasti [19]



Obr. 11 Pohled v řezu na velikost a tvar ovlivněné oblasti [19]

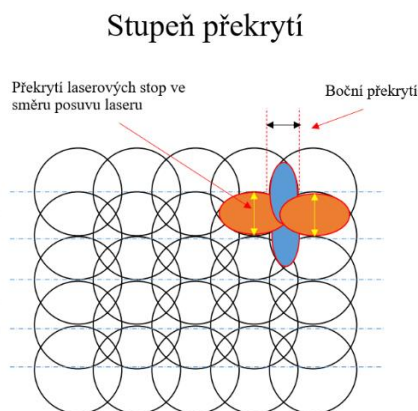
Rychlost a frekvence

Rychlost je jedním z nejdůležitějších parametrů laseru, protože ovlivňuje rychlost zpracování materiálu. Obzvláště v průmyslu je důležité snižování rychlosti zpracování polotovarů, protože výrazně ovlivňuje konečné náklady na výrobu a tím pádem i výši zisku. Velikost hodnoty rychlostí je třeba volit v závislosti na laserovém režimu. Tedy zda budeme na polotovar aplikovat kontinuální anebo pulzní režim, jelikož u pulzního režimu jsme limitováni tak zvaným stupněm překrytí. Stupeň překrytí lze vypočítat dle rovnice:

$$SP = \left(1 - \frac{v}{f * d}\right) * 100 = [\%] \quad (2.8)$$

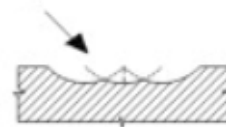
jak lze vidět, tak stupeň překrytí je funkcí rychlosti (v), frekvence (f) a průměr laserového spotu (d). Jelikož u pulzního režimu dochází k vytvoření plynulé čáry pomocí složení jednotlivých pulzů, tak je třeba optimalizovat proces aplikace laseru i z pohledu hodnoty stupně překrytí. Na obrázku 12 lze vidět jakým způsobem dochází k překrytí jednotlivých pulzů. Stupeň překrytí má vliv na drsnost povrchu jak je možné pozorovat na obrázku 13. Při pohybu laseru po povrchu vznikou krátery na povrchu způsobené Gausovým průběhem laserového spotu. Při malém stupni překrytí dojde k vytvoření vrcholů na okrajích kráterů jak lze vidět na obrázku 13. Při větším stupni překrytí dojde ke zmenšení vrcholů na kraji kráterů, což zapříčiní i zredukování

drsnosti na povrchu. Z tohoto důvodu se většinou volí větší stupně překrytí při povrchvé transformaci vzorků. [20]



Obr. 12 Grafické znázornění překrytí laserových stop [21]

velký stupeň překrytí



malý stupeň překrytí



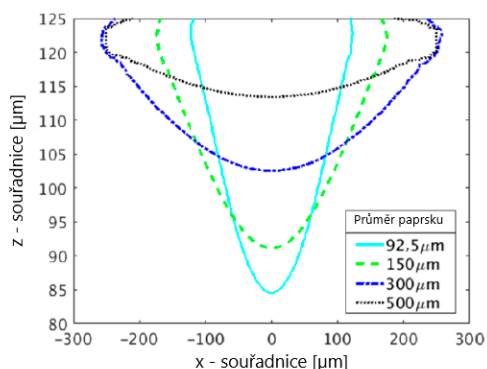
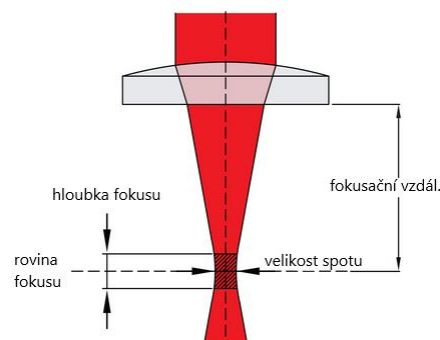
Obr. 13 Závislost stupně překrytí na topologii povrchu [20]

2.3.4 Poloha laserového spotu

Laserový spot je plně fokusovaný, pokud leží materiál, na který působí laserové záření, ve fokusační vzdálenosti dané optikou (viz obrázek 15). Ve fokusovaném paprsku konverguje paprsek ke své minimální hodnotě rádia, a tak i k minimální velikosti spotu. A právě tuto velikost laserového spotu lze samovolně měnit při posuvu laserové hlavy v kladném či záporném směru osy z a lze vypočítat hodnoty změny velikosti laserového spotu při tomto pohybu dle rovnice:

$$d = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 - 1} = [mm] \quad (2.9)$$

kdy, ω_0 vyjadřuje velikost laserového spotu ve fokusační vzdálenosti. Hodnota d koresponduje s hodnotou ω a vyjadřuje posuv laserové hlavy ve směru osy z . Při posuvu laserové hlavy od materiálu dojde k postupnému zvětšování laserového spotu a můžeme tak tuto změnu kontrolovaně řídit, aniž by muselo dojít ke změně optiky.

Obr. 15 Změna tvaru laserového paprsku s posuvem laserové hlavy ve směru osy z [21]

Obr. 14 Parametry laserového paprsku [23]

Laserový paprsek může mít několik tvarů, ale mezi nejvíce používané patří Gaussův tvar a takzvaný top head. Na obrázku 14 můžeme vidět, jak se měnil tvar laserového paprsku při posuvu laserové hlavy, kdy při úplné fokusaci laserového paprsku dosahoval poloměr laserového spotu velikosti $92,5 \mu\text{m}$ a tvar paprsku byl Gaussův. Dále je z obrázku 14 patrné, že čím větší bylo odsazení laserové hlavy, tím mělčí a širší byla ovlivněná oblast. Jakmile dojde k rozložení tepla působícího na povrchu součásti, dojde k ovlivnění větší a mělčí oblasti. To znamená, že ať už při změně vzdálenosti laserové hlavy nebo při změně optiky kontrolujeme nejen velikost laserového spotu, a tím i intenzitu laseru, ale i jeho tvar. [22] [23]

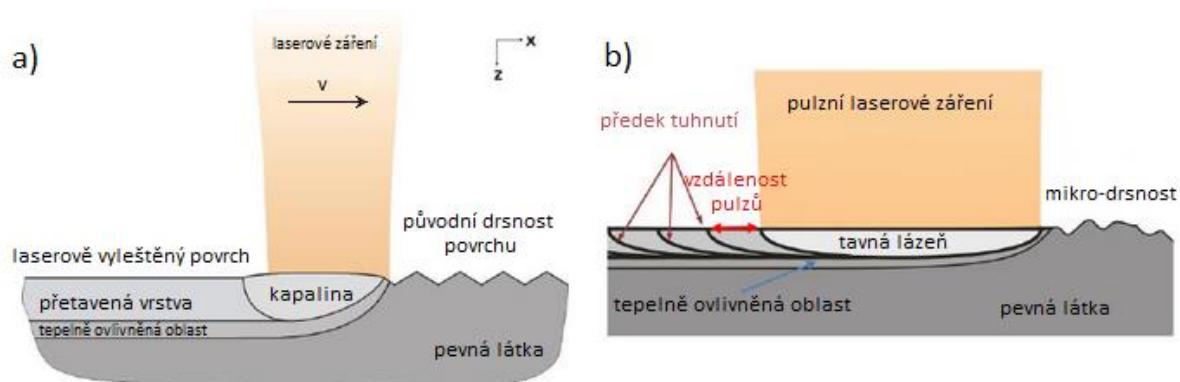
2.4 Laserové leštění pomocí přetavení povrchu

Laserové leštění je proces, při němž dochází ke snížení povrchové drsnosti obráběných dílů bez toho, aniž by probíhala ablace materiálu, která je v tomto případě nežádoucí. Navíc dochází ke strukturní přeměně, jež způsobuje změnu povrchových vlastností zpracovaného dílu, jako je například zlepšení odolnosti proti ořezu, korozi, odstranění oxidační vrstvy, zvýšení tvrdosti a tak dále. Dodnes nejpoužívanějším procesem povrchového leštění je konvenční broušení. Problémem u konvenčního broušení je malý úběr materiálu, vysoká kvalifikace obsluhy, nutnost přídavků, omezení výkonosti při broušení tvrdých materiálů, limitovaná přístupnost brousícího nástroje, mikro rozměry a komplexní povrchy. Tyto problémy vznikají právě z toho důvodu, že konvenční broušení je kontaktním způsobem obrábění. Proto musí velmi často docházet k manuálnímu broušení, které dále prodlužuje výrobu a snižuje finální přesnost. Díky tomu, že laserové leštění je bezkontaktním procesem obrábění, nám výše zmíněné problémy konvenčního broušení odpadají. Proto je laserové leštění vhodné pro automatizaci [24].

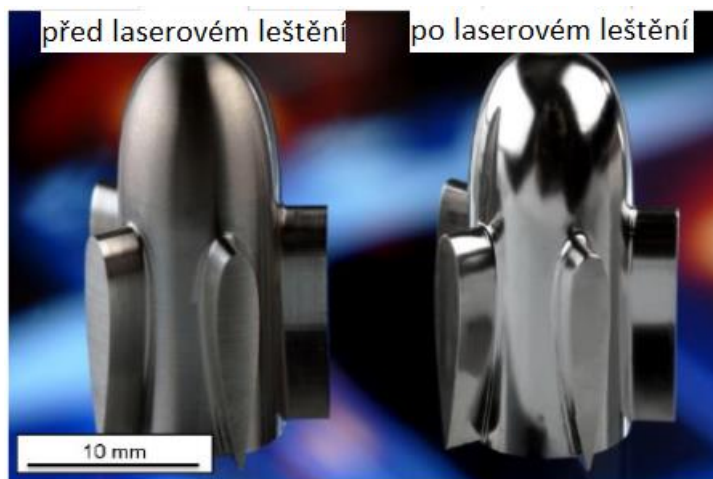
Laserové leštění kovů je založeno na procesu přetavení tenké vrstvy materiálu pomocí laserového záření. V okamžiku dopadu laserového záření dojde k vytvoření tavné lázně a povrch se přetaví. Během jevu dojde k toku přetaveného materiálu z vrcholků na povrchu materiálu do prohlubní z důvodu působení povrchového napětí. U struktury s prostorovou vlnovou délkou povrchu menší, než je spot laseru, dále dojde k vyhlazení povrchu. Jedinečností tohoto procesu je právě to, že nedochází k odstranění materiálu pomocí ablace, ale pouze k jeho redistribuování, tím pádem se nemusí počítat s přídavky a odpadají problémy a náklady spojené s odpadovým hospodářstvím například ve formě třísek u konvenčního obrábění.

Na leštění povrchů můžeme pohlížet ze dvou úhlů pohledu, a to takzvaného makro leštění a mikro leštění. Při makro leštění se obvykle používá kontinuální režim, kdy pohybujeme laserový paprsek po povrchu předem definovanou rychlostí takovým způsobem, že nový materiál je tavený na jedné straně tavné lázně a tuhne na straně druhé. Tento proces můžeme vidět na obrázku 16 a). Natavený a redistribuovaný povrch tuhne bez prasklin, pórů a skrytých vad. V práci dle (Temmler et al., 2012) je definováno, že při použití kontinuálního režimu dojde při procesu makro leštění k vytvoření přetavené vrstvy o tloušťce mezi $10 - 80 \mu\text{m}$. Při mikro leštění se používá pulzní laserové záření, což je kombinací přetavení velmi tenké vrstvy menší

než 5 μm a vypařování mikro drsností, jak můžeme vidět na obrázku 16 b). Při rozhodovacím procesu volby vhodného způsobu (makro či mikro leštění) aplikace laserového leštění je potřeba brát zřetel na kvalitu výchozího povrchu, tedy velikost drsnosti povrchu a vlnovou délku povrchu. [25]



Obr. 16 a) schématické vyjádření procesu laserového leštění pomocí přetavení povrchu při kontinuálním režimu
b) schématické vyjádření laserového leštění pomocí přetavení povrchu při pulzním režimu [25]



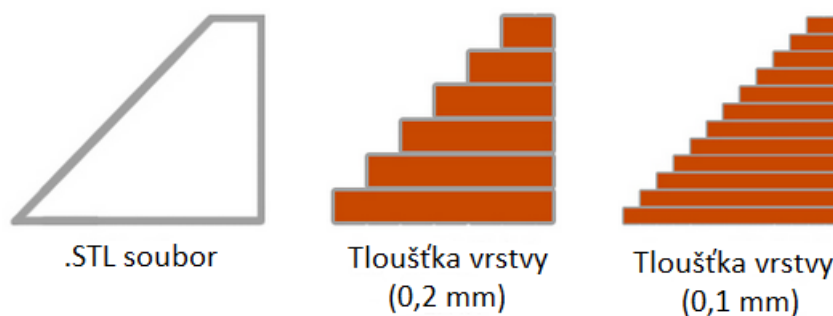
Obr. 17 Příklad laserového leštění u tvarově složitější součásti [26]

2.5 Úvod do problematiky aditivní výroby

Formálně se tato technologie označuje jako aditivní výroba (AM), avšak můžeme ji znát i pod pojmem rapid prototyping (RP) anebo pod veřejně známějším názvem 3D tisk. Označení rapid prototyping se používá v mnoha odvětvích a vyjadřuje proces, při kterém dojde k rychlé výrobě dílu nebo systému, jež reprezentuje finální produkt před vydáním a komercializací. Nejedná se však o finální produkt připravený k použití. V průmyslu se tato metoda RP využívala především k tvorbě fyzických prototypů přímo z dat digitálního modelu, kdy tyto prototypy umožňovaly zákazníkům otestovat jejich nápady a poskytovaly zpětnou vazbu při vývoji finálního produktu. Během vývoje této technologie se odborníci z oboru shodli, že výše uvedený název není nadále dostačující a neodráží její současný posun, jelikož s postupným vývojem se díly vyrobené touto technologií čím dál tím více přibližovaly finálnímu produktu. V dnešní době je celkem běžné,

že díly vyrobené touto metodou jsou určeny k přímému využití, tím pádem je už nelze nazývat prototypem.

AM technologie pracuje na principu tvorby součástí prostřednictvím přidávání materiálu ve formě vrstev, z nichž každá reprezentuje průřez tisknutého dílu z originálního digitálního modelu (CAD data). Ve skutečnosti tyto vrstvy musí mít určitou tloušťku v hodnotách několika desítek mikronů, a tedy v určitém smyslu slova aproximují reálnou podobu dílu, jak můžeme vidět na obrázku 18. Tomuto principu se říká schodišťový efekt. Z toho vyplývá, že čím menší je tloušťka jednotlivých vrstev, tím více reálná součást odpovídá digitálnímu modelu. AM technologie zahrnuje celou škálu metod, kterými lze vyrobit požadované součásti. Tyto metody se liší dle použitého materiálu, podle toho, jakým způsobem jsou nanášeny jednotlivé vrstvy, a podle způsobu jejich spojení. Metoda, která byla použita k výrobě vzorků pro tuto práci, se nazývá DMLS (direct metal laser sintering).



Obr. 18 Příklad aproximace tisknutého dílu k digitálnímu modelu v závislosti na tloušťce vrstvy [27]

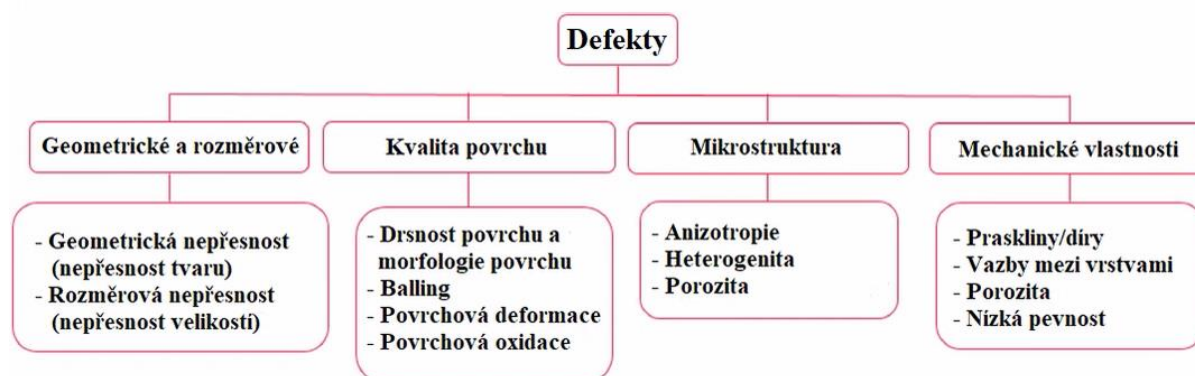
DMLS je metoda AM, jež pomocí nanášení kovového prášku zhotoví součást dle poskytnutých digitálních 3D. Samotný proces tisku začíná nanášením vrstvy na platformu a následným spečením dané vrstvy k platformě. Tento proces se opakuje vrstvu po vrstvě s tím, že dojde ke spečení pouze takového množství prášku, který odpovídá danému průřezu součásti v přesně dané výšce. Z toho plyne, že nespečený prášek lze recyklovat a znovu ho použít. Po každé spečené vrstvě dojde ke snížení platformy o hodnotu tloušťky vrstvy nanášeného prášku a pravítko nanese další vrstvu prášku. Prášek je spékán pomocí laseru, kdy dochází k pohybu laserového paprsku pomocí galvanometrických zrcadel. Prostřednictvím spékání jednotlivých vrstev dojde ke zhotovení komplexního 3D dílu [28].

2.5.1 Typy defektů vznikající během aditivní výroby

Vznik defektů při AM procesu má z velké části na svědomí samotný laser, kdy se zde projevuje citlivost laseru na změnu podmínek při spékání vrstev. Z toho plyne, že vznik defektů lze ovlivnit již během samotného procesu 3D tisku, a to optimalizací procesních parametrů laseru. Vznik defektů je při AM procesu nežádoucím jevem, protože defekty způsobují snížení mechanických vlastností při zatížení, které ale musí být dodrženy při aplikaci v kritických oborech jako je biomedicína či letecký průmysl. Výskyt těchto defektů v tištěných dílech značně limituje opakovatelnost a preciznost výroby a brání tak této technologii, aby byla

aplikována v průmyslu tam, kde musejí být zaručeny mechanické vlastnosti. Tyto defekty se mohou projevit buď již během samotného procesu aditivní výroby, nebo až při následném zpracování. Zatím neexistuje zaručený způsob, jak výskyt těchto defektů během procesu výroby predikovat, nicméně již jsou vyvinuty monitorovací systémy, které proces výroby monitorují a hledají efekty defektů. Tyto monitorovací systémy jsou ve fázi neustálého vývoje a bude ještě nějakou dobu trvat, než budeme schopni výskyt defektů během samotného procesu výroby s větší určitostí predikovat. Jedna věc je identifikace těchto defektů a druhá věc je jejich následné odstranění během procesu tisku. Z toho vyplývá, že zatím neexistuje žádný spolehlivý způsob, jak tyto defekty odstranit během procesu, snažíme se je odstraňovat až dodatečným zpracováním.

V článku dle (Malekipour and El-Mounayri, 2018) klasifikují vzniklé defekty do určitých skupin dle typu defektu a jeho výskytu, jak můžeme vidět na obrázku 19. V tomto článku jsou vyjmenovány všechny možné defekty a jak je vznik těchto defektů ovlivněn parametry laseru a prostředím během tisku. [29]



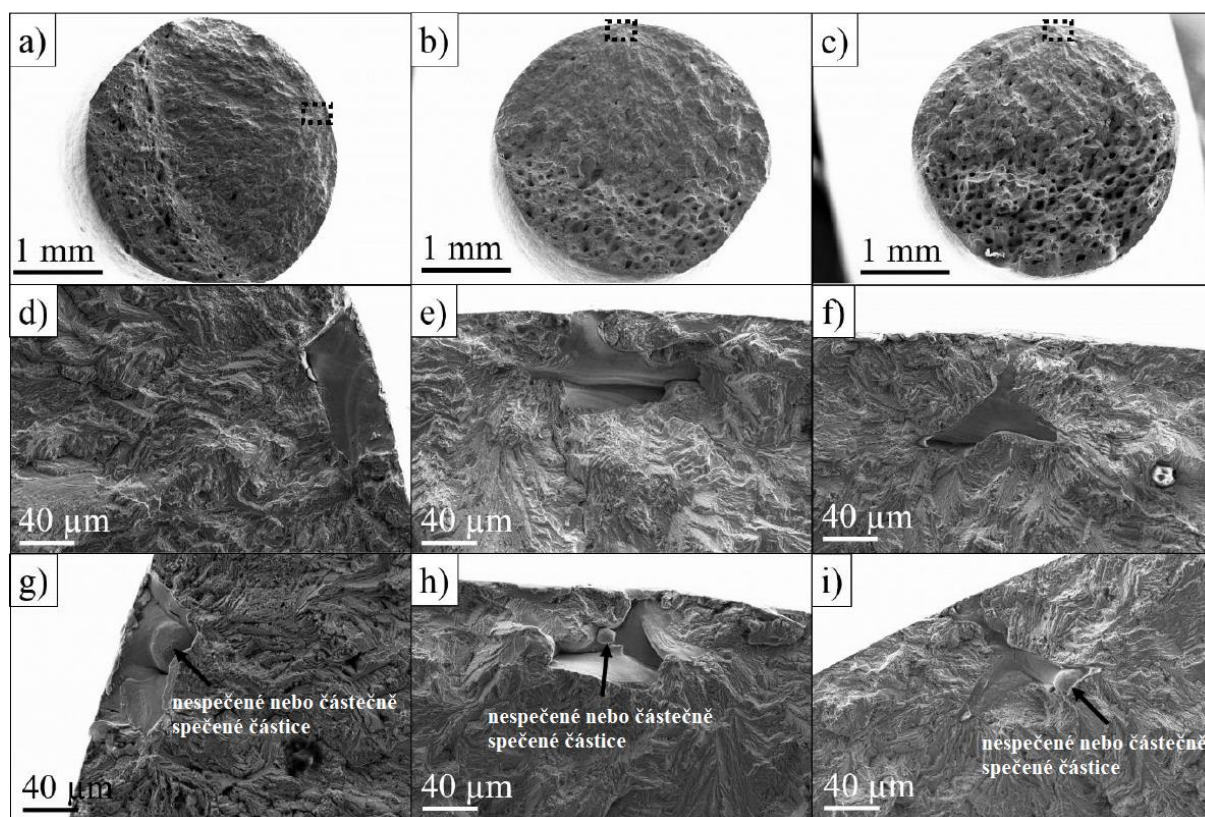
Obr. 19 Klasifikace defektů vyskytujících se v tištěných dílech [29]

Jelikož se tato práce zabývá leštěním povrchu, kdy se modifikuje povrch do hloubky v řádech desetin mm, je potřeba se zaměřit na defekty vyskytující se na povrchu, nezabýváme se tedy objemovými vadami. Asi největší vliv na mechanické vlastnosti vyrobených součástí pomocí metody DMLS má velmi špatná kvalita povrchu. K této špatné kvalitě povrchu přispívá vysoká drsnost, pohybující se od 5 Ra až po 20, v závislosti na zvolených podmínkách a orientaci dílu na platformě. Dále k ní přispívají vzniklé díry na povrchu, praskliny, porozita a nespečené částice. Důvodem, proč tyto vady přispívají ke snížení mechanických vlastností je, že slouží jako koncentrátoři napětí při zatížení.

V odborném článku od (Andreau et al., 2019) je popsáno, jak výše zmíněné defekty ovlivňují obzvláště únavové vlastnosti materiálu. V článku je zmíněno, že kvalita povrchu, defekty a mikrostruktura jsou přímo ovlivněni procesními parametry při tisku. Tyto procesní parametry se liší již během tisku, kdy jsou na konkrétní oblasti během tisku aplikovány jiné parametry laseru. Obzvláště důležité je rozlišovat přechod mezi konturou a jádrem. Na konturu jsou aplikovány tak zvané „jemnější“ parametry, a to z důvodu minimalizace povrchové drsnosti a

zachování geometrické přesnosti, kdežto parametry laseru při spékání tak zvaného jádra jsou optimalizovány za účelem dosažení co nejmenšího výskytu pórů v objemu tisknutého dílu. V této práci byla provedena únavová zkouška a z 25 vzorků, které byly leštěny, ale byla u nich zachována oblast kontury, došlo u 22 vzorků ke vzniku praskliny šířící se od pórů vyskytujících se v oblasti kontury (Obr. 20) a to, přestože bylo v oblasti jádra zaznamenáno větší množství výskytu pórů. Další zajímavá informace získaná z výše zmíněného článku byla, že u konvenčně odebraného materiálu dojde k odebrání určitého množství materiálu. Problém u tohoto způsobu úpravy povrchu je ten, že póry se vyskytují v různých hloubkách od povrchu, a tudíž může dojít k odebrání materiálu v těsné blízkosti pórů. Nedojde tak k úplnému odstranění póru, jež může způsobit selhání materiálu.[30].

Laser může být jedinečným nástrojem pro úpravu povrchu tištěných součástí, jelikož při laserovém leštění pomocí přetavení povrchu dojde k natavení materiálu o určité hloubce v závislosti na zvolených procesních podmínkách a může tedy dojít k odstranění defektů v této hloubce, aniž by došlo k odebrání materiálu.



Obr. 20 Identifikace polohy šíření trhliny zkušebního vzorku. Na obrázku a) b) c) jsou vyznačeny polohy vniku trhliny, které jsou v těsné blízkosti povrchu. Na obrázcích d) e) f) můžeme vidět póry, které vznikly na hranici přechodu mezi parametry kontury a jádrem. [30]

3 Návrh a realizace experimentů

V této kapitole dojde k praktickému využití znalostí nabytých z předchozí kapitoly. Bude zde popsáno použité zařízení jakož i samotná realizace experimentů a jejich vyhodnocení. Prvním krokem při návrhu experimentu bylo vyrobení vzorků na 3D tiskárně. Proto se postup jednotlivých experimentů plánoval již na začátku, aby se vytiskly všechny vzorky potřebné k realizaci experimentů, a tedy byl sestaven postup experimentů obsahující následující body:

1. Tisk potřebných vzorků na 3D tiskárně
2. Změření průběhu laserového svazku
3. Očištění tištěných vzorků před aplikací laserového leštění
4. Testovací laserové parametry pro seznámení se s laserem použitým při experimentu
5. Optimalizace nalezeného souboru parametrů, kdy rozhodujícím faktorem je drsnost povrchu
 - 5.1. Nalezení vhodného parametru u vzorků tisknutých pod úhlem 90 stupňů (kolmo na platformu)
 - 5.2. Nalezení vhodného parametru u vzorků tisknutých pod úhlem 45 stupňů
 - 5.3. Nalezení vhodného parametru u vzorků s povrchem rovnoběžným s platformou
6. Aplikace optimalizovaného parametru na vzorky určené pro materiálové zkoušky:
 - 6.1. Únavová zkouška
 - 6.2. Zkouška tahem
 - 6.3. Metalografický výbrus a zkouška tvrdosti
 - 6.4. Měření zbytkového napětí metodou XRD
 - 6.5. Tribologické zkoušky

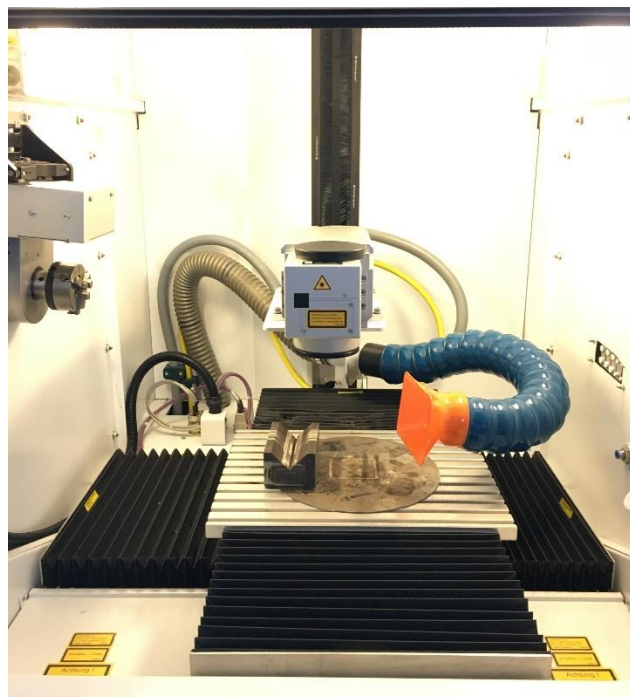
3.1 Použité zařízení k pro zhotovení a vyhodnocení experimentů

Nejdůležitějším ze všech zařízení je samozřejmě samotný laser. K této práci byl po dlouhém rozhodování mezi dostupnými lasery zvolen vláknový pevnolátkový laser od firmy Trumpf. Samotná laserová buňka (Obr. 21) byla navržena a sestavena odborníky z laserového centra v Aalenu, proto bylo obtížné a někdy i nemožné získat o celém laserovém zařízení informace. Nicméně se jednalo o laserový systém TruFiber 400 pocházející od firmy Trumpf operující na bázi kontinuálního režimu s možností modulovaného kontinuálního režimu. Tento laser se používá především ke svařování a řezání. Je vybaven 3D skenovací hlavou, která dokáže generovat laserový spot o průměru cca 27 mikronů a zajišťuje pohyb pouze ve směru x. Pohyb ve směru y je zajištěn polohovacím stolem. Tyto dvě pohybové části jsou řízeny jinými systémy, kdy parametry laseru a pohyb laseru ve směru x je řízen programem TruControl a pohyb polohovacího stolu byl zajištěn pomocí CNC řídicího systému Sinumerik.



Obr. 21 Laser použitý při experimentu

Další laser, který byl použit pro zpracování vzorků, je nanosekundový laser TruMark 5020 dosahující maximálního středního výkonu o velikosti 20 W. Tento laser se používá především pro značení materiálů. Nicméně v této práci byl použit na čištění tepelně zpracovaných vzorků po 3D tisku. Jak můžeme vidět na obrázku 22, jedná se o laser, jež má zaručený pohyb ve čtyřech osách, a to x, y, z a rotační jednotka.



Obr. 22 Nanosekundový laser použitý pro laserové čištění

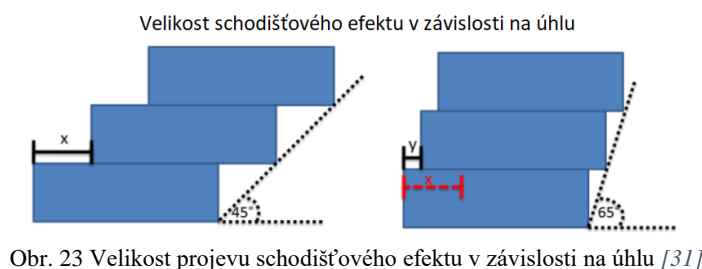
3.2 Obráběný materiál

Jedná se o práškový materiál použitý k tisknutí kovových součástí technologií DMLS. Tento materiál se nazývá MS1 a jeho složení odpovídá materiálovému složení oceli známému pod označením 18% Ni Maraging 300, 1.2709 nebo X3NiCoMoTi 18-9-5 a to podle materiálových standardů. Jedná se o nejpoužívanější materiál k tisknutí technologií DMLS. Tento materiál vykazuje neobvyklou kombinaci vysoké odolnosti v tahu a vrubové houževnatosti. Zmíněná kombinace je vhodná obzvláště u součástí, které vyžadují vysokou pevnost a odolnost proti poškození při zatížení. Mluvíme zde především o průmyslovém odvětví jako je například letectví.

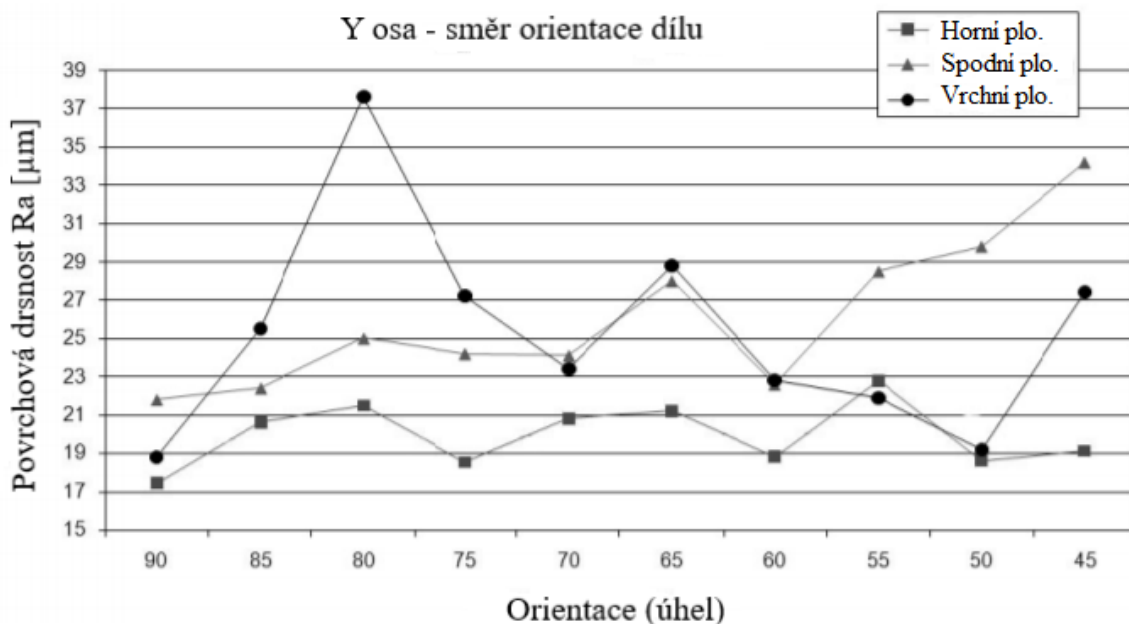
Součásti tisknuté z tohoto materiálu technologií DMLS často vyžadují tepelnou úpravu. Jedná se především o žihání a precipitační vytvrzení. Žihání je velmi důležitým procesem tepelného zpracování pro díly tisknuté z materiálu MS1, a to hned z několika důvodů. Některé jsou specifické především pro aditivní výrobu, jako je například odstranění zbytkového napětí, které způsobuje deformaci dílu. Dalším příkladem je, že díly jsou tisknuté ze spodu a poslední vrstva je na vrcholu tisknutého dílu, to znamená, že spodní vrstvy podléhají většímu počtu tepelných cyklů než horní vrstvy, kvůli čemuž vzniká nehomogenní mikrostruktura. Z tohoto důvodu díly často vyžadují žihání. V příloze je přiložen materiálový list k materiálu EOS MS1.

3.3 Návrh a tisk vzorků pro experimenty

Při návrhu vzorků pro praktickou část experimentů se vycházelo z toho, jaké zkoušky a testy byly navrženy pro komplexní vyhodnocení leštěných povrchů. Nejprve muselo dojít k optimalizaci procesních parametrů, přičemž drsnost povrchu byla jedním z nejdůležitějších parametrů k jeho optimalizování, protože výrazně snižuje mechanické vlastnosti dílů. Při tisknutí vzorků pro optimalizaci procesních parametrů musel být brán ohled i na úhel, pod kterým jsou součásti tisknuty. Vycházelo se z toho, že orientace součástí má výrazný vliv na výslednou kvalitu tištěných dílů. Obecně můžeme říci, že nejlepší kvalita povrchu je dosahována u součástí, jež jsou tisknuty kolmo na platformu. Se změnou úhlu dojde k výraznějšímu projevení schodišťového efektu a tím pádem i ke zhoršení povrchu, jak můžeme vidět na obrázku 23.



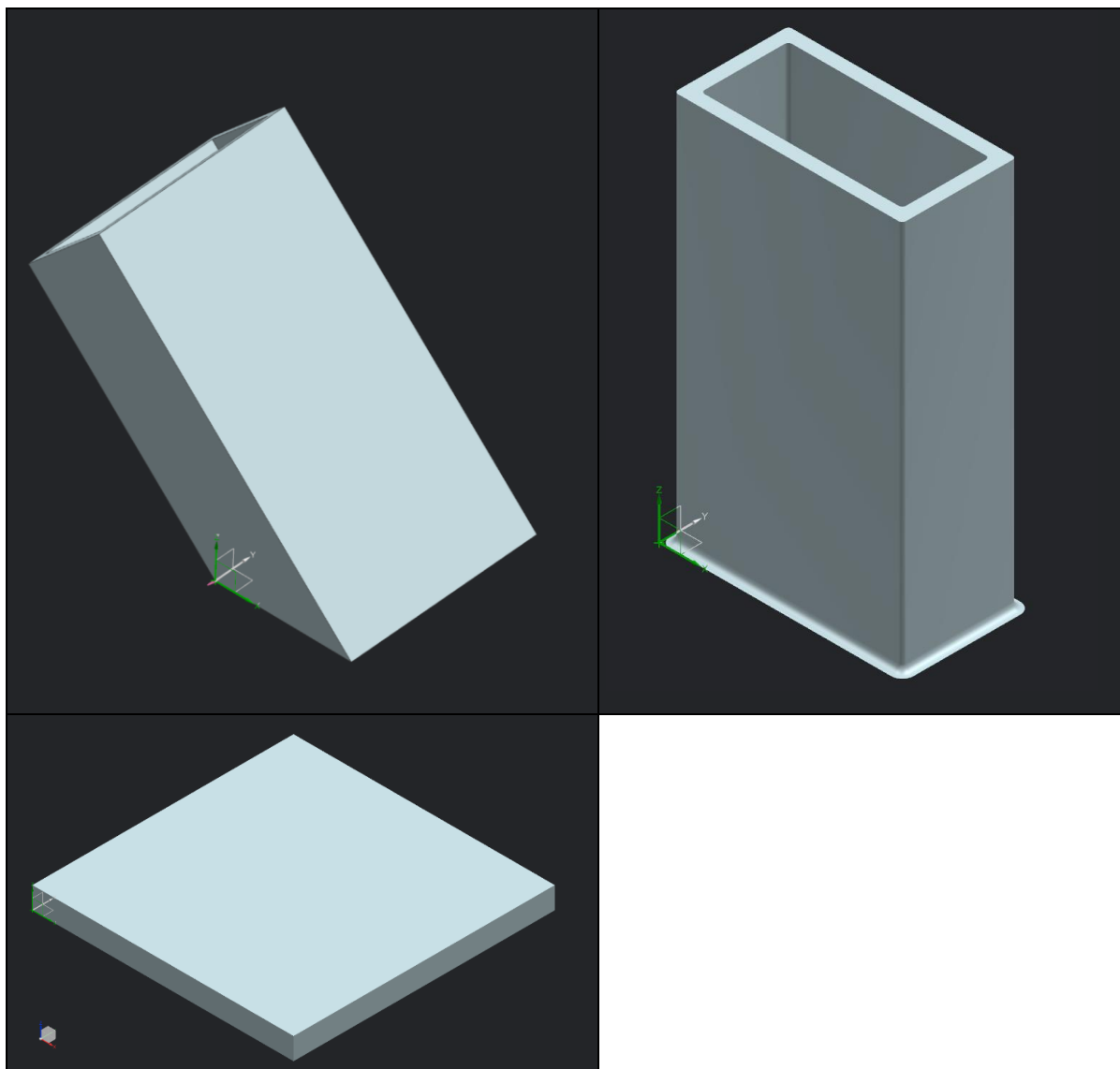
Ve své disertační práci se (Thomas, 2009) zabýval vlivem orientace dílů na platformě na velikost drsnosti Ra tištěných dílů. Jednotlivé díly byly tisknuty ve směru osy y a to po pěti stupních, vyhodnocována byla drsnost spodní, horní a vrchní plochy (viz obrázek 24). Z grafu můžeme vidět, že drsnost povrchu se zhoršovala se zmenšujícím se úhlem. Nejhorší drsnost byla naměřena při 45 stupních. Hodnota 45 stupňů se určuje jako hodnota, při níž je ještě bezpečné tisknout díl bez podpor, ale na úkor kvality povrchu.



Obr. 24 Velikost povrchové drsnosti v závislosti na úhlu tisknuté plochy [32]

Se zřetelem na výsledky experimentů dle (Thomas, 2009), byly zvoleny tři druhy vzorků s ohledem na orientaci. Nejprve byl zvolen vzorek tisknutý pod úhlem 90 stupňů, pod kterým povrch oproti ostatním úhlům vykazuje výrazně lepší drsnost povrchu, protože zde dojde k nejmenšímu projevu schodišťového efektu. Jako další úhel tisknutých vzorků byl zvolen úhel 45 stupňů, který se vyznačuje zaručeně nejhorší drsností povrchu, který lze ještě „bezpečně“ vytisknout bez užití podpor. Posledním druhem vzorků určených pro optimalizaci procesních parametrů jsou vzorky tisknuté v ose z, kdy byl brán ohled na vrchní plochu. Důvodem pro výběr těchto druhů vzorků byla nemožnost zaručení konstantní kvality povrchu při tisku, jelikož aditivní technologie je určena pro tisk tvarově složitých součástí. Proto je potřeba pozorovat chování laseru při leštění povrchu u vzorků s kompletně rozdílnou topologií povrchu. Jelikož samotná interakce laseru s materiálem je vysoce závislá na vlastnostech povrchu, tak bylo potřeba zjistit, k jakému zlepšení v povrchové drsnosti dojde u povrchů s rozdílnou topologií.

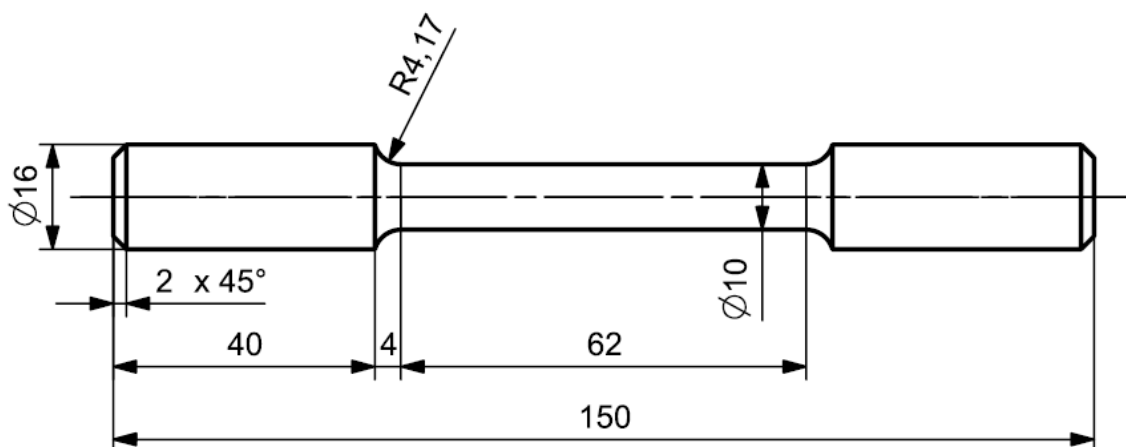
Pro optimalizaci procesních parametrů se vytiskly jednoduché duté hranoly, aby došlo nejen ke zpracování co nejmenšího množství prášku potřebného pro tisk vzorků, ale i ke zkrácení doby tisku. Na vzorky bylo aplikováno laserové záření, velikost testovaného pole byl 10 x 5 mm.



Obr. 25 3D modely vzorků určené pro optimalizaci parametrů a) vzorek tisknutý pod úhlem 45 stupňů b) vzorek tisknutý pod úhlem 90 stupňů c) vzorek tisknutý pod úhlem 0 stupňů

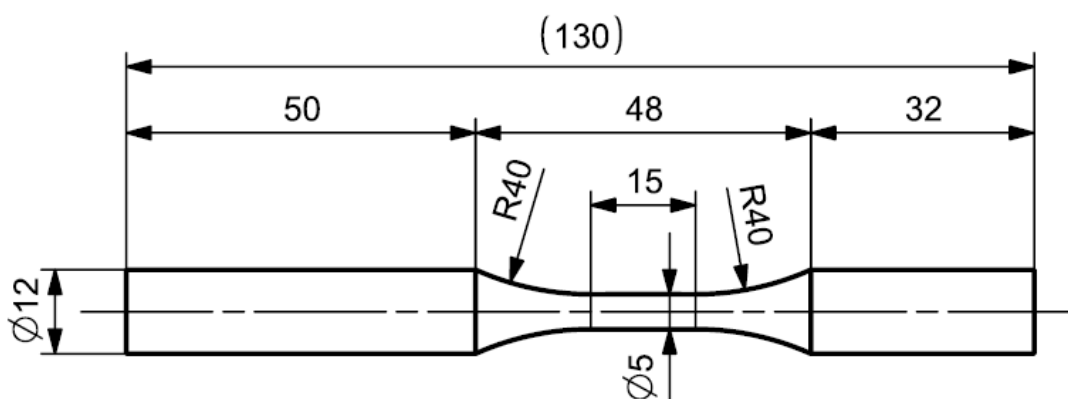
Vzorky pro mechanické zkoušení byly vybrány s ohledem na již proběhlé mechanické zkoušky, které byly provedeny v rámci projektů v laboratoři experimentálního obrábění, jelikož byly navrženy akreditovanou laboratoří a odpovídají normám. Pro mechanické testování byla zvolena tahová zkouška a únavová zkouška. Tahová zkouška byla vybrána proto, že patří mezi nezákladnější mechanické zkoušky, které nám dodávají základní informace o materiálu. Počet vzorků určených pro tahovou zkoušku bylo 10 ks a bylo rozhodnuto, že se aplikují tři sety parametrů na třech vzorcích za účelem zjištění opakovatelnosti výsledků. Jeden vzorek byl

ponechán pro odladění aplikace laserového leštění, popřípadě jako náhradní vzorek při chybné aplikaci laserového leštění. Na obrázku 26 je možné vidět rozměry navrženého vzorku.



Obr. 26 Zakóvaný model tahovky

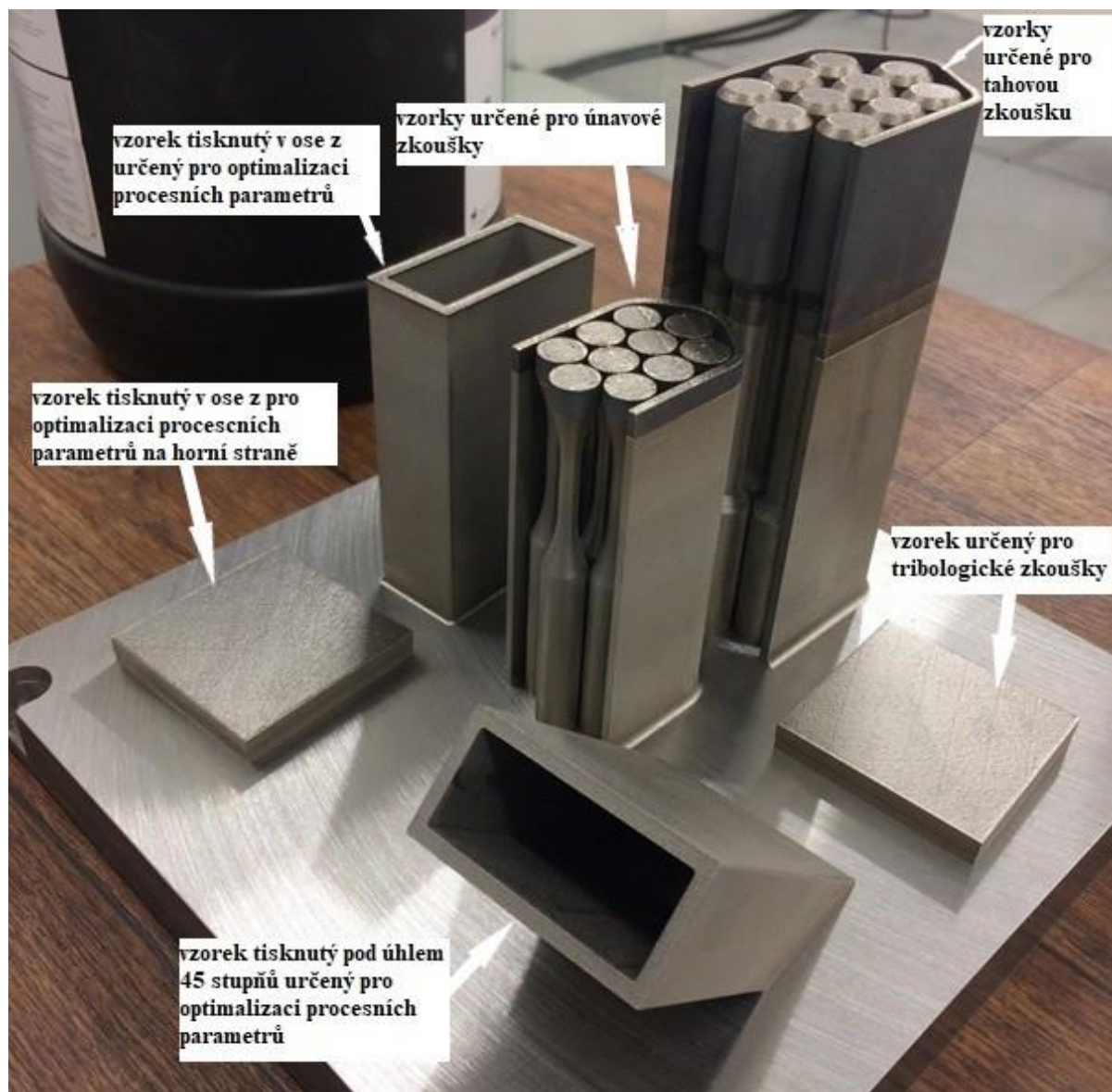
Únavová zkouška byla zvolena proto, že při ní dojde k výraznému projevu nedostatků vznikajících při tisku. Výsledkem zkoušky pro cyklické namáhání je tzv. Wohlerova křivka, přičemž pro správně vykreslení křivky a z důvodu zajištění určitého prostoru pro chyby vzniklé při volbě napětí pro provedení zkoušky zapotřebí alespoň 10 – 12 ks vzorků. Kvůli vysokým finančním nákladům, časové náročnosti na samotnou zkoušku i náročnosti na vytištění bylo rozhodnuto o vytištění pouze 10 ks vzorků. Na těchto deset vzorků budou aplikovány tři sety parametrů laseru po třech kusech.



Obr. 27 Zakóvaný model vzorku pro únavové zkoušky

Na obrázku 28 lze vidět vytisknutou platformu se všemi vzorky použitými při experimentech. Při prvním tisku došlo k zastavení procesu tisku a muselo dojít k navázání tisku u vzorků určených k tahovým zkouškám. U vzorků určených pro únavové zkoušky bylo rozhodnuto nenavázat tisk, jelikož ze zkušeností laboratoře experimentálního obrábění bylo zjištěno, že změna procesu při 3D tisku může negativně ovlivnit průběh únavové zkoušky. Aby nedošlo

k ovlivnění věrohodnosti provedených zkoušek, se přešlo na nový tisk vzorků pro únavové zkoušky.



Obr. 28 Vytisknutá platforma se všemi vzorky použitými v experimentu

3.4 Změření průběhu laserového spotu

Změření průběhu laserového profilu je nezbytnou součástí analýzy laserového svazku pro zjištění důležitého parametru laseru, kterým je průměr a průběh laserového spotu. Průměr laserového spotu patří mezi nejdůležitější parametry laserového zařízení hned vedle výkonu a energie. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3.4, laserový profil může mít několik tvarů, mezi nejznámější patří top-head anebo Gaussův profil. U profilu typu top-head není problém určit průměr laserového spotu, jelikož se po ose z nemění jeho průřez. Problém při určení průměru laserového spotu nastává u Gaussového profilu kvůli změně průměru ve směru osy z, proto je obtížné určit průměr u tohoto typu profilu. Existuje několik definic, jak určit průměr laserového

spotu, kterými jsou například hodnoty FWHM (full width max high), $D4\sigma$ a $1/e^2$, kdy při měření laserového spotu podle diagnostických přístrojů je dle normy ISO 11146 jasně dána definice laserového spotu dle metody $D4\sigma$.

K měření laserového spotu byly k dispozici dva měřicí systémy, a to Focus Monitor od firmy Primes a Focus Monitor P100 od firmy Metrolux. Jako první bylo použito zařízení Focus Monitor od firmy Primes. Tento měřicí systém je vhodný pro měření kontinuálního módu. Jelikož námi použitý laser disponuje kontinuálním a modulovaným kontinuálním režimem, bylo pro měření laserového spotu zvoleno nejdříve měřicí zařízení od firmy Primes. Nicméně při měření se objevil problém ve velikosti minimálního měřitelného laserového spotu, kdy toto měřicí zařízení dokáže měřit laserový spot o minimální velikosti $80\ \mu\text{m}$. Z toho důvodu došlo k naměření průměrů laserového spotu, který neodpovídal skutečnosti. Na obrázku 29 lze vidět měřicí zařízení od firmy Primes. Proto se následně přešlo na druhé měřicí zařízení od firmy Metrolux (viz obrázek 30). Toto měřicí zařízení je určeno převážně pro měření pulzních laserů a proto není ideálním nástrojem pro měření námi zvoleného laseru, přesto dokáže měřit průměr laserového spotu v rozsahu $10 - 250\ \mu\text{m}$.

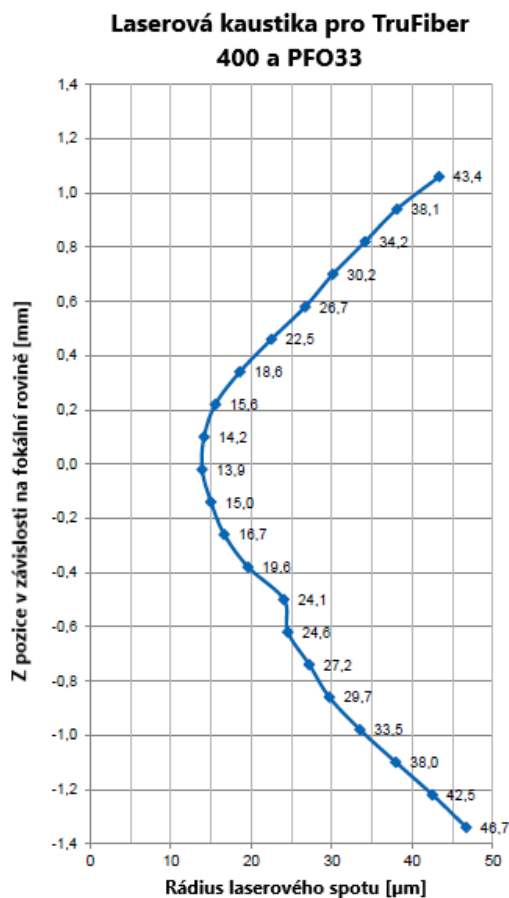


Obr. 29 Měřicí zařízení Focus Monitor FM+

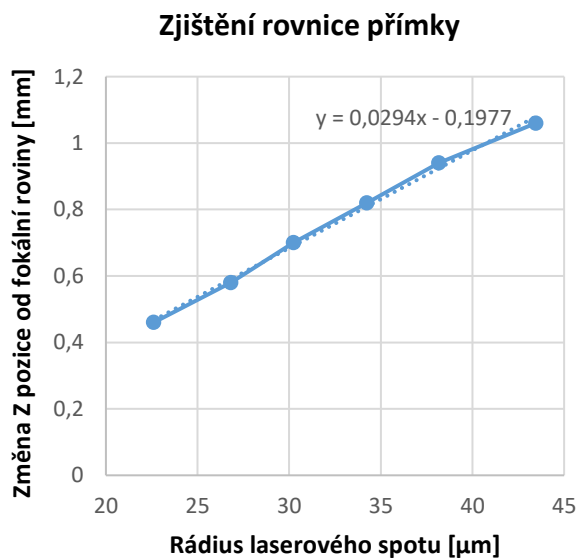


Obr. 30 Měřicí zařízení Focus Monitor P100

Pro vykreslení laserové kaustiky bylo zapotřebí naměřit určitý počet průměrů, jejichž velikost se mění ve směru osy z . Pro vykreslení kaustiky bylo třeba naměřit změnu průměrů laserového spotu nad oblastí DOF (depth of focus), tedy nad oblastí hloubky fokusu, kde dochází k vysoce nelineárnímu průběhu laserové kaustiky, a tedy k minimální změně vlastností laserového paprsku. DOF je často definováno u laserového paprsku pomocí Rayleighovy vzdálenosti. U laseru TruFiber byla tato hodnota naměřena $0,42\ \text{mm}$. Na grafu 1 můžeme vidět vykreslený průběh laserové kaustiky pro laser TruFiber 400 a optické hlavy PFO 33.



Graf 1 Naměřený průběh laserové kaustiky



Graf 2 Proložení přímkou lineární části laserové kaustiky a zjištění rovnice přímky

Díky rovnici přímky lze dopočítat libovolný průměr laserového spotu při posunutí laserové hlavy nad materiál, pokud uvažujeme lineární průběh. Pro naši konkrétní laserovou hlavu tedy platí:

$$\omega = \frac{z + 0,1977}{0,0294} * 2 = [\mu\text{m}] \quad (3.1)$$

kdy hodnota z vyjadřuje velikost posunutí laserové hlavy nad materiál v milimetrech a hodnota ω vyjadřuje průměr laserového spotu na povrchu materiálu. Znalost hodnoty průměru laserového spotu na povrchu materiálu je nezbytná, protože pomocí ní lze provést výpočet nejen překrytí laserových stop ve směru posuvu laseru a bočního překrytí (viz. kapitola 2.3.3), ale i výpočet fyzikálních veličin jako je intenzita laseru. Vypočítané hodnoty poloměrů laserového spotu lze vidět v tabulce 1.

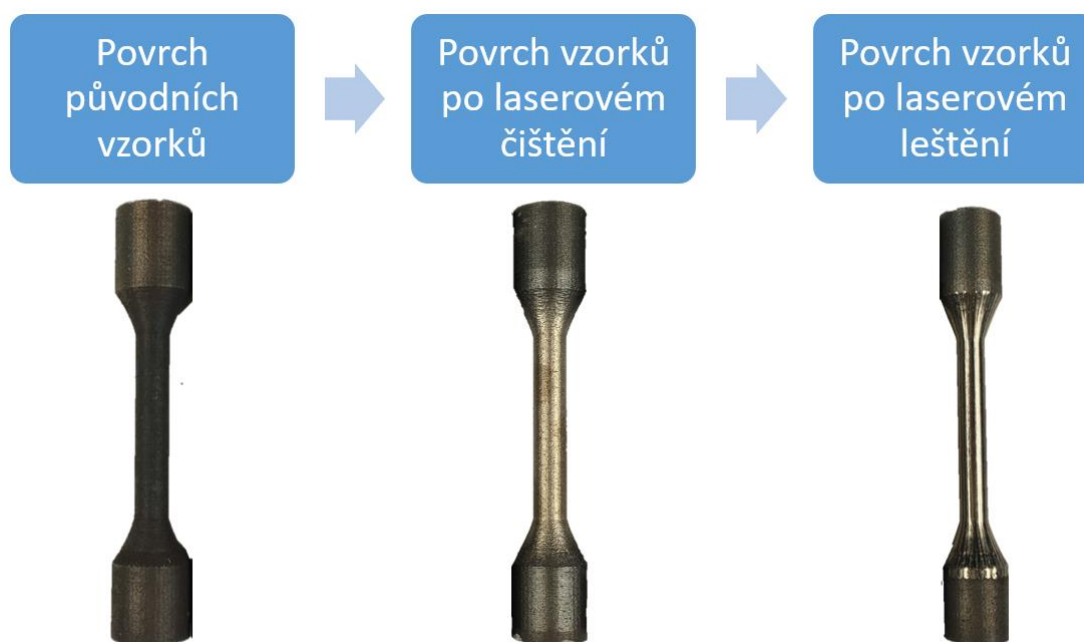
Tabulka 1 Tabulka hodnot poloměrů laserového spotu s měnící se vzdáleností z

z [mm]	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ω [μm]	422	490	558	626	694	762	830	898	966	1034	1102	1170	1238

3.5 Očištění tištěných vzorků před aplikací laserového leštění

Po samotném procesu tisknutí a tepelného zpracování dochází k čištění vzorků. Mezi čištění patří například odstraňování podpor, jehož popis by zabral celou kapitolu, jelikož se jedná o proces, který vyžaduje vysokou zručnost dělníka a výrazně prodlužuje čas výroby. V této práci byly vzorky navrženy tak, aby při jejich aditivní výrobě k využití podpor nedošlo, jelikož by do samotného procesu laserového leštění vkládaly další neznámou, jež by mohla mít negativní dopad na samotný proces leštění a tím pádem zkomplikovat situaci při vyhodnocování naměřených výsledků.

Dalším druhem čištění, který je obecně využíván je pískování. Pomocí pískování dochází k odstranění nečistot jak po tepelném zpracování, tak i po samém 3D tisku. Jelikož se jedná o abrazivní metodu, dochází k odstranění nečistot pomocí abrazivního média, které je vypuštěno z pistole a dopadá na povrch pod vysokým tlakem. To má za následek deformaci povrchu ovlivňující topologii původního povrchu. Jelikož je žádoucí zanechání původní topologie povrchu a sledování vlivu laserového leštění na původní povrch, byla tato metoda zvolena jako nežádoucí pro očištění vzorků před laserovým leštěním.

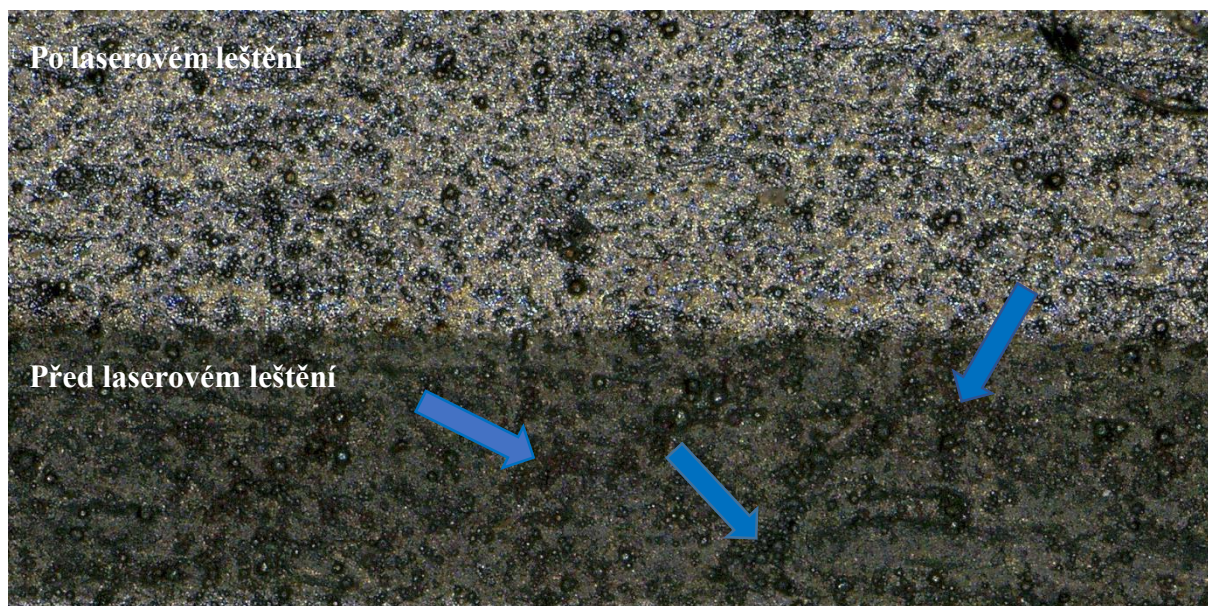


Obr. 31 Proces opracování vzorků od původního vzorku až po laserové leštění

Na vzorky byla aplikována metoda laserového čištění, jelikož je schopna odebírat nečistoty, aniž by došlo k ovlivnění struktury povrchu. Na obrázku 31 lze vidět, jak vypadaly vzorky po samotném laserovém čištění a následném leštění. Na první pohled je zde patrné, že došlo k odstranění nečistot po tepelném zpracování.

Na obrázku 32 se nachází snímek z mikroskopu porovnávající povrch před a po laserovém čištění. Na části povrchu před aplikací laserového leštění lze pozorovat dva druhy nečistot, jeden typ vznikl, jak již bylo zmíněno výše, po tepelném zpracování a druhý typ vznikl při 3D

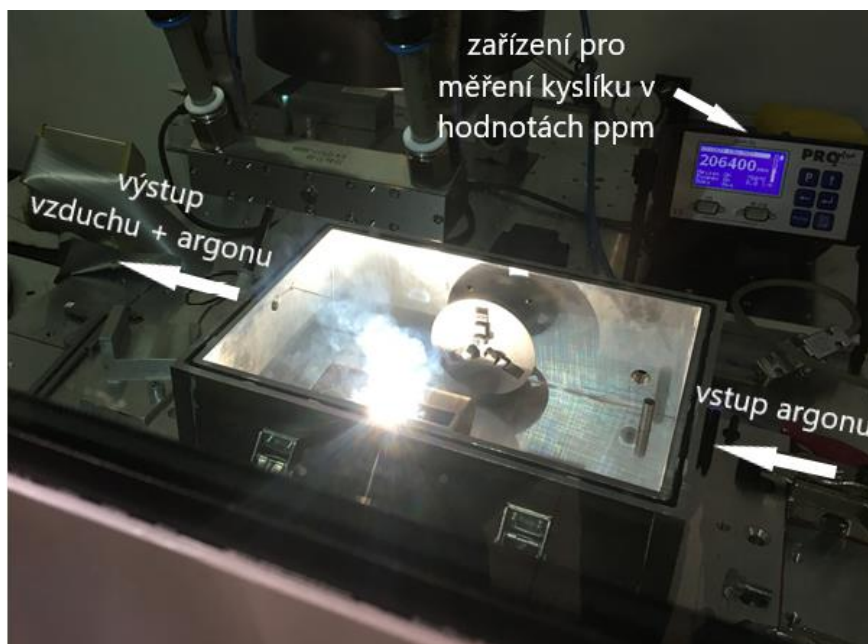
tisku. Jak je zřejmé z obrázku 31, modré šipky znázorňují nadměrný výskyt kovového prášku, který se zachytil na povrchu, kde se převážně vyskytují prohlubně. Dále je na obrázku 31 vidět, že na povrchu po laserovém leštění se tyto oblasti s nadměrným výskytem volně loženého kovového prášku nevyskytují. Místy můžeme jednotlivé kuličky kovového prášku vidět i na laserem čištěné ploše, nicméně tyto kuličky jsou částečně přitaveny k povrchu a nelze je odstranit, aniž by došlo k deformaci původního povrchu.



Obr. 32 Povrch před a po aplikaci laserového čištění

3.6 Využití ochranné atmosféry při laserovém leštění

Ještě před samotnou aplikací laserového leštění a hledáním vhodného parametru bylo zapotřebí zajistit ochranu atmosféru, aby nedocházelo k výskytu nežádoucích jevů při samotném laserovém leštění. Jednalo se především o dva jevy, tím prvním je oxidace povrchu, kdy inertní plyny nepodléhají chemickým reakcím a tím pádem nereagují se samotným laserovým leštěním. Druhý problém můžeme pozorovat na obrázku 33. Kyslík obsažený ve vzduchu v podstatě sloužil jako palivo a umocňoval samotnou reakci laserového leštění. Na obrázku 33 dále můžeme vidět vzduchovou komoru, na jejíž jedné straně docházelo k dodávání argonu do komory a na druhé straně docházelo k odvodu proudu vzduchu a později argonu z komory do okolí. Dále bylo na komoru napojeno měřicí zařízení PRO2 plus Oxygen Analyzer, které měřilo množství kyslíku obsaženého v komoře v hodnotách ppm. Tento otevřený systém se vyznačuje jednoduchostí a nízkou cenou samotné komory, nicméně musí dojít k neustálému dodávání argonu do komory, což náklady výrazně zvyšuje. Proto je tato komora vhodná spíše pro výzkum než pro sériovou výrobu. Jak můžeme vidět na obrázku 33, kyslík na vzduchu vykazuje hodnotu 206400 ppm. Aby nedocházelo k oxidaci, musí se hodnota ppm v komoře pohybovat pod 40 ppm. Během laserového leštění se hodnota ppm udržovala pod hodnotou 10.



Obr. 33 Soustava proudění argonu, vzduchová komora a měřič kyslíku

3.7 Nalezení vhodného parametru z pohledu drsnosti

Jelikož se jednalo o nový laser, který nebyl zakoupen jako celek, ale byl sestaven po částech, neexistovala žádná znalostní databáze na pracovišti LAZ, a tak nebylo možné zúžit výběr parametrů vhodných pro nalezení optimálních parametrů. Proto došlo k výběru parametrů, které byly zkoumány a zhodnocovány dle zkušeností autora, ale i zaměstnanců pracoviště LAZ, dokud nebylo dosaženo takové kombinace parametrů, která by při následné optimalizaci mohla dosáhnout povrchové drsnosti $Ra < 0,8 \mu\text{m}$. Tato hodnota byla zvolena z důvodu provedení všech materiálových zkoušek.

Ještě před samotným laserovým leštěním bylo třeba vypočítat rychlost pohybu stolu vůči pohybu laserového svazku. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole 3.1, pohyb ve směru x je řízen optickou hlavou, kde se volí pouze hodnota rychlosti pohybu laserového svazku do programu TruControl. Nicméně pohyb ve směru osy y je řízen pomocí pohybu stolu. Tato hodnota byla zadávána do programu Sinumeric a aby došlo k vytvoření souvislé plochy, musela být tato hodnota dopočtena v závislosti na různých parametrech dle vzorce:

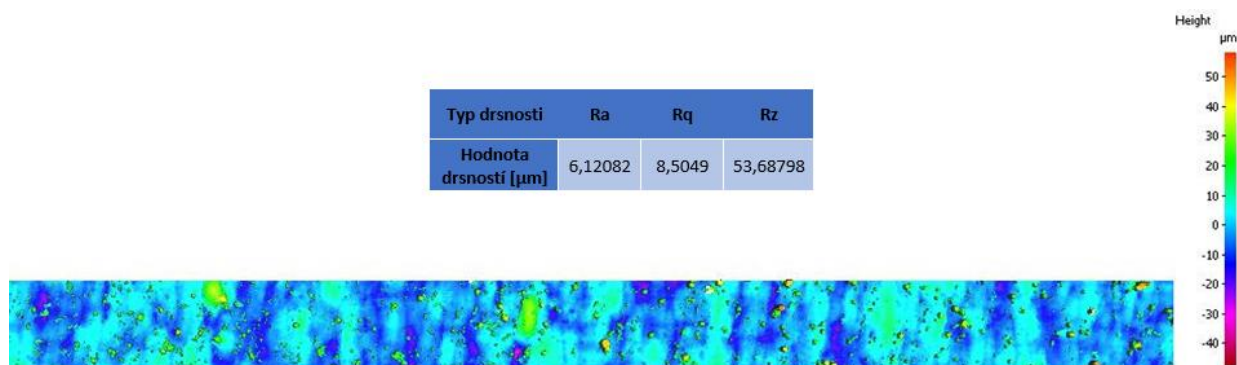
$$v_s = \frac{LO}{t_{line}} = \frac{LO}{\frac{L_{line}}{v} + 0,012} = \left[\frac{mm}{s} \right] \quad (3.2)$$

kdy v_s vyjadřuje rychlost, kterou se má stůl pohybovat. LO znamená velikost překrytí, t_{line} vyjadřuje dobu přejezdu laserového svazku po jedné přímce v ose x. L_{line} vyjadřuje délku přímky a v je rychlost pohybu laserového svazku ve směru osy x. Pokud se tedy některá tato hodnota změnila, bylo třeba přepočítat i rychlost posuvu stolu, proto byl vytvořen excel se všemi potřebnými funkcemi, kde byla hodnota v_s automaticky vypočtena.

Jak již bylo řečeno na začátku kapitoly pro porozumění, jak laser TruFiber 400 vlastně funguje, došlo k výběru 34 parametrů, díky kterým jsme získali podstatné informace o tom, jak se materiál chová vůči změnám jednotlivých parametrů v makro měřítku. Jelikož zde docházelo k výrazným změnám v parametrech, bylo třeba pro nalezení vhodného parametru tento parametr dále optimalizovat po nastavení menších kroků v parametrech. Jakmile byl ze 34 parametrů nalezen ten, který odpovídal požadavku $R_a < 0,8 \mu\text{m}$, došlo k vytvoření matic, kde se sledovalo, jaký vliv mají změny parametrů laseru na výslednou kvalitu z pohledu drsnosti.

3.7.1 Nalezení vhodného parametru u vzorků tisknutých pod úhlem 90 stupňů (kolmo na platformu)

Nejdříve došlo ke změření drsnosti původního povrchu, aby mohly být výsledky srovnány. Naměřený povrch i s výsledky jednotlivých drsností je možné vidět na obrázku 34.

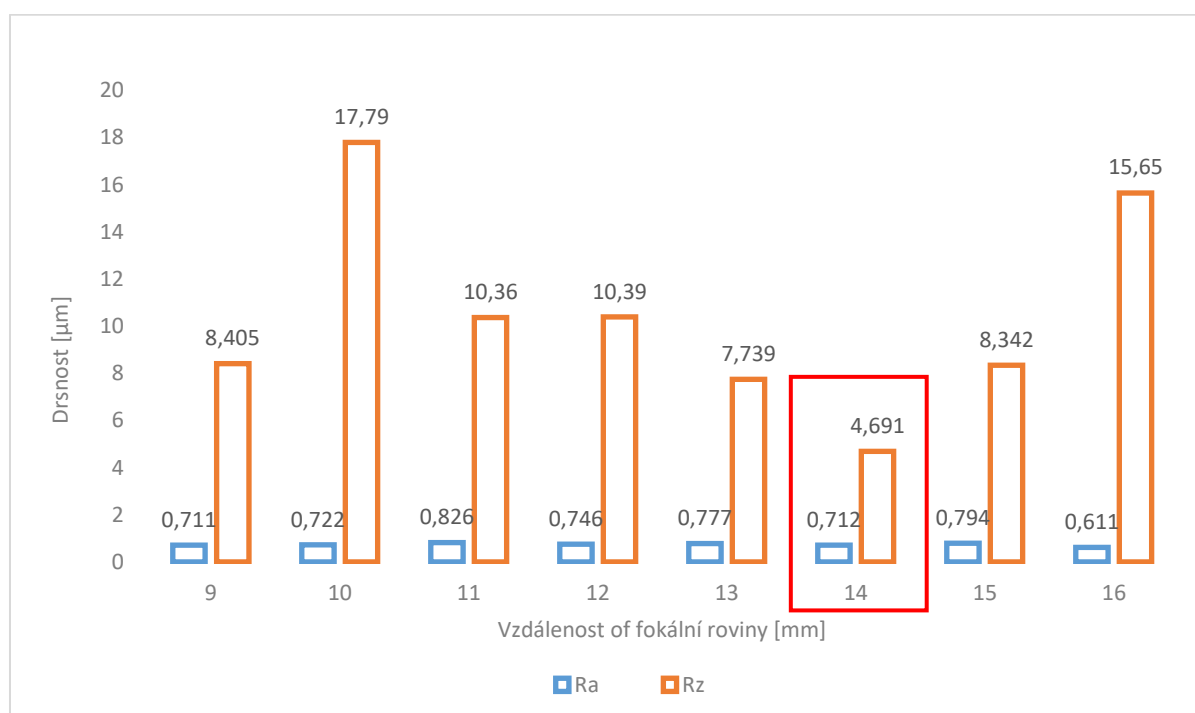


Obr. 34 Naměřený povrch pomocí IFM - G4 a vyhodnocené hodnoty drsností u vzorků tisknutých pod úhlem 90 stupňů

V tabulce 2 můžeme pozorovat změnu v hodnotách vzdálenosti od fokální roviny a její vliv na drsnost povrchu. Jak bylo možné vidět v tabulce 2, nedošlo k výraznému projevu změn drsnosti povrchu v závislosti na změně vzdálenosti fokální roviny, kdy se hodnoty drsnosti od sebe lišily v řádech stovek setin mikrometrů. Tento jev se několikrát projevil, přesto muselo dojít k výběru nejlepší hodnoty. Proto jako hlavní parametr pro rozhodování byl určen parametr R_a a jako sekundární rozhodovací parametr byl zvolen parametr R_z . Jak je možné vidět v tabulce 2, hodnota vzdálenosti od fokální roviny začíná na hodnotě 9. Tato hodnota nebyla náhodně zvolena, ale ukázala se jako limitní hodnota. Když došlo k nastavení fokální roviny pod hodnotu 9, tak nastalo ovlivnění průchozího skla vzduchové komory a sklo se začalo pálit. Jak lze pozorovat v tabulce 2, nejlépe vyšla hodnota vzdálenosti 14 mm nad fokální rovinou.

Tabulka 2 Tabulka závislosti drsnosti na změně vzdálenosti od fokální roviny

Závislost drsnosti na změně velikosti průměru laserového spotu při změně vzdálenosti od fokální roviny				
Vzdálenost od fokální roviny [mm]	Měření uprostřed vzorku		Měření na okrajích vzorků	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
9	0,711	8,405	0,773	15,61
10	0,722	17,79	0,721	4,129
11	0,826	10,36	0,923	16,37
12	0,746	10,39	0,849	9,516
13	0,777	7,739	0,772	8,702
14	0,712	4,691	0,731	10,64
15	0,794	8,342	0,932	8,81
16	0,611	15,65	0,886	13,12



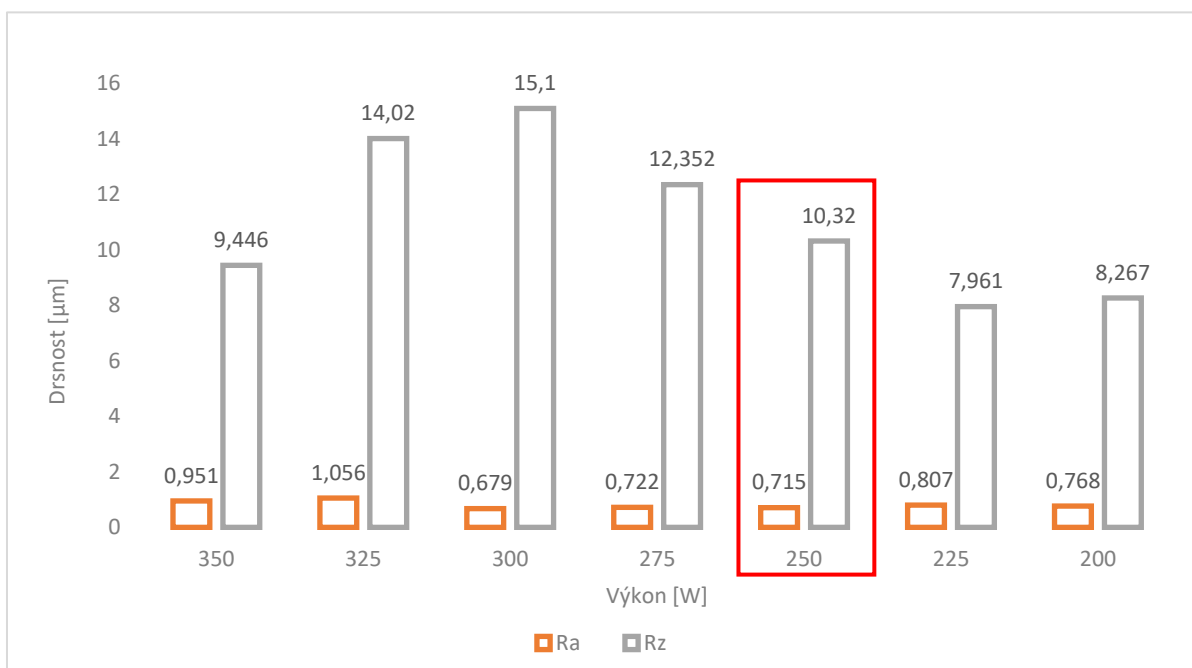
Graf 3 Graficky znázorněna závislost drsnosti na změně fokální vzdálenosti

Dalším parametrem, kde se zkoumal vliv na výslednou drsnost povrchu, byl výkon, který výrazně ovlivňuje množství energie dodané do materiálu. Výsledky drsnosti v závislosti na změně výkonu můžeme vidět v tabulce 3 a grafu 4. Jak je možné vypočítat z naměřených výsledků, nedocházelo k výrazné změně drsnosti povrchu při změně výkonu, což se týče střední aritmetické odchylky profilu. Zde se předpokládalo, že největší podíl na zredukování drsnosti

povrchu měla samotná délka pulzu, tím pádem nedocházelo k výraznějším změnám při změně ostatních parametrů.

Tabulka 3 Tabulka závislosti drsnosti na změnu výkonu

Drsnost v závislosti na změně výkonu, který ovlivňuje energie					
Konstantní parametry: $f=94,56$ Hz, rychlost=15 mm/s, délka pulzu=10 ms, vzdálenost od fokální roviny=14mm					
Výkon [W]	Energie [J]	Měření uprostřed vzorků		Měření po okrajích vzorků	
		Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
350	3,5	0,951	9,446	0,823	8,039
325	3,25	1,056	14,02	1,083	13,67
300	3	0,699	15,1	0,873	15,06
275	2,75	0,722	12,352	0,979	9,894
250	2,5	0,715	10,32	0,705	8,607
225	2,25	0,807	7,961	0,97	8,73
200	2	0,768	8,267	0,871	13,47



Graf 4 Graficky znázorněná závislost drsnosti na změně výkonu

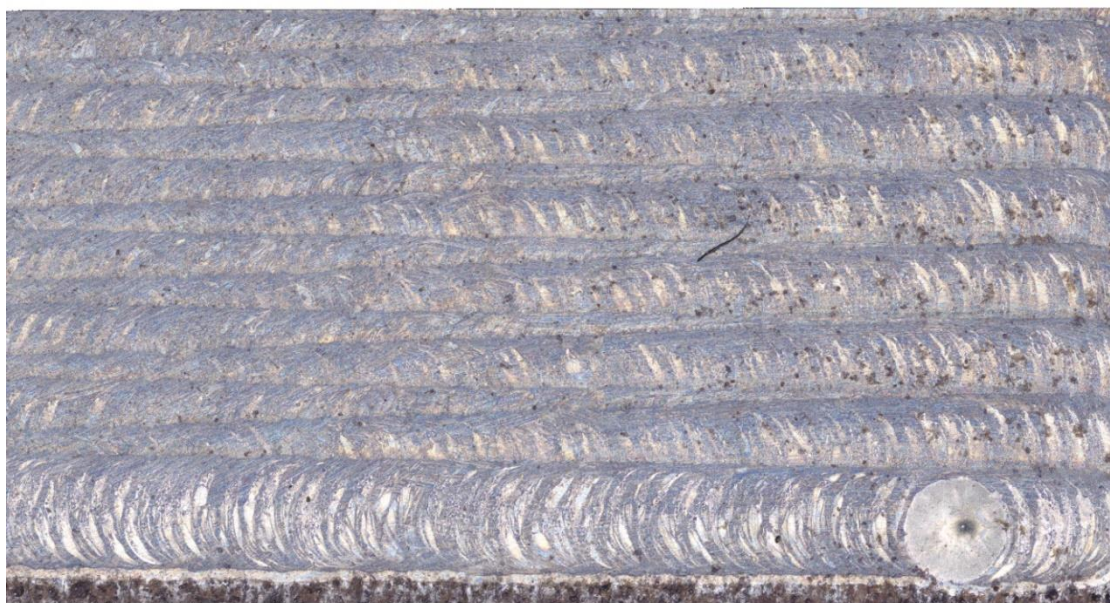
Posledním zkoumaným parametrem byla hodnota překrytí, kdy byl zkoumán vliv rychlosti na výslednou drsnost. Zde bohužel došlo k omezení nastavení hodnot frekvencí. Při aplikaci délky pulzu o hodnotě 10 ms bylo možné nastavit frekvenci na maximální možnou hodnotu 94,56 Hz. Protože nemohlo dojít k navýšení hodnoty frekvence a její snižování by nedávalo smysl, jelikož by muselo dojít i ke snížení rychlosti, tak nedošlo k optimalizování procesních parametrů z pohledu frekvence. Snížená hodnota rychlosti by způsobila prodloužení laserového leštění a

přehřívání vzorků. Po optimalizaci tří parametrů došlo k celkové redukci drsnosti o 90% z hodnoty Ra 6,121 μm na hodnotu Ra 0,595 μm .

Tabulka 4 Tabulka závislosti drsnosti na změnu stupně překrytí

Závislost drsnosti na změnu rychlosti, která ovlivňuje stupeň překrytí					
konstantní parametry: vzdálenost od fokální roviny=14 mm, výkon=250, frekvence=94,56, délka pulzu=10 ms					
Rychlost v [mm/s]	Stupeň překrytí [%]	Měření uprostřed vzorků		Měření na okrajích vzorků	
		Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
5	94	0,785	7,935	1,041	12,52
10	88	0,595	7,846	0,861	8,561
15	82	0,65	15,49	0,779	15,62
20	76	0,614	12,16	0,971	12,33
25	70	0,741	8,308	0,731	8,391

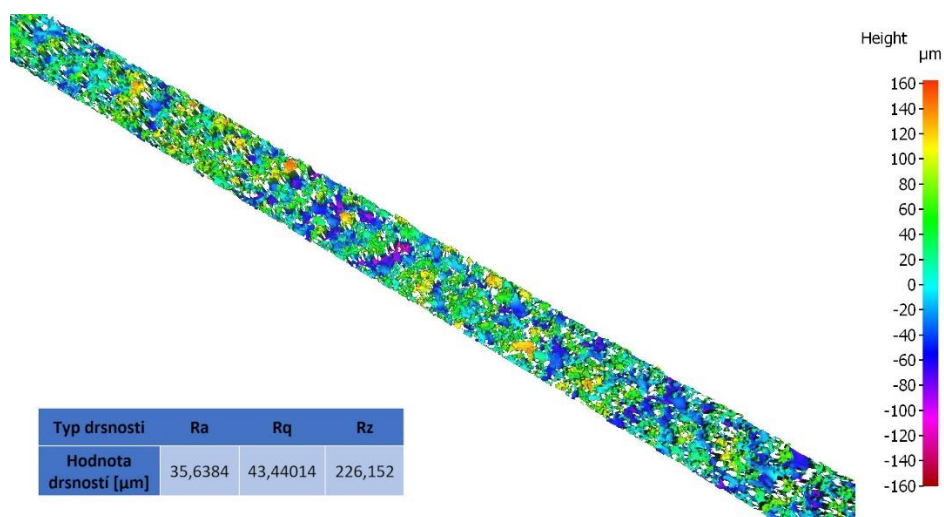
V tabulce 2, 3 a 4 bylo možné vidět naměřené hodnoty drsnosti uprostřed a na okrajích vzorků, kdy se tyto hodnoty lišily. Důvodem pro naměření rozdílných hodnot drsností byla strategie pohybu laserového svazku po vzorku. Protože byl zajištěn pohyb laserového svazku pouze ve směru osy x a ve směru osy y byl zajištěn pohyb pomocí posuvného stolu, musela být zvolena laserová strategie, umožňující souvislé zpracování povrchu. Zvolená strategie pohybu laseru byla tedy zig-zag (viz obrázek 35). Bohužel tato metoda způsobovala různou vzdálenost překrytí na krajích a uprostřed vzorků, jak je možné vidět na obrázku 35. Nicméně čím větší je laserem zpracovaná plocha, tím méně se projeví změna v překrytí zig-zag strategie.



Obr. 35 Naměřená laserovaná plocha s různou vzdáleností překrytí po celé délce povrchu

3.7.2 Nalezení vhodného parametru u vzorků tisknutých pod úhlem 45 stupňů

Na obrázku 36 je možno vidět naměřený povrch u vzorků tištěných pod úhlem 45 stupňů. Jak je patrné nejen z naměřených hodnot, ale ze stupnice s barevným spektrem, byla zde naměřena zaručeně nejvyšší hodnota drsnosti v porovnání s ostatními povrchy v této práci. To bylo způsobeno právě schodišťovým efektem, kdy tisknutí pod úhlem 45 stupňů způsobovalo převis jednotlivých vrstev.

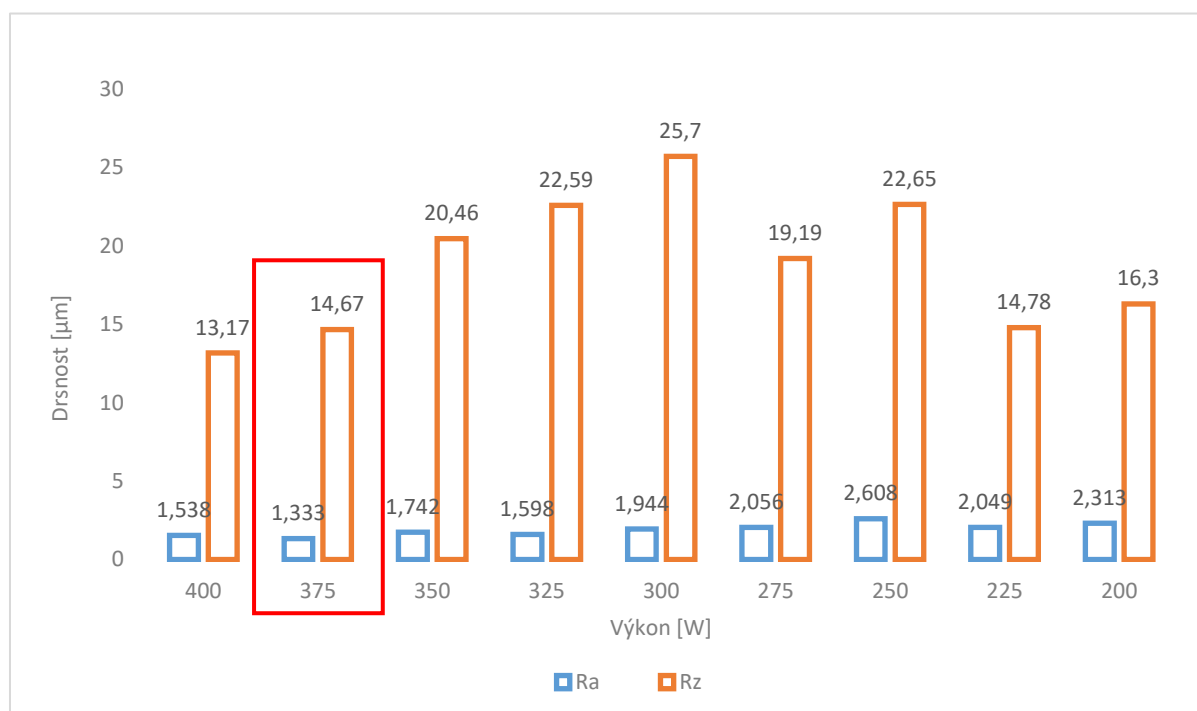


Obr. 36 Naměřený povrch pomocí IFM – G4 a vyhodnocení hodnoty drsností u vzorků tisknutých pod úhlem 45 stupňů

Stejně jako u povrchu tisknutého pod úhlem 90 stupňů i zde došlo ke sledování závislosti drsnosti povrchu vůči změně výkonu, který nám určuje množství energie dodané na povrch vzorku. Jak můžeme vidět z tabulky 5, zde se zmenšovala hodnota drsností s rostoucím výkonem, nejmenší naměřená drsnost byla dosažena při výkonu 375 W. Proto byla pro optimalizaci rychlosti pohybu laseru zvolena tato hodnota výkonu. Na povrchu tisknutém pod úhlem 45 stupňů byl výraznější projev změny drsnosti při variaci laserového výkonu. Bylo zjištěno, že s rostoucím výkonem dochází ke snižování hodnot drsností.

Tabulka 5 Tabulka závislosti drsnosti na změně výkonu

Drsnost v závislosti na změně výkonu, který ovlivňuje energie					
Konstantní parametry: frekvence=94,56 Hz, rychlost=15 mm/s, délka pulzu=10 ms, vzdálenost od fokální roviny=14mm					
Výkon [W]	Energie [J]	Měření uprostřed		Měření na okrajích	
		Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
400	4	1,538	13,17	3,009	13,71
375	3,75	1,333	14,67	2,796	13,05
350	3,5	1,742	20,46	2,963	19,3
325	3,25	1,598	22,59	2,984	27,58
300	3	1,944	25,7	1,734	25,45
275	2,75	2,056	19,19	1,497	32,56
250	2,5	2,608	22,65	1,703	20,64
225	2,25	2,049	14,78	1,424	18,37
200	2	2,313	16,3	1,115	8,747



Graf 5 Graficky znázorněná závislost drsnosti na změně výkonu

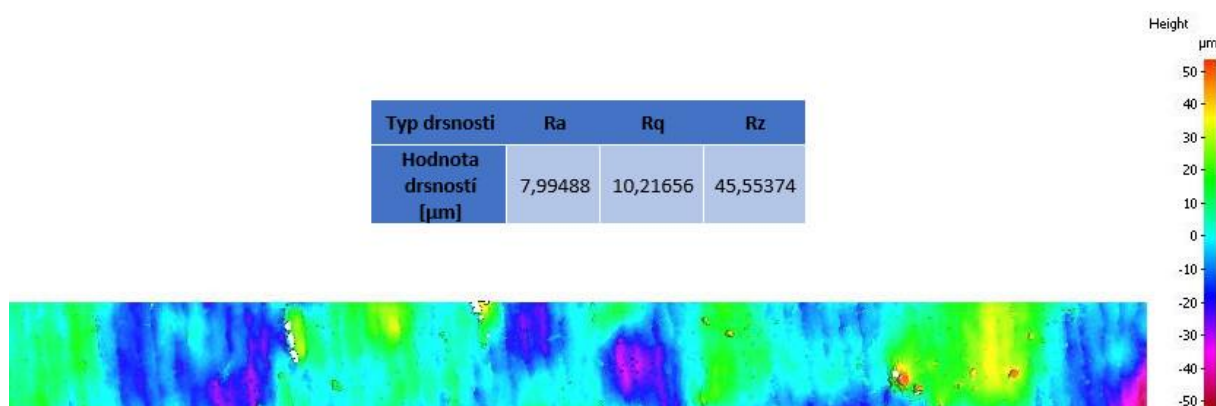
Posledním parametrem byla opět rychlost, která měla vliv na stupeň překrytí laserového spotu. Zde byla dosažena nejlepší hodnota drsnosti Ra při nastavení rychlosti 15 mm/s a stupněm překrytí 82 %. Celkově došlo k redukci povrchové drsnosti Ra o 96 % z hodnoty 35,638 μm na hodnotu 1,247 μm .

Tabulka 6 Tabulka závislosti drsnosti na změnu stupně překrytí

Závislost drsnosti na změnu rychlosti, což ovlivňuje stupeň překrytí					
Konstantní parametry: $f=94,56$ Hz, rychlost=15 mm/s, délka pulzu=10 ms, vzdálenost od fokální roviny=14mm, výkon=375W					
Rychlost [mm/s]	Stupeň překrytí [%]	Měření uprostřed		Měření po okrajích	
		Ra [μ m]	Rz [μ m]	Ra [μ m]	Rz [μ m]
5	94	1,376	27,85	1,13	39,99
10	88	1,474	15,47	1,578	13,37
15	82	1,247	40,07	1,315	10,15
20	76	1,365	20,33	1,762	16,88
25	70	1,614	17,44	1,578	17,32

3.7.3 Nalezení vhodného parametru u vzorků s povrchem rovnoběžným s platformou

Posledním zkoumaným povrchem byl povrch tisknutý rovnoběžně s platformou. Tento povrch je zajímavý v tom ohledu, že u něj nedochází ke vzniku schodišťového efektu ani ke spékání jednotlivých vrstev při 3D tisku. Některé odborné články tvrdí, že na tomto povrchu lze naměřit nejlepší drsnost Ra, jelikož zde nedochází právě k projevu schodišťového efektu ani napojení jednotlivých vrstev. Jak ale můžeme vidět na obrázku 37, byla naměřena hodnota Ra 7,995 μ m, která je o 2 μ m vyšší než u povrchu tisknutého ve směru osy z. Nelze tedy říci, že povrch rovnoběžný s platformou by dosahoval nejlepších hodnot Ra, jelikož na velikosti drsnosti jednotlivých povrchů mají vliv i ostatní parametry při tisku, nejen schodišťový efekt. Další zajímavý objev lze pozorovat na obrázku 37. Na povrchu tisknutém rovnoběžně s platformou bylo možné sledovat mnohem větší makro nerovnosti povrchu. To pro laser představuje výrazný problém, jelikož maximální oblast, kterou je možné přetavit, je limitována velikostí laserového spotu.

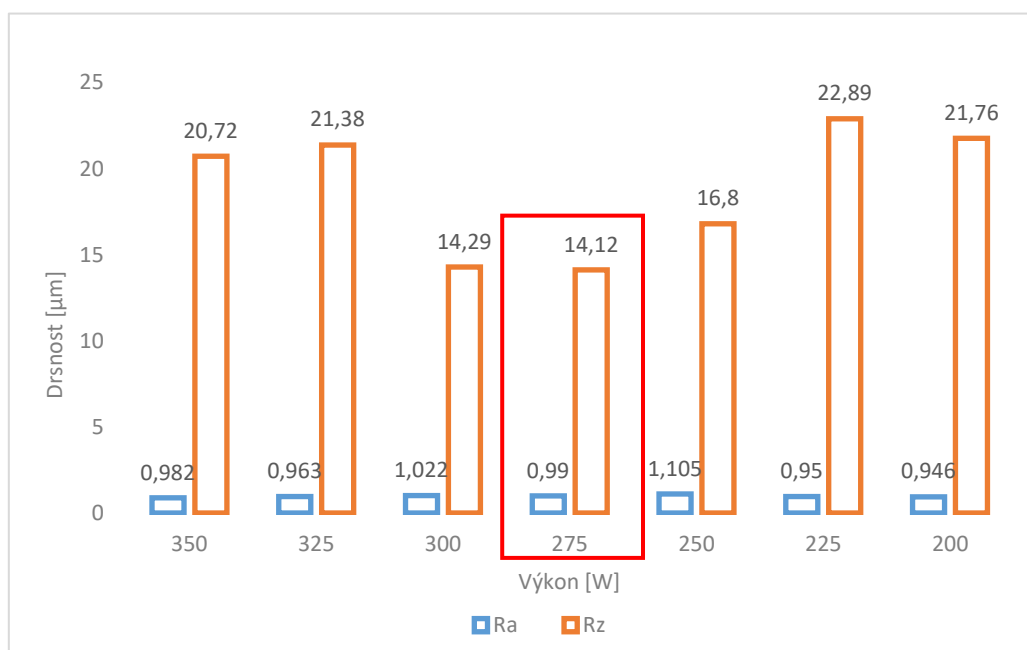


Obr. 37 Naměřený povrch pomocí IFM – G4 a vyhodnocení hodnoty drsností u ploch tisknutých rovnoměrně s platformou

Dalším parametrem, kde se zkoumal jeho vliv na výslednou drsnost povrchu, byl výkon, jež výrazně ovlivňuje množství energie dodané do materiálu. Zde bylo opět možné, podobně jako u povrchu v kapitole 3.7.1, pozorovat, že nedocházelo k výrazným změnám u drsnosti povrchu v závislosti na změně výkonu.

Tabulka 7 Tabulka závislosti drsnosti na změnu výkonu

Drsnost v závislosti na změně výkonu, který ovlivňuje množství energie dodané do materiálu			
Konstantní parametry: frekvence=94.56 Hz, rychlost=10 mm/s, délka pulzu=10 ms, vzdálenost od fokální roviny=14mm			
Výkon [W]	Energie [J]	Měření uprostřed	
		Ra [μm]	Rz [μm]
350	3,5	0,982	20,72
325	3,25	0,963	21,38
300	3	1,022	14,29
275	2,75	0,99	14,12
250	2,5	1,105	16,8
225	2,25	0,95	22,89
200	2	0,946	21,76



Graf 6 Graficky znázorněná závislost drsnosti na změně výkonu

Posledním parametrem byla opět rychlost, která měla vliv na stupeň překrytí laserového spotu. Nejlepší naměřená drsnost Ra byla naměřena při použití rychlosti 20 mm/s. Zde došlo k redukci povrchové drsnosti Ra o 90,5 % z hodnoty 7,995 μm na 0,759 μm .

Tabulka 8 Tabulka závislosti drsnosti na změně stupně překrytí

Závislost drsnosti na změnu rychlosti, což ovlivňuje stupeň překrytí			
Konstantní parametry: vzdálenost od fokální roviny =14 mm, výkon=275, frekvence=94,56, délka pulzu=10 ms, rychlost=20 mm/s			
Rychlost [mm/s]	Stupeň překrytí [%]	Měření uprostřed	
		Ra [μm]	Rz [μm]
5	94	0,993	5,317
10	88	0,978	10,78
15	82	0,78	11,73
20	76	0,759	10,14
25	70	0,85	8,467

3.8 Aplikace laserových parametrů na vzorky určené pro materiálové zkoušky, provedení materiálových zkoušek a následné vyhodnocení

3.8.1 Únavová zkouška

Nejdříve došlo k aplikaci optimalizovaných parametrů na nepovedené vzorky pro cyklické zatěžování určené jako zkušební vzorky, protože zde byl předpoklad, že by při aplikaci laserového leštění na tak velkou souvislou plochu s malým průřezem mohlo dojít k deformaci vzorků. Při první aplikaci optimalizovaných parametrů došlo vlivem nárůstu teploty k přehřátí vzorků uprostřed zkušební tyče, kdy vlivem nárůstu teploty vzorek zčervenál a následně došlo k jeho ohnutí, což lze vidět na obrázku 38. Na levé straně obrázku 38 je mezi vzorky patrná vzniklá mezera, zatímco na straně pravé k sobě vzorky doléhají.



Obr. 38 Grafické znázornění ohnutí vzorků po aplikaci zvolených parametrů

Protože tedy nemohlo dojít k aplikaci optimalizovaných parametrů, musel být nalezen nový způsob, jak tyto parametry aplikovat. Jako první řešení se nabízelo zachování intenzity laseru, zatímco by se snižoval jeho výkon v závislosti na změně průměru spotu a tím pádem by se změnila i energie dodaná na povrch vzorku. To znamená, že se nejdříve dopočetla hodnota intenzity laseru dle rovnice (2.6) a poté byl dopočten výkon dle rovnice:

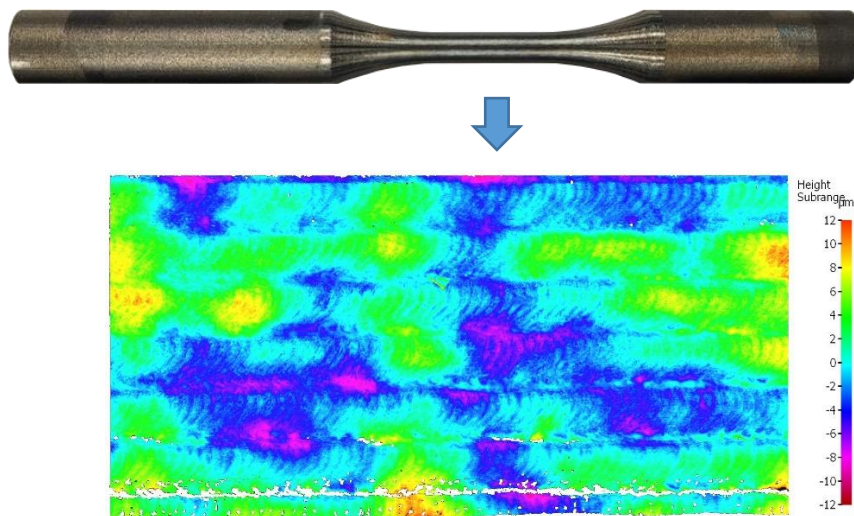
$$P = S * I = [W] \quad (3.3)$$

kde P je výkon, S vyjadřuje průměr spotu a I vyjadřuje intenzitu. Toto řešení se ukázalo jako efektivní, co se týče zastavení přehřívání součásti. Bohužel, aby však došlo k výraznému snížení přehřívání, muselo dojít k výraznému snížení výkonu a tím pádem i snížení energie a laserový svazek nedokázal dostatečně natavit povrch materiálu. Proto se od tohoto řešení upustilo. Následně bylo přistoupeno k dalšímu řešení, došlo ke snížení výkonu na 110 W zatím co ostatní parametry byly zachovány. Vzorky byly leštěny po 90 stupních s následnou dobou chladnutí po dobu 5 minut v ochranné atmosféře argonu. Tímto se sice nezabránilo kompletnímu přehřívání vzorků, nicméně velikost přehřívání se zastavila natolik, že již nedocházelo k jejich deformaci. Toto řešení nicméně prodloužilo popis vzorku o 15 minut.

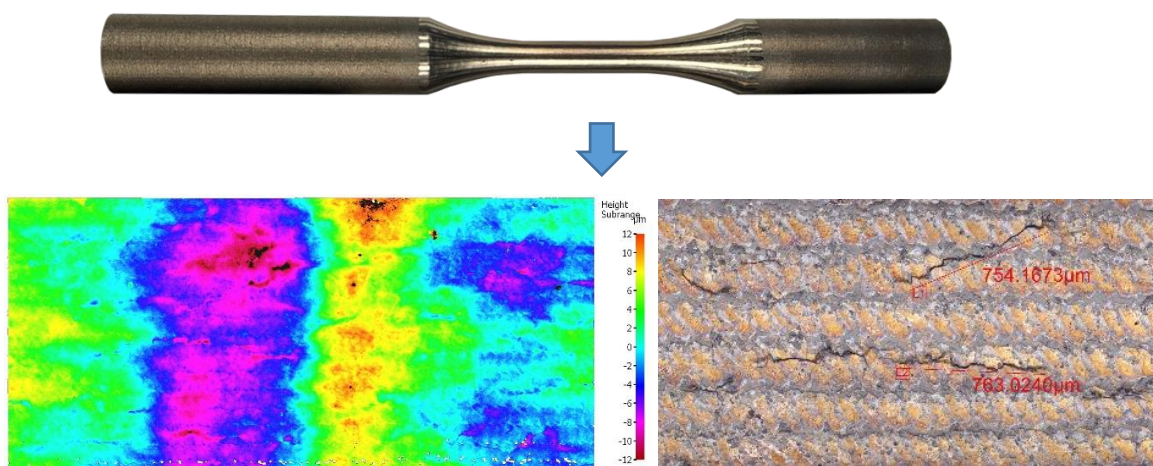
Jelikož největší problém způsobovalo přehřívání vzorků, aplikovaly se další sety parametrů. Došlo ke snížení délky pulzů, který má na přehřívání vzorků významný vliv. Nejenže snížení délky pulzů způsobí snížení doby tepelné difuze, ale umožní i navýšení frekvence a tím zvýšení rychlosti pohybu laserového svazku po vzorcích. Na vzorky určené pro cyklické zatěžování tedy byly aplikovány parametry označené v tabulce 5. V této práci budou tyto parametry označovány jako parametry č. 1, č. 2 a č. 3. Na obrázcích 39, 40 a 41 je lze vidět aplikované na vzorcích.

Tabulka 9 Parametry aplikované na vzorky pro cyklické namáhání

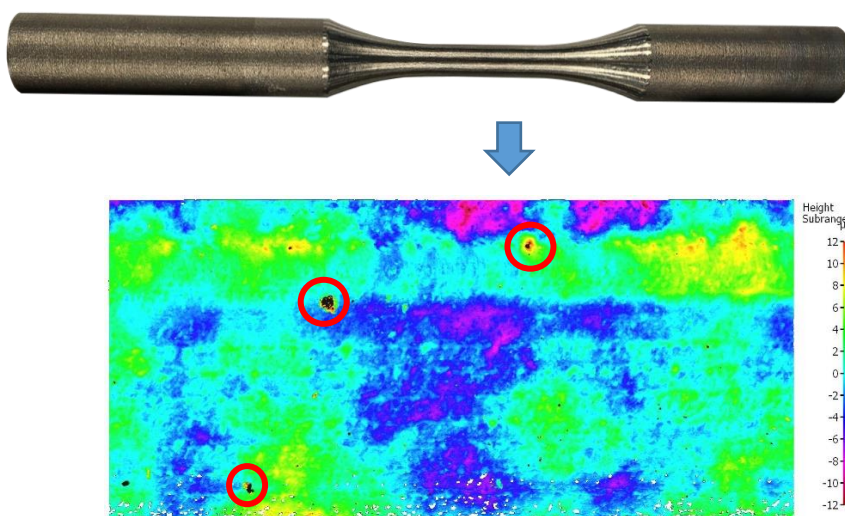
Číslo parametru	Výkon [W]	Rychlost [mm/s]	Frekvence [Hz]	Délka pulzu [ms]	Vzdálenost od fokální roviny [mm]
1.	110	10	93	10	16
2.	300	10	93	5	16
3.	350	50	500	1,3	13



Obr. 39 Leštěný vzorek pomocí parametrů č. 1



Obr. 40 Leštěný vzorek pomocí parametrů č. 2



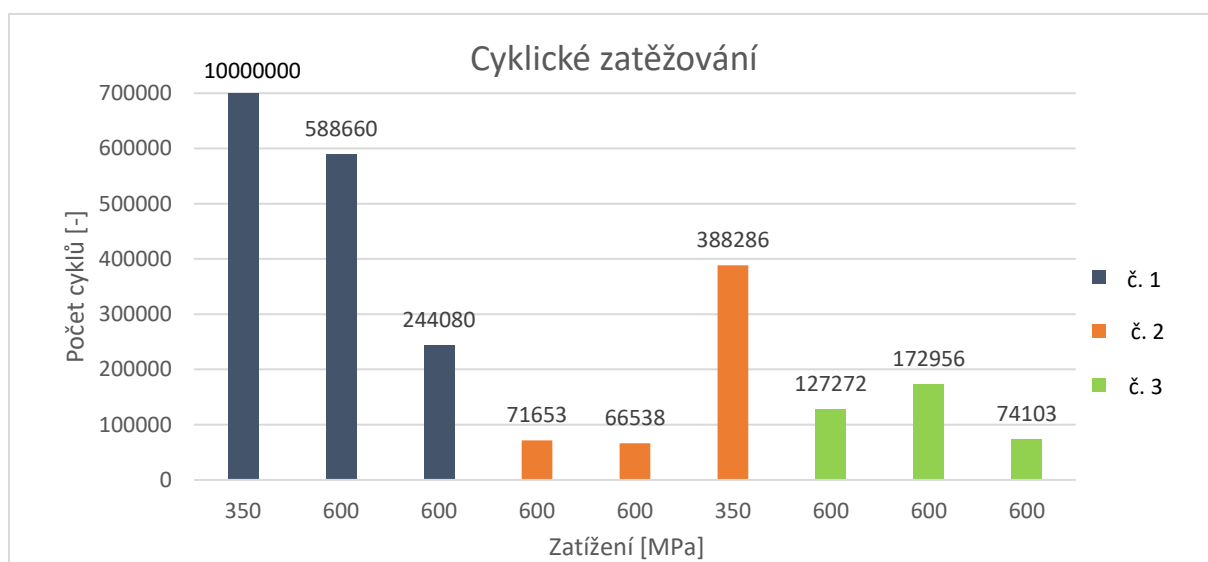
Obr. 41 Leštěný vzorek pomocí parametrů č. 3

Na obrázcích 39, 40 a 41 můžeme vidět aplikované parametry laseru na vzorky pro tahovou zkoušku. Na vzorcích byla následně provedena analýza pomocí mikroskopu IFM – G4, aby došlo ke zjištění, jakým způsobem ovlivnila změna procesních parametrů navržených v tabulce 5 leštěný povrch. Obrázek 39 znázorňuje povrch, který byl transformován pomocí optimalizovaného parametru č. 1. Na obrázku 40 je možné vidět povrch po aplikaci parametru č. 2. Po bližším prozkoumání povrchu bylo zjištěno, že parametr č. 2 způsoboval na povrchu praskliny. Velikost těchto prasklin dosahovala až do délky 1 mm. Pro podrobnější analýzu vzorků byl proveden materiálový výbrus. Na obrázku 41 lze pozorovat, že parametr č. 3 sice nezpůsobil popraskání povrchu, ale na povrchu bylo možné vidět nežádoucí pozůstatky po 3D tisku. Tyto nežádoucí pozůstatky byly označeny červeným kruhem na obrázku 41.

Po aplikování laserových parametrů následovalo samotné testování vzorků. Pro jeho provedení bylo třeba určit velikost napětí, při kterém budou zkoušky prováděny. Po konzultaci s materiálovou zkušebnou byla určena velikost zatížení 350 MPa. Při provedení testování u prvního vzorku ze skupiny parametru č. 1 bylo dosaženo 10 000 000 počtu cyklů. Pokud je dosaženo hodnoty 10 000 000 cyklů, tak je testování ukončeno, jelikož se předpokládá, že se pohybujeme pod smluvní mezí únavy. Proto došlo k navýšení napětí zatěžování na 600 MPa, kdy došlo k prasknutí vzorků pod hodnotou 10 000 000 cyklů. Výsledky z únavových zkoušek můžeme vidět v tabulce 6, která jasně ukazuje, že nejlépe vyšly vzorky, na nichž byl aplikován parametr č. 1. Nejhůře vyšly vzorky, na které byl aplikován parametr č. 2. Nicméně tento výsledek byl očekáván, neboť na obrázku 40 můžeme vidět popraskaný povrch. U parametru č. 1 je patrné, že počet dosažených cyklů u pořadového čísla zkoušení 2 a 3 se liší o 60 % při stejném napětí. Takto výrazný pokles počtu cyklů do přetrhnutí může indikovat chybu, která byla zanesena do vzorků buď to 3D tiskem, nebo samotným laserovým leštěním. To samé se zopakovalo u parametru č. 3, kdy rozdíl mezi maximálním a minimálním počtem cyklů je 40 %. U vzorků, u nichž byl aplikován parametr č. 2, se lišily hodnoty v počtu cyklů u pořadového čísla 4 a 5 o 7 %. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3. 3, jedná se o malý počet vzorků a šlo především o rozhodovací proces, zda má smysl tyto parametry dále rozvíjet.

Tabulka 10 Tabulka s výsledky z únavových zkoušek

Číslo parametru	Pořadové číslo zkoušení	Napětí [MPa]	Počet cyklů [-]
1	1	350	10000000
	2	600	588660
	3	600	244080
2	4	600	66538
	5	600	71653
	6	350	388286
3	7	600	127272
	8	600	172956
	9	600	74103



Graf 7 Grafické znázornění výsledků z únavové zkoušky

3.8.2 Zkouška tahem

Na vzorky určené pro zkoušku tahem byly aplikovány parametry z tabulky 5. Jako problémový se z důvodu přehřívání opět ukázal parametr č. 1. Přestože se u vzorků pro únavové zkoušky jako dostačující ukázala úprava výkonu, zde nastal problém související s délkou času leštění. Jelikož se jednalo o větší vzorky, došlo k prodloužení času leštění a tím pádem i času prostupu tepla do rotační jednotky, v níž byly vzorky upnuty. Přestože se podařilo vyleštit tři potřebné vzorky, tak muselo by při aplikaci parametru č. 1 na větší počet vzorků dojít k další úpravě parametrů. To byl další důvod, proč musely být navrženy další sety parametrů č. 2 a č. 3. Vyleštěné vzorky je možné vidět na obrázcích 42, 43 a 44.



Obr. 42 Popsané vzorky pro zkoušku tahem parametrem č. 1

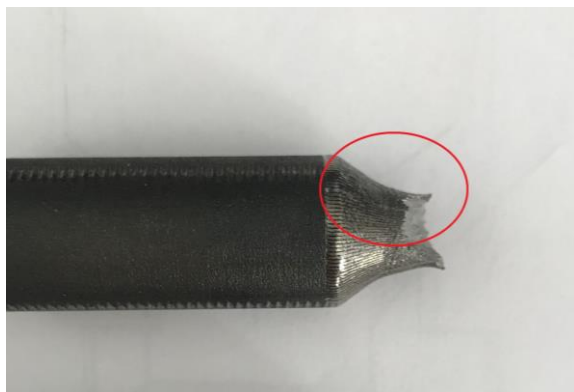


Obr. 43 Popsané vzorky pro zkoušku tahem parametrem č. 2



Obr. 44 Popsané vzorky pro zkoušku tahem parametrem č. 3

Další problém vznikl ještě při samotném tisku vzorků pro tahovou zkoušku. Při tisku vzorků pod úhlem 90 stupňů není možné vytisknout navržený rádius o poloměru 4, 2 mm (viz kapitola 3.3). Jak roste průřez rádiem v ose z, dochází ke stále většímu převisu, jenž by s největší pravděpodobností způsobil selhání 3D tisku. Proto byly vytisknuty vzorky bez rádia, kdy došlo k rovnému napojení. Toto rovné napojení způsobilo na vzorcích vznik vrubu, který sloužil jako koncentrátor napětí. Po aplikaci laserového leštění došlo k mírnému zaoblení vrubu. Předpokládalo se, že toto mírné zaoblení nezpůsobí koncentraci napětí ve vrubu a testovaný vzorek praskne uprostřed. Pro jistotu byl přetrhnut jeden vzorek bez rádiusu. Nicméně na obrázku 45 je možné vidět, že mírné zaoblení vrubu nestačilo a v místě vrubu došlo ke koncentraci napětí a následnému prasknutí tyče. Proto se přešlo ke soustružení rádiusu a jeho napojení na laserovanou plochu (viz obrázek 46).



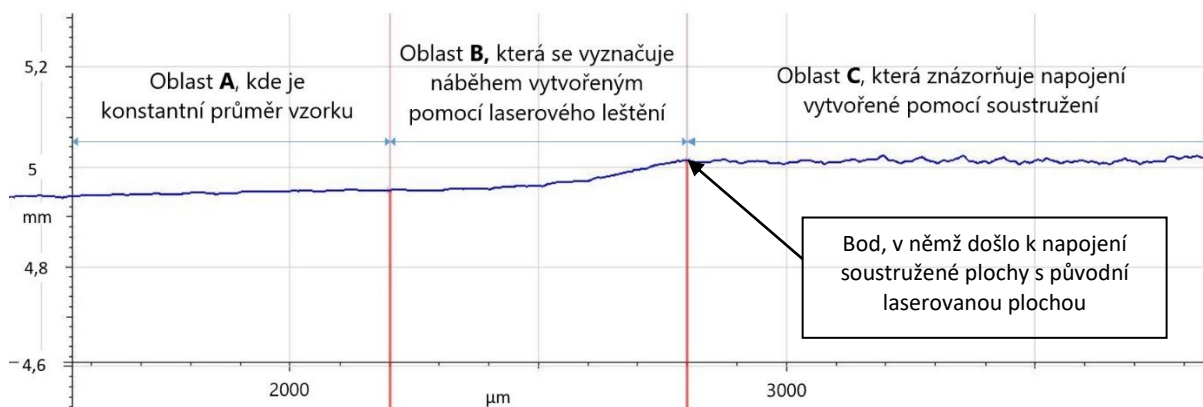
Obr. 45 Zkušební tyč prasklá v oblasti vrubu



Obr. 46 Napojení rádiusu na laserovanou plochu

Pro kontrolu byl proveden rádius pouze na jednom vzorku. Bylo naskenováno napojení rádiusu na leštěnou plochu a zkoumalo se, zda se při napojení objeví vrub, který by mohl sloužit jako nový koncentrátor napětí. Jak je možno vidět v grafu 7, oblast napojení byla rozdělena do tří částí. Oblast A vyjadřuje povrch leštěný laserem, kde měl vzorek konstantní průřez. Oblast B vyjadřuje stále leštěný povrch, nicméně zde se objevuje náběh vzniklý po laserovém leštění zkosené části vzorku. A nakonec oblast C označuje napojení na laserem zpracovanou plochu pomocí soustružení. Pro nás je nejdůležitější bod napojení mezi soustruženou a laserem

zpracovanou plochou, jelikož zde byla největší pravděpodobnost vzniku vrubu. Na grafu 7 je vyznačený bod, v němž došlo k napojení leštěné a soustružené plochy. Jak je možné pozorovat, v místě spojení nedošlo k vytvoření výrazného vrubu, jenž by mohl ovlivnit samotný průběh zkoušky. Dále bylo za potřebí zajistit, aby nedošlo k podříznutí, které by způsobilo zmenšení průměru zkušební tyče. Z grafu 7 je možno vypožorovat, že ani k jednomu z jmenovaných problémů nedošlo.



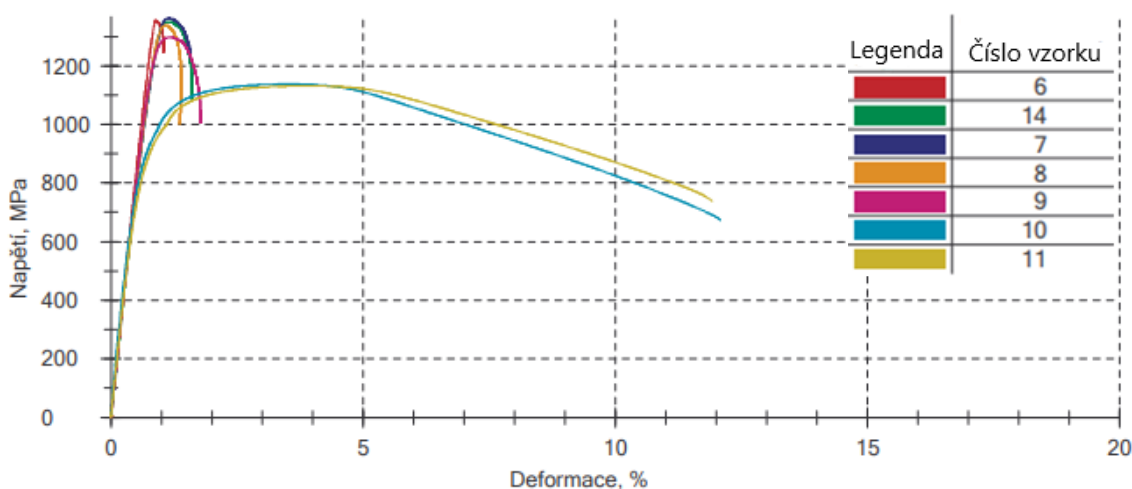
Graf 8 Provedení řez vzorku pro tahovou zkoušku s křivkou znázorňující tvar povrchu

Jakmile bylo ověřeno, že nedošlo k podříznutí a k vytvoření vrubu na povrchu zkušební tyče, bylo aplikováno soustružení rádiů na zbytek vzorků. V tabulce 8 můžeme vidět výsledky tahové zkoušky a v grafu 8 můžeme vidět její graficky znázorněný průběh. Nejdříve bylo potřeba definovat výrobcem předepsané pevnosti a tažnosti pro žíhaný materiál MS1, kdy výrobce předepisuje tyto hodnoty: $R_{p0,2}$: 870 ± 100 [MPa], R_m : 1100 ± 100 [MPa] a A : 12 ± 4 [%]. Při pohledu na vzorky číslo 10 a 11 je zřejmé, že hodnoty pevnosti i tažnosti se pohybovaly v rozmezí předepsaném výrobcem. Není zde tedy patrné, že by parametr č. 3 nějakým způsobem ovlivnil mechanické vlastnosti vzorků v tahu. Pokud se ale podíváme na vzorky 6, 7, 8, 9 a 14, můžeme vidět, že hodnoty vyšly mimo toleranci danou výrobcem. U těchto vzorků bylo možné pozorovat, že smluvní mez kluzu odpovídá s určitou přesností mezi pevnosti. To indikuje, že se jednalo o velmi křehký materiál. Vysvětlení, proč k tomu došlo, můžeme vidět v následujících kapitolách. V tabulce 8 dále můžeme vidět hodnoty tažnosti, které jsou označeny červeně. Tyto hodnoty byly takto označeny, protože došlo k prasknutí zkušební tyče mimo senzory pro měření tažnosti. Proto je nelze považovat za přesné hodnoty, lze je ale vnímat jako indikátory toho, že vzorky mají velmi nízkou tažnost. To opět napovídá tomu, že se jednalo o velmi křehký materiál.

Tabulka 11 Výsledné hodnoty po zkoušce tahem

Číslo parametru	Číslo vzorku	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A [%]
2	6	1340	1354	0,3
	14	1341	1350	0,9
1	7	1297	1362	0,9
	8	1337	1338	0,7
	9	1277	1297	1,2
3	10	889	1137	11,8
	11	884	1131	11,5

Grafické záznamy série:



Graf 9 Grafické znázornění průběhu tahové zkoušky

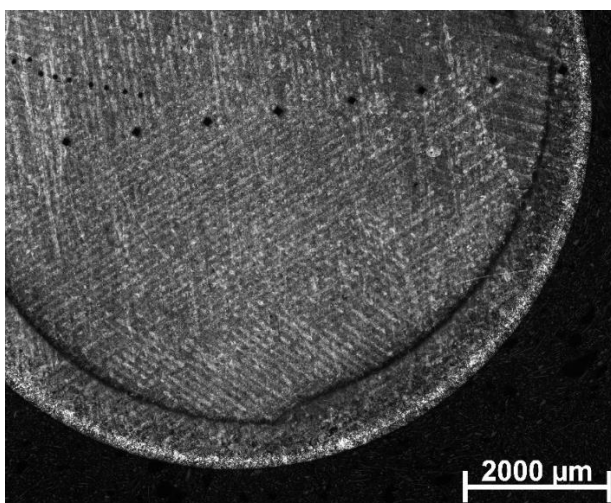
3.8.3 Metalografický výbrus a zkouška tvrdosti

Na všech vzorcích byl proveden materiálový výbrus, jelikož se předpokládalo, že na laserem leštěných vzorcích docházelo k výrazným změnám v materiálu. Navíc bylo potřeba identifikovat nejen změny uvnitř materiálu, jako je například změna struktury, ale i vzniklé nedostatky. Nejdříve byla provedena analýza parametru č. 1. Na obrázku 47 je možné vidět metalografický výbrus na celém průřezu vzorku, na němž je možné vyzorovat jednotlivé šrafy. Jedná se o housenky, které byly způsobeny 3D tiskem a tedy nevznikly po laserovém leštění. Tamtéž je dále možné vidět oblast protavení a tepelně ovlivněnou oblast (HAZ). Na

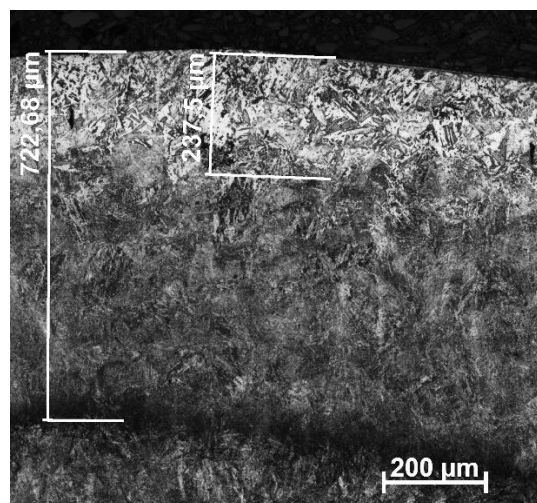
obrázku 48 je možné vidět zvětšenou oblast protavení a tepelně ovlivněné oblasti, kdy hloubka protavení byla 237,5 μm a hloubka tepelně ovlivněné oblasti se pohybovala okolo 722,68 μm .

Na obrázku 49 je vidět mikrostruktura po aplikaci parametru č. 2, v níž lze identifikovat jednak hloubku protavení činící 190,43 μm a jednak tepelně ovlivněnou oblast hlubokou 801,61 μm . Jak je možné pozorovat na materiálovém výbrusu, došlo zde k menší hloubce protavení, jelikož délka pulzu byla snížena na 5 ms. Tepelně ovlivněná oblast sice byla oproti parametru č. 1 větší, ale zde záleželo na místě měření. S postupným leštěním docházelo k akumulaci tepla v materiálu, což zapříčinilo nárůst velikosti tepelně ovlivněné oblasti. Na obrázcích 49 a 50 dále bylo možné pozorovat praskliny v oblasti přetavené vrstvy. Tyto praskliny se objevily i na povrchu po skenování pomocí mikroskopu IFM – G4 v kapitole 3. 8. 1. Díky metalografickému výbrusu bylo zjištěno, že se nejedná pouze o praskliny vyskytující se na povrchu, ale procházející do značné hloubky. Tento nedostatek se promítl do výsledků únavových zkoušek. Na obrázku 50 je navíc možné pozorovat, že se v přetavené oblasti vyskytovaly i podpovrchové praskliny, které nelze vidět pomocí mikroskopu.

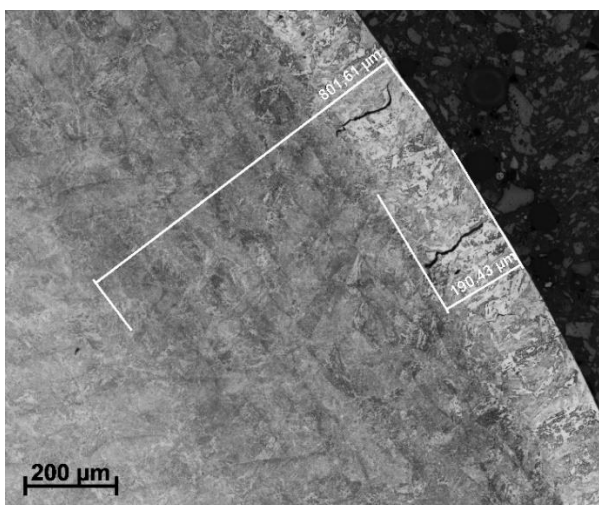
Na obrázku 51 a 52 je možné vidět metalografický výbrus u vzorků, na něž byl aplikován parametr č. 3. Při tomto parametru nedocházelo ke vzniku tepelně ovlivněné oblasti. To bylo způsobeno zvolením krátké délky pulzu o hodnotě 1, 5 ms a vyšší frekvencí, což umožnilo nastavení vyšší rychlosti pohybu laseru. Dále bylo možné vypořadovat, že hloubka přetavení se pohybovala okolo 100 μm . Došlo tedy k redukci hloubky protavení vzorku oproti ostatním parametrům.



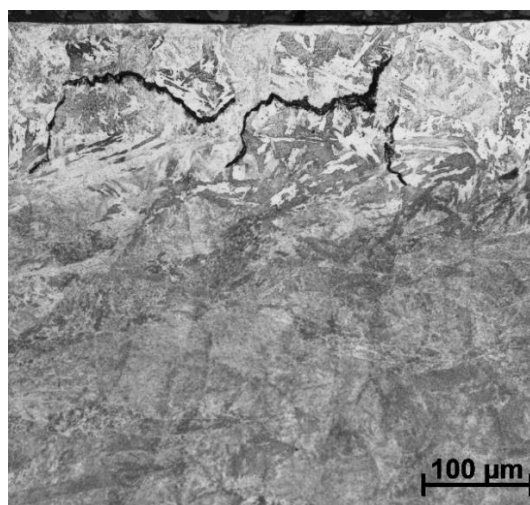
Obr. 47 Materiálový výbrus celé zkušební části po aplikaci parametru č. 1



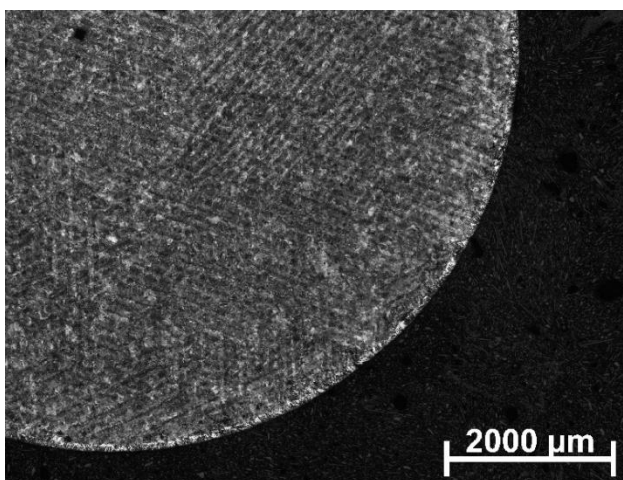
Obr. 48 Ovlivněná oblast po laserovém leštění parametrem č. 1



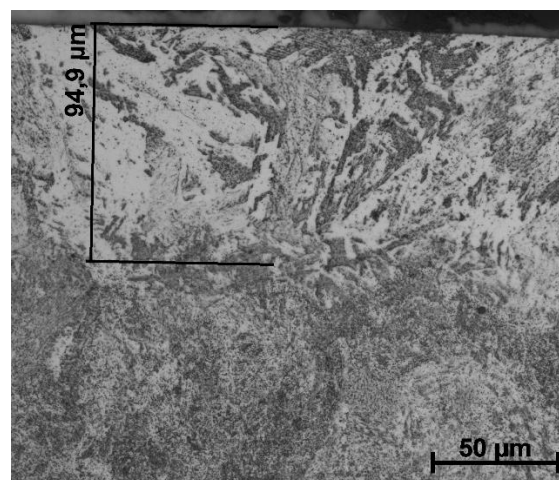
Obr. 49 Materiálový výbrus celé zkušební části po aplikaci parametru č. 2



Obr. 50 Ovlivněná oblast po laserovém leštění parametrem č. 2



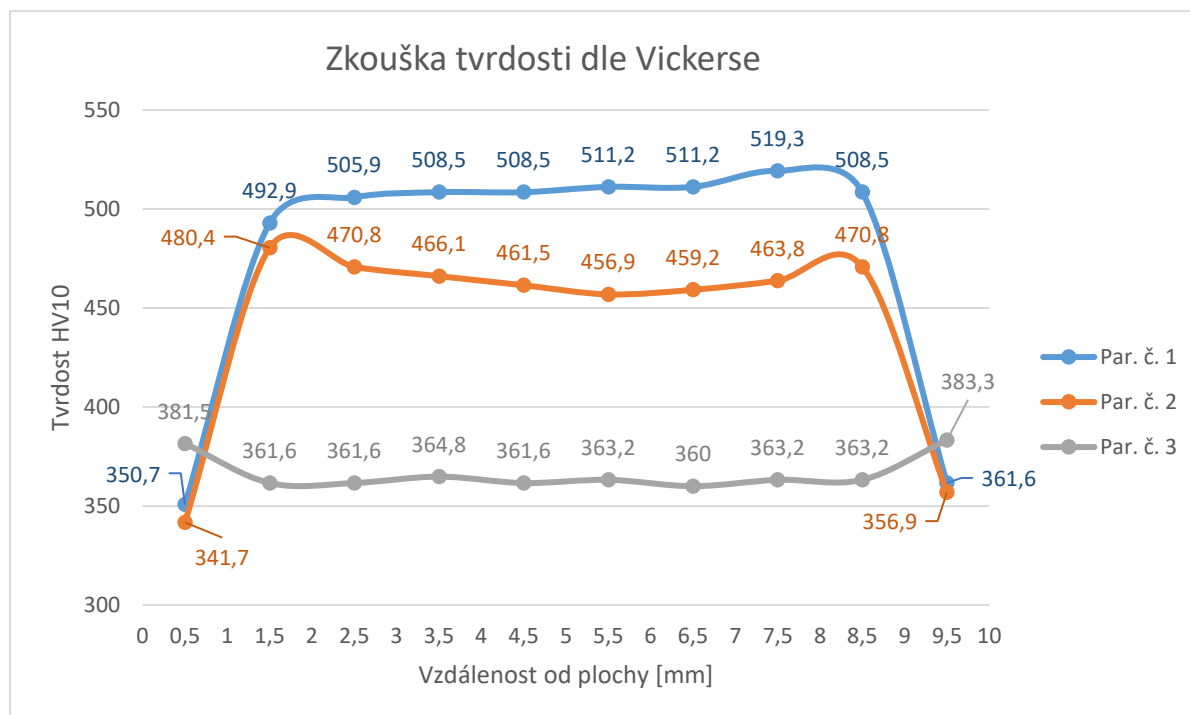
Obr. 51 Materiálový výbrus celé zkušební části po aplikaci parametru č. 3



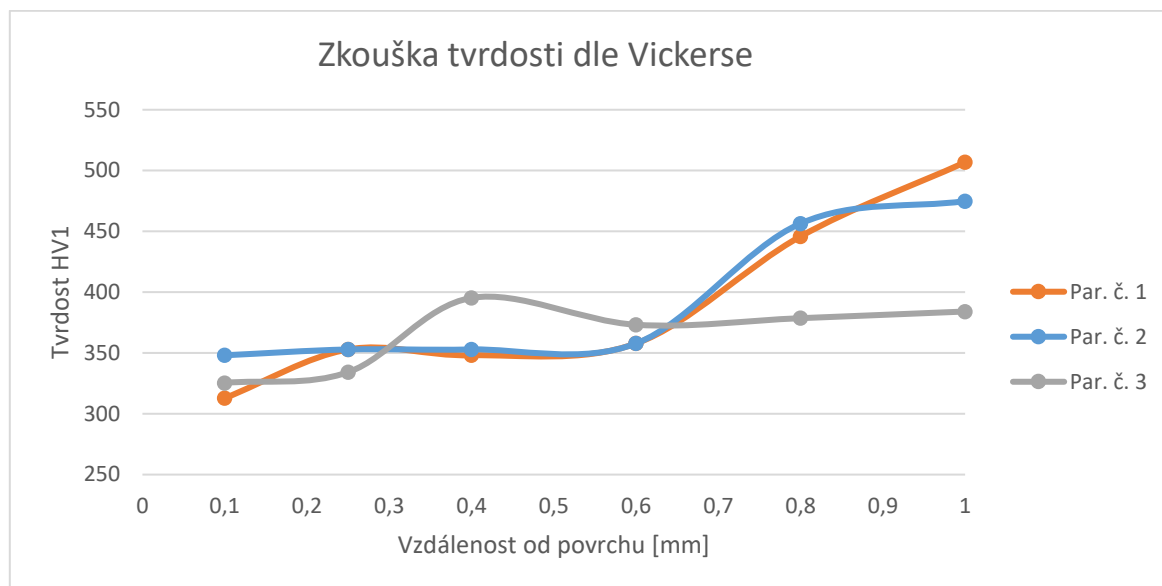
Obr. 52 Ovlivněná oblast po laserovém leštění po aplikaci parametru č. 3

Napříč vzorkem s materiálovým výbrusem byla dále provedena zkouška tvrdosti. Nejdříve byl proveden test dle Vickerse se zatížením 10 kp (98, 1 N). Následně bylo testováno dle Vickerse se zatížením 1kp (9, 81 N). Nejdříve byl zvolen test dle Vickerse pod zatížením 10 kp, byly provedeny vpichy napříč kruhovým průřezem vzorku po kroku 1 mm. Jak je možné vidět na grafu 9, tak u parametru č. 1 a č. 2 došlo ke skokové změně tvrdosti. Největší hodnoty tvrdosti byly dosahovány za tepelně ovlivněnou oblastí uprostřed vzorku a naopak nejmenší tvrdosti byly dosahovány na povrchu. Nicméně u parametru č. 3 docházelo k úplnému opaku, největší tvrdost byla na povrchu součásti a nejmenší uprostřed vzorku. Důvodem, proč došlo ke vzniku tvrdého jádra u parametru č. 1 a č. 2 bylo zvolení takových procesních parametrů, při nichž docházelo k přehřívání vzorků, a jelikož se jednalo o velkou souvislou plochu, byl vzorek

vyhřán na vysokou teplotu po dlouhou dobu. Jak již bylo zmíněno, vzorky byly leštěny z materiálu MS1. Jedná se tedy o maraging ocel a jak již název napovídá, šlo o martenzitickou ocel, u níž dochází k vytvrzení pomocí stárnutí, jehož nedílnou součástí je precipitace. Následkem přehřívání vzorku při aplikaci laserového leštění po dlouhou dobu a následného chladnutí na vzduchu došlo k precipitačnímu vytvrzení a nárůstu tvrdosti ve středu vzorku. To samozřejmě bylo vidět i na materiálovém výbrusu, u okrajích se objevovaly precipitáty ve formě jemné krupičky a na středu již jejich hrubší podoba. To vysvětluje, proč se při zkoušce tahem chovaly vzorky s parametrem č. 1 a č. 2 tak křehce, došlo totiž k vytvrzení a vysokému nárůstu tvrdosti. Vzorky leštěné pomocí parametru č. 3 vykazovaly o něco větší tvrdost v přetavené vrstvě a tepelně ovlivněné oblasti, a naopak menší tvrdost uprostřed vzorku. Jak je možné pozorovat na grafu 10, mezi vzdáleností od povrchu 0,5 mm a 1,5 mm došlo k velkému skoku v tvrdosti. Proto následovalo provedení zkoušky tvrdosti dle HV1, kdy bylo použito menší zatížení 1 kp. Toto menší zatížení způsobí i menší vpich do materiálu, a zjistí průběh tvrdosti napříč přetavenou vrstvou a tepelně ovlivněnou oblastí. Při této zkoušce tvrdosti byly provedeny vpichy po kroku 0,2 mm. Jak je možno vidět na grafu 9, tvrdost zůstávala téměř konstantní do hodnoty 600 μm u parametrů č. 1 a č. 2. Lze tedy říci, že tvrdost se v oblasti přetavené vrstvy a tepelně ovlivněné oblasti výrazně nezměnila a ke skoku v hodnotách tvrdosti došlo na rozmezí mezi tepelně ovlivněnou oblastí a středovou částí vzorku. Vzorek č. 1 vykazuje nejmenší tvrdost, jelikož zde docházelo k nejmenšímu přehřívání, kdy nelze vidět vznik tepelně ovlivněné oblasti po laserovém leštění.



Graf 10 Průběh tvrdosti HV10 napříč vzorkem



Graf 11 Průběh tvrdosti HV1 napříč vzorkem

3.8.4 Měření zbytkového napětí na povrchu vzorků metodou XRD

Během laserového leštění docházelo k přetavení materiálu při vysokých teplotách a jeho následnému zchladnutí. Je všeobecně známo, že při chladnutí dochází ke smršťování materiálu vytvářejícímu tlakové zbytkové napětí a že přehřívání materiálu naopak vyústí k jeho roztahování a ke vzniku tahového zbytkového napětí. Na velikost zbytkového napětí má samozřejmě velký vliv i rychlost chladnutí, to znamená, že čím větší jsou teplotní gradienty, tím vyšší je i rychlost chladnutí. Tato napětí mohou mít podobu dvou typů zbytkového napětí, tedy tlakového a tahového. Tlakové zbytkové napětí je označováno jako záporná hodnota a je všeobecně žádoucí, jelikož při zatížení působí proti šíření trhlin.

Pro změření zbytkového napětí byla použita metoda rentgenové difrakce. Hlavním důvodem pro výběr této metody bylo, že se jednalo o jedinou možnou metodu pro měření zbytkového napětí dostupnou na pracovišti LAZ v Německu, kde došlo k provedení experimentů. Dalším důvodem, proč byla zvolena metoda rentgenové difrakce, byla přeprava vzorků, která by zkreslila výsledky měření. V tabulce 9 je možné vidět výsledky zbytkového napětí u jednotlivých parametrů. Můžeme vidět, že došlo k naměření zbytkového napětí ve dvou směrech, kdy hodnota 0° vyjadřuje směr posuvu laserového svazku po vzorku a hodnota 90° vyjadřuje směr kolmý na posuv laserového svazku. Jak lze vidět v tabulce, parametr č. 1 vykazuje zbytkové napětí v kladných hodnotách, docházelo tedy k působení tahového zbytkového napětí, které není žádoucí. Naopak u vzorků č. 2 a č. 3 byly naměřeny záporné hodnoty zbytkového napětí, tedy bylo dosaženo žádoucího zbytkového napětí v tlaku. I když tyto hodnoty zbytkového napětí vyšly záporně, nelze říct, že by měly výrazný vliv na mechanické vlastnosti zkušebního materiálu. Jelikož se jednalo o napětí měřené na povrchu, do výsledného chování vzorků se, co se mechanických vlastností týče, odrazí i objem materiálu

pod měřenou povrchovou vrstvou. Navíc tyto hodnoty nedosahovaly takových hodnot, aby došlo k výraznému ovlivnění mechanických vlastností vzorků.

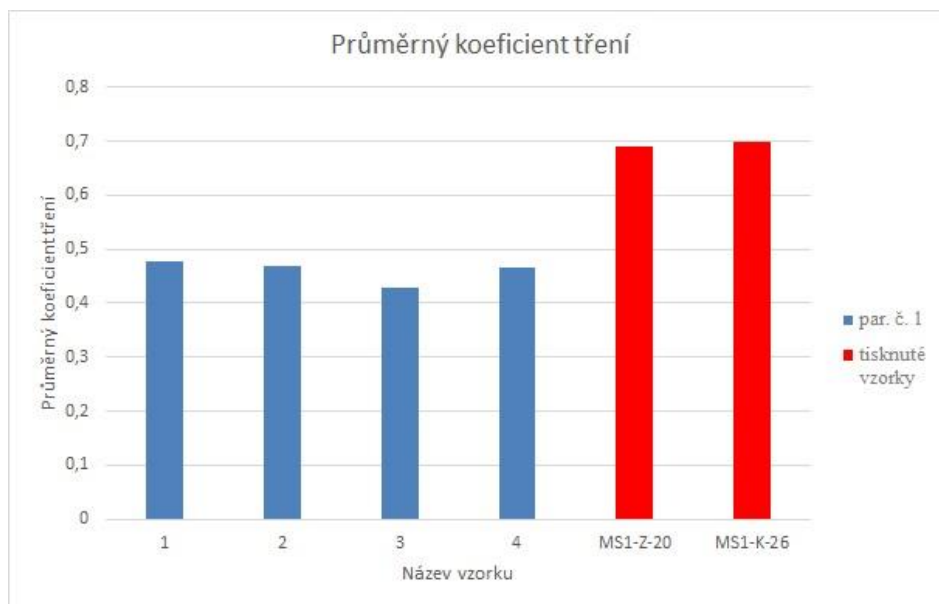
Tabulka 12 Zbytkové napětí na povrchu

Číslo parametru	0°		90°	
	σ [MPa]	τ [MPa]	σ [MPa]	τ [MPa]
1	62	-31	291	14
2	-233	-12	-333	-35
3	-512	-4	-533	-6

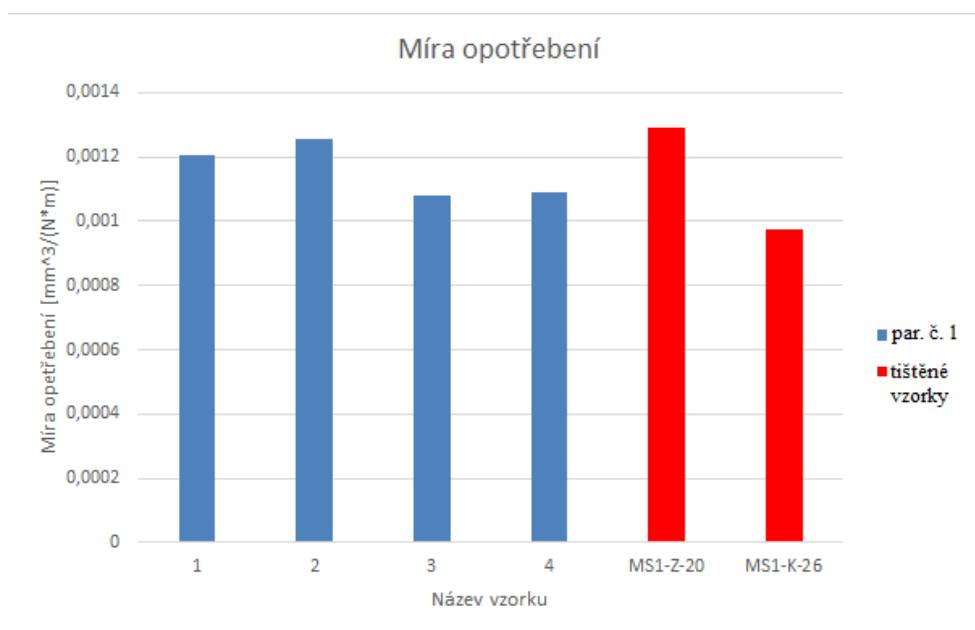
3.8.5 Tribologické zkoušky

Jednou z důležitých povrchových vlastností je tribologické chování, které má výrazný vliv na životnost mechanických součástí. Pro vyhodnocení koeficientu tření byla použita metoda pin-on-disk. Podstatou této zkoušky je přitlačení tělesa na povrch součásti předem definovanou silou a za současného otáčení vzorku při zvolené rychlosti a délky dráhy vytvoření drážky na povrchu. Z analýzy této drážky se dopočtou hodnoty koeficientu tření a míra opotřebení.

Zkouška byla provedena na vzorcích ve tvaru válečku. Prozatím došlo k vyhodnocení parametru č. 1. Tento parametr byl porovnán s broušeným válečkem z materiálu MS1, kdy jeden vzorek byl vyžhán (označení MS1-Z-20) a druhý byl zakalen (označení MS1-K-26). Na grafu 12 lze vidět výsledky koeficientu tření. Jak můžeme pozorovat, po aplikaci laserového leštění došlo k jeho redukci. Koeficient tření vyleštěné plochy parametrem č. 1 se pohyboval okolo 0,45 a koeficient tření referenčních vzorků po žhání a kalení dosahoval hodnot 0,7. Došlo tedy k výraznému zlepšení koeficientu tření po aplikaci laserového leštění. Dále byla vyhodnocena míra opotřebení, zde můžeme pozorovat, že nedošlo k výrazným změnám v hodnotách. Do výsledků se samozřejmě promítnou změny ve struktuře povrchů, jelikož není možné zaručit stejné podmínky povrchů při jejich transformaci pomocí rozdílných technologií. Jedná se například o drsnost vzorků.



Graf 12 Grafické znázornění výsledků koeficientu tření



Graf 13 Grafické znázornění výsledků míry opotřebení

4 Zhodnocení výsledků a doporučení

V této práci byl experiment rozdělen do tří etap. V první etapě byla zvolena zařízení potřebná pro jeho realizaci, byl vytvořen návrh a realizace vzorků a byly připraveny vzorky pro následné provedení experimentů.

V druhé etapě došlo k hledání procesních parametrů laseru, kde hodnotícím kritériem byla drsnost povrchu. Pro tento experiment byly zvoleny tři druhy povrchů, které lze získat při tisku komplexních dílů. Tyto povrchy se od sebe diametrálně odlišují ať už z pohledu drsnosti nebo topologie povrchu. Nejdříve došlo k hledání optimální sady parametrů laseru zajišťující snížení

drsnosti na požadovanou hodnotu. Byly sledovány zejména tři parametry, a to vzdálenost od fokální roviny, výkon a rychlost. Tyto tři parametry mají zásadní vliv na fyzikální veličiny jako jsou intenzita laseru, energie laseru a stupeň překrytí. Nejdříve došlo k nalezení optimální sady parametrů z hlediska drsnosti povrchu u vzorků tisknutých pod úhlem 90 stupňů. Nalezená sada parametrů byla: vzdálenost od fokální roviny = 14 mm, výkon = 250, frekvence = 94, 56, délka pulzu = 10 ms. Při aplikaci těchto parametrů došlo ke snížení drsnosti Ra z hodnoty 6, 121 μm na hodnotu 0, 595 μm . Došlo tedy ke snížení hodnoty drsnosti Ra o 90 %. Poté byla hledána optimální sada laserových parametrů pro vzorky tisknuté pod úhlem 45 stupňů. Nalezená sada parametrů byla: frekvence = 94, 56 Hz, rychlost = 15 mm/s, délka pulzu = 10 ms, vzdálenost od fokální roviny = 14 mm, výkon = 375 W. Po aplikaci této sady parametrů došlo ke snížení drsnosti povrchu Ra z hodnoty 35, 638 μm na hodnotu 1, 247 μm . Došlo tedy ke zlepšení drsnosti povrchu Ra o 96 %. Posledním zkoumaným povrchem byl povrch tisknutý rovnoběžně s platformou. Nalezená sada parametrů byla: vzdálenost od fokální roviny = 14 mm, výkon = 275, frekvence = 94, 56, délka pulzu = 10 ms, rychlost = 20 mm/s. Po nastavení těchto parametrů a následném leštění došlo ke snížení drsnosti povrchu Ra z hodnoty 7, 995 na hodnotu 0, 759. Drsnost povrchu byla zlepšena o 90 %.

Ve třetí etapě došlo ke zkoumání toho, jak laserové leštění ovlivnilo mechanické vlastnosti vzorku a vlastnosti jeho povrchu. Nejdříve byla provedena únavová zkouška. Byly porovnány tři parametry laseru a jejich vliv na odolnost vůči cyklickému namáhání. Nejlepší hodnoty byly dosaženy při aplikaci parametru č. 1. Při aplikování zatížení 600 MPa vydržely vzorky až 588660 cyklů. Po aplikaci parametru č. 3 byl dosažen maximální počet cyklů 172956, což je výrazně menší počet než u parametru č. 1. Ani u jednoho z parametrů nebyla dosažena opakovatelnost. Pro správné vyhodnocení bude potřeba udělat větší počet kusů vzorků. Nicméně bylo prokázáno, že laserovými parametry lze měnit odolnost proti cyklickému namáhání. Nejhorších výsledků bylo dosaženo po aplikaci parametru č. 2. Příčinu těchto výsledků lze přisuzovat prasklinám vyskytujícím se na povrchu.

Dále došlo k provedení tahových zkoušek. Jelikož výrobce předepisuje a zaručuje hodnoty pevnosti a tažnosti, bylo možné zjistit, že při aplikaci parametru č. 3 se hodnoty pohybovaly v rozmezí předepsaném výrobcem. Při aplikaci parametru č. 3 došlo k nejmenší hloubce natavení a tepelně ovlivněné oblasti. Jak bylo možné vidět z výsledků, přetavená vrstva zde neměla výrazný vliv na změnu mechanických vlastností z pohledu tahových zkoušek. Naopak parametry č. 2 a č. 3 vykazovaly naprosto odlišný průběh zkoušky. U těchto parametrů dosahovala smluvní mez kluzu téměř stejných výsledků jako mez pevnosti, což poukazovalo na chování velmi křehkého materiálu. Tento předpoklad se potvrdil po provedení zkoušek tvrdosti. U vzorku č. 2 a č. 3 došlo k velkému nárůstu tvrdosti vlivem precipitačního vytvrzení, které způsobilo přehřívání vzorku při aplikaci laserového leštění.

Po provedení materiálového výbrusu bylo na vzorcích patrné, že parametry, u kterých docházelo k přehřívání (parametr č. 1 a č. 3), mají výraznou hloubku přetavené vrstvy (okolo

237 μm u parametru č. 1 a 190 u parametru č. 2) a tepelně ovlivněné vrstvy (722 μm u parametru č. 1 a 800 μm u parametru č. 2). Naopak u parametru č. 3 byla hloubka přetavení dvojnásobně menší a dosahovala hodnoty okolo 100 μm . Takto velká tepelně ovlivněná oblast u parametru č. 1 a č. 2 jasně dokazovala, že docházelo přehřívání vzorků. Nadměrné přehřívání vzorků dále vedlo k precipitačnímu vytvrzení oceli. Na grafu 10 je možné pozorovat enormní nárůst v tvrdosti u vzorků č. 1 a č. 2. Bohužel, jak je možné pozorovat na grafu 10, u vzorků bylo dosaženo stavu, který není žádoucí, a to tvrdšího jádra vzorku oproti povrchu. Ideálním stavem, jehož by bylo žádoucí dosáhnout, je tvrdý povrch a houževnaté jádro. U parametru č. 3 sice bylo dosaženo tvrdšího povrchu oproti jádru, nicméně rozdíl v tvrdosti byl natolik malý, že se tento rozdíl na provedené zkoušce neprojevil.

Po aplikaci parametru č. 1 bylo naměřeno tlakové povrchové zbytkové napětí, které je považováno za nežádoucí. U parametru č. 2 a č. 3 došlo k naměření tlakového napětí, které je žádoucí, jelikož působí proti šíření trhlin materiálu. Nicméně po konzultaci s odborníky, kteří pracují s metodou XRD, jsme došli k závěru, že takové hodnoty zbytkového napětí nemají na materiálové vlastnosti vzorku velký vliv, jelikož se do výsledků odrazí objem celého vzorku.

Jako poslední materiálová zkouška byla provedena tribologická zkouška, aby bylo zjištěno, jak laserové leštění ovlivnilo třecí vlastnosti laserem leštěného povrchu. Po provedení tribologických zkoušek došlo k vyhodnocení koeficientu tření a míry opotřebení, kdy byl prozatím zkoumán pouze parametr č. 1. Při vyhodnocení výsledků byly jasně naměřeny menší hodnoty koeficientu tření u laserově leštěných povrchů. U míry opotřebení nedocházelo k obzvláště velkým odlišnostem. Nelze tedy říci, že by po aplikaci laserového leštění došlo ke zlepšení nebo zhoršení výsledků měření.

Doporučení

Pro další práci je doporučeno provést optimalizaci délky pulzu, protože velký problém při aplikaci laseru činilo přehřívání vzorků. To zapříčinilo nejen deformaci a přehřívání rotační jednotky, ale i precipitační vytvrzení vzorků. Při snížení délky pulzu navíc dojde ke zvětšený rozsahu použitých frekvencí, to umožní i nastavení vyšších frekvencí. Dalším doporučením bude provést leštění na větším počtu vzorků, aby mohlo dojít ke statickému vyhodnocení výsledků. Dále je doporučeno provést měření zbytkového napětí odlišnou metodou do větší hloubky, jelikož byla hloubka přetavení větší, než se předpokládalo. Dále by bylo vhodné monitorovat průběh laserového leštění pomocí termokamery, aby se zjistila skutečná teplota vzorků při laserovém leštění.

5 Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na aplikaci dvou nových technologií, a to na aplikaci laserového leštění metodou přetaveného povrchu na 3D tištěné součásti, které se vyznačují vysokou drsností Ra 6 – 35 μm v závislosti na orientaci dílů.

Teoretická část je z velké části zaměřena na laserové technologie obecně. Dále došlo k rozboru laseru z pohledu jeho parametrů a jejich vlivu na samotný proces laserové modifikace povrchu. Tento rozbor byl důležitý z hlediska pochopení, jak který parametr ovlivňuje samotný proces aplikace laseru. Jelikož laserové leštění pomocí přetavení povrchu je poměrně nový vědní obor, došlo k vysvětlení jeho principu. V neposlední řadě došlo ke krátkému vysvětlení technologie 3D tisku a analýze defektů vznikajících převážně na povrchu po 3D tisku, o jejichž odstranění jsme se snažili.

Praktická část je složena ze tří etap. V první etapě došlo k popsání hlavních laserových zařízení použitých pro zpracování povrchu tištěných vzorků. Dále byly před samotným laserovým leštěním provedeny důležité kroky, potřebné pro jeho provedení a snížení rizik zanesení dalších nečistot a nežádoucích procesů do samotného laserového leštění.

Ve druhé etapě došlo k optimalizaci procesních parametrů za účelem snížení povrchové drsnosti pomocí aplikace laserového leštění. Tato optimalizace byla provedena na třech typech povrchů. Tyto tři typy povrchů byly vybrány po pečlivé rozvaze, právě kvůli jejich povrchovým odlišnostem. Bylo potřeba pozorovat chování laserového leštění na těchto površích, jelikož chování laseru je vysoce závislé na charakteristice povrchu. A jelikož samotná technologie 3D tisku je výjimečná právě tiskem komplexních dílů, kde jednotlivé části povrchu jsou jinak orientované, je nutné sledovat chování laseru na těchto površích. V této práci došlo k velké redukci z pohledu povrchové drsnosti. Bylo dosaženo redukce povrchové drsnosti Ra o 90 %. Nejlepší drsnosti povrchu dosahovala hodnota Ra 0,595 μm , jedná se proto o makroleštění. Zároveň bylo možné pozorovat rozdílnost výsledků laserového leštění u třech různých povrchů, a tedy lze konstatovat, že původní kvalita a topologie povrchu má výrazný vliv na výsledný leštěný povrch.

Ve třetí etapě došlo k aplikaci laserového leštění na vzorky. Až v této kapitole se ukázalo limitní použití těchto technologií, vyšly najevo jejich nedostatky. Mezi hlavní z nich patřilo přehřívání vzorků pomocí laserového leštění, praskání povrchu a nemožnost tisku rádiů bez použití podpor. To vyústilo v problémy, které musely být řešeny v rámci této práce. Nejdříve došlo k aplikaci laserového leštění na únavové vzorky. Po provedení zkoušek bylo zjištěno, že změnou parametrů lze ovlivňovat odolnost materiálu proti cyklickému zatěžování, a lze tedy předpokládat nález takových parametrů, jež by mohly ovlivnit odolnost proti cyklickému zatěžování v pozitivním směru. U zkoušky tahem se výrazně neprojevila laserem leštěná plocha. U zkoušky tahem došlo nicméně k projevu zvýšení tvrdosti velké části objemu materiálu vlivem přehřívání vzorků. Tento nárůst tvrdosti byl potvrzen provedením zkoušky

dle Vickerse. Dále byla provedena analýza povrchového zbytkového napětí metodou XRD. Bohužel zde nelze konstatovat, jak velký vliv mělo zbytkové napětí na celkovou pevnost materiál, jelikož větší vliv na chování vzorků mají nedostatky, které vznikaly při výrobě a zpracování vzorků. V poslední řadě došlo k provedení tribologických zkoušek. Tribologické testování bylo prozatím provedeno pouze na parametru č. 1. Při vyhodnocení došlo ke zjištění, že se zlepšil koeficient tření o 43 % oproti výchozímu stavu na hodnotu 0,4. Na míru opotřebení neměla laserem leštěná plocha výrazný vliv.

Tuto práci lze považovat za úspěšnou, neboť došlo k naplnění cílů zadaných v úvodu. Tato diplomová práce prokázala, jak potřebná je komplexní analýza chování materiálu po aplikaci laserového leštění. Až při podrobné analýze vyjdou najevo nedostatky vznikající při aplikaci této metody. Problémem při takovém komplexním řešení je časová a finanční náročnost, z toho důvodu bylo prozatím navrženo menší množství vzorků. V prvním kroku bylo potřeba identifikovat problémy vznikající při laserovém leštění. Tyto problémy byly identifikovány. Při další práci je potřeba navázat na dosavadní zjištění, zredukovat identifikované problémy a laserové leštění provést na větším počtu vzorků.

Tato práce má význam jak pro akademickou sféru z pohledu analyzování procesu nové technologie, ale i pro praktické využití, neboť došlo ke komplexní analýze nové technologie laserového leštění a byly zde zaznamenány omezení při budoucí aplikaci.

Zdroje

- [1] „Laser: Fundamentals - Introduction". [Online]. Dostupné z: http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M01_C01/co/Grain_OPI_ang_M01_C01_10.html (viděno čvc. 02, 2019).
- [2] O. Svelto, *Principle of lasers*, 5th edition. Springer Science + Business Media, LLC, 2010.
- [3] „Absorption of radiation, Spontaneous emission and Stimulated emission – Physics and Radio-Electronics". [Online]. Dostupné z: <https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/absorption-of-radiation-spontaneous-emission-and-stimulated-emission/> (viděno čvc. 04, 2019).
- [4] „Section 2.2: Properties of Laser Beams". [Online]. Dostupné z: <http://www.aml.engineering.columbia.edu/ntm/level1/ch02/html/11c02s02.html> (viděno lis. 18, 2019).
- [5] „Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu > LAO - lasery a optika". [Online]. Dostupné z: http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128#tab_lasery (viděno led. 16, 2020).
- [6] D. R. Paschotta, „YAG Lasers". [Online]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html (viděno led. 16, 2020).
- [7] „Which CO2 Laser Tube Is Best - DC or RF?", *Boss Laser Blog*, úno. 12, 2016. [Online]. Dostupné z: <http://bosslaser.com/blog/2016/02/12/which-co2-laser-tube-is-best-dc-or-rf/> (viděno led. 20, 2020).
- [8] M. Giuseppe, *Fiber Lasers*. 2015.
- [9] D. R. Paschotta, „Fiber Lasers". [Online]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/fiber_lasers.html (viděno led. 23, 2020).
- [10] M. S. Brown a C. B. Arnold, „Fundamentals of Laser-Material Interaction and Application to Multiscale Surface Modification", in *Laser Precision Microfabrication*, roč. 135, K. Sugioka, M. Meunier, a A. Piqué, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, s. 91–120.
- [11] A. H. Hamad, „Effects of Different Laser Pulse Regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the Ablation of Materials for Production of Nanoparticles in Liquid Solution", *High Energy and Short Pulse Lasers*, zř. 2016, doi: 10.5772/63892.
- [12] „Laser Safety Training Manual - Chapter 3", *Environmental Health & Safety*. [Online]. Dostupné z: <https://ehs.utoronto.ca/laser-safety-program/laser-safety-training-manual-b/> (viděno bř. 05, 2020).
- [13] „Laserové povrchové přetavování | Termomechanika technologických procesů". [Online]. Dostupné z: https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/laserove-zpracovani-povrchu/technologie/laser-surface-remelting?fbclid=IwAR1dfF4Vslq-5wqR4_D7O2dZZYXXDWxFjLlZKzQtwBZBfNMA8_oWJGjGJpo (viděno bř. 05, 2020).
- [14] „Operační módy laseru - Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení". [Online]. Dostupné z: http://www.lt.cz/e-learning/laser/operacni-mody-laseru?fbclid=IwAR3pSj1Vqs_OrPcQ1JKbWhKZRDESc7YARDXVxvsX3tBVyVKLr0celUmin5w (viděno bř. 05, 2020).

- [15] „Effects of Different Laser Pulse Regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the Ablation of Materials for Production of Nanoparticles in Liquid Solution | IntechOpen". [Online]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/high-energy-and-short-pulse-lasers/effects-of-different-laser-pulse-regimes-nanosecond-picosecond-and-femtosecond-on-the-ablation-of-ma> (viděno bř. 08, 2020).
- [16] „Southern Illinois University". [Online]. Dostupné z: <http://www.physics.siu.edu/~pskumar/facilities.html> (viděno bř. 08, 2020).
- [17] „Femtosecond laser micromachining: A back-to-basics primer", *Industrial Laser Solutions*, čer. 2012. [Online]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/cutting/article/16488567/femtosecond-laser-micromachining-a-backtobasics-primer> (viděno bř. 08, 2020).
- [18] Berkmanns J., Faerber M., „Laser cutting. The Surrey Research Park". Guildford, Surrey, BOC Industrial Gases UK, čer. 18, 2008, [Online]. Dostupné z: http://www.boconline.co.uk/internet.lg.lg.gbr/en/images/lasercutting410_39553.pdf.
- [19] S. Adisa, I. Loginova, A. Khalil, a A. Solonin, „Effect of Laser Welding Process Parameters and Filler Metals on the Weldability and the Mechanical Properties of AA7020 Aluminium Alloy", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, roč. 2, erven 2018, doi: 10.3390/jmmp2020033.
- [20] G. Kibria, B. Doloi, a B. Bhattacharyya, „Investigation into the effect of overlap factors and process parameters on surface roughness and machined depth during micro-turning process with Nd:YAG laser", *Optics & Laser Technology*, roč. 60, s. 90–98, srp. 2014, doi: 10.1016/j.optlastec.2014.01.009.
- [21] N. Ahmed, S. Pervaiz, M. Rafaqat, A. Hassan, a M. Zaaindin, „LBM of aluminum alloy: towards a control of material removal and roughness", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, roč. 105, pro. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04365-y.
- [22] M. Benton, M. Hossan, P. R. Konari, a S. Gamagedara, „Effect of Process Parameters and Material Properties on Laser Micromachining of Microchannels", *Micromachines*, roč. 10, s. 123, nor 2019, doi: 10.3390/mi10020123.
- [23] „Available Lenses". [Online]. Dostupné z: <https://www.ulsinc.com/available-lenses> (viděno bř. 21, 2020).
- [24] L. Giorleo, E. Ceretti, a C. Giardini, „Ti Surface Laser Polishing: Effect of Laser Path and Assist Gas", *Procedia CIRP*, roč. 33, s. 446–451, led. 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.06.102.
- [25] A. Temmler, E. Willenborg, a K. Wissenbach, „Laser Polishing", *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, roč. 8243, s. 19, nor 2012, doi: 10.1117/12.906001.
- [26] J. Kumstel, J. Flemmer, a A. Temmler, *Laser Polishing of Metallic Freeform Surfaces*. 2015, s. 355.
- [27] „Starters guide to 3D Printing: Orientation", *3D Printing Solutions*. [Online]. Dostupné z: <https://www.3dprintingsolutions.com.au/News/Australia/starters-guide-to-3d-printing-orientation> (viděno bř. 26, 2020).

- [28] I. Gibson, D. Rosen, a B. Stucker, *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition*. 2015, s. 498.
- [29] E. Malekipour a H. El-Mounayri, „Common defects and contributing parameters in powder bed fusion AM process and their classification for online monitoring and control: a review“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, roč. 95, č. 1, s. 527–550, bře. 2018, doi: 10.1007/s00170-017-1172-6.
- [30] O. Andreau *et al.*, „A competition between the contour and hatching zones on the high cycle fatigue behaviour of a 316L stainless steel: Analyzed using X-ray computed tomography“, *Materials Science and Engineering: A*, roč. 757, dub. 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.04.101.
- [31] A. Gebhardt, J.-S. Hötter, a D. Ziebura, „Impact of SLM build parameters on the surface quality“, *RTEjournal - Forum für Rapid Technologie*, roč. 2014, č. 1, led. 2014, [Online]. Dostupné z: <http://www.rtejournal.de/ausgabe11/3852>.
- [32] D. Thomas, „The Development of Design Rules for Selective Laser Melting“, Disertační práce, University of Wales Institute, Cardiff, 2009.

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Materiálový list MS1 - EOS

PŘÍLOHA č. 1

Materiálový list MS1 - EOS



Material data sheet

EOS MaragingSteel MS1

EOS MaragingSteel MS1 is a steel powder which has been optimized especially for processing on EOSINT M systems.

This document provides information and data for parts built using EOS MaragingSteel MS1 powder (EOS art.-no. 9011-0016) on the following system specifications:

- EOSINT M 270 Installation Mode *Standard*
with PSW 3.3 or 3.4 and default job MS1_020_default.job or MS1_040_default.job
- EOSINT M 270 Dual Mode
with PSW 3.5 and EOS Original Parameter Set MS1_Surface 1.0 or MS1_Performance 2.0
- EOSINT M 280
with PSW 3.5 and EOS Original Parameter Set MS1_Performance 1.0 or MS1_Speed 1.0

Description

Parts built in EOS MaragingSteel MS1 have a chemical composition corresponding to US classification 18% Ni Maraging 300, European 1.2709 and German X3NiCoMoTi 18-9-5. This kind of steel is characterized by having very good mechanical properties, and being easily heat-treatable using a simple thermal age-hardening process to obtain excellent hardness and strength.

Parts built from EOS MaragingSteel MS1 are easily machinable after the building process and can be easily post-hardened to more than 50 HRC by age-hardening at 490 °C (914 °F) for 6 hours. In both as-built and age-hardened states the parts can be machined, spark-eroded, welded, micro shot-peened, polished and coated if required. Due to the layerwise building method, the parts have a certain anisotropy, which can be reduced or removed by appropriate heat treatment - see Technical Data for examples.

Material data sheet

Technical data

General process data

Typical achievable part accuracy [1]	
- small parts (< 80 x 80 mm)	approx. $\pm 20 \mu\text{m}$ approx. $\pm 0.8 \times 10^{-3}$ inch
- large parts	approx. $\pm 50 \mu\text{m}$ approx. ± 0.002 inch
Age hardening shrinkage [2]	approx. 0.08 %
Min. wall thickness [3]	approx. 0.3 - 0.4 mm approx. 0.012 - 0.016 inch
Surface roughness (approx.) [4]	
- as manufactured	
MS1 Surface (20 μm)	R_a 4 μm ; R_z 20 μm R_a 0.16×10^{-3} inch, R_z 0.78×10^{-3} inch
MS1 Performance (40 μm)	R_a 5 μm ; R_z 28 μm R_a 0.19×10^{-3} inch, R_z 1.10×10^{-3} inch
MS1 Speed (50 μm)	R_a 9 μm ; R_z 50 μm R_a 0.47×10^{-3} inch, R_z 2.36×10^{-3} inch
- after shot-peening	R_a 4 - 6.5 μm ; R_z 20 - 50 μm R_a 0.16 - 0.26×10^{-3} inch R_z 0.78 - 1.97×10^{-3} inch
- after polishing	R_z up to < 0.5 μm R_z up to < 0.02×10^{-3} inch (can be very finely polished)

Material data sheet

Physical and chemical properties of parts

Material composition	Fe (balance) Ni (17 - 19 wt-%) Co (8.5 - 9.5 wt-%) Mo (4.5 - 5.2 wt-%) Ti (0.6 - 0.8 wt-%) Al (0.05 - 0.15 wt-%) Cr, Cu (each \leq 0.5 wt-%) C (\leq 0.03 wt-%) Mn, Si (each \leq 0.1 wt-%) P, S (each \leq 0.01 wt-%)
Relative density	approx. 100 %
Density	8.0 - 8.1 g/cm ³ 0.289 - 0.293 lb/in ³

Material data sheet

Mechanical properties of parts at 20 °C (68°F)

	As built	After age hardening [2]
Tensile strength [6]		min. 1930 MPa min. 280 ksi
- in horizontal direction (XY)	typ. 1100 ± 100 MPa typ. 160 ± 15 ksi	typ. 2050 ± 100 MPa typ. 297 ± 15 ksi
- in vertical direction (Z)	typ. 1100 ± 100 MPa typ. 160 ± 15 ksi	
Yield strength (Rp 0.2 %) [6]		min. 1862 MPa min. 270 ksi
- in horizontal direction (XY)	typ. 1050 ± 100 MPa typ. 152 ± 15 ksi	typ. 1990 ± 100 MPa typ. 289 ± 15 ksi
- in vertical direction (Z)	typ. 1000 ± 100 MPa typ. 145 ± 15 ksi	
Elongation at break [6]		min. 2 %
- in horizontal direction (XY)	typ. (10 ± 4) %	typ. (4 ± 2) %
- in vertical direction (Z)	typ. (10 ± 4) %	
Modulus of elasticity [6]		
- in horizontal direction (XY)	typ. 160 ± 25 GPa typ. 23 ± 4 Msi	typ. 180 ± 20 GPa typ. 26 ± 3 Msi
- in vertical direction (Z)	typ. 150 ± 20 GPa typ. 22 ± 3 Msi	
Hardness [7]	typ. 33 - 37 HRC	typ. 50 - 56 HRC
Ductility (Notched Charpy impact test)	typ. 45 ± 10 J	typ. 11 ± 4 J

[6] Tensile testing according to ISO 6892-1:2009 (B) Annex D, proportional test pieces, diameter of the neck area 5mm (0.2 inch), original gauge length 25mm (1 inch).

[7] Rockwell C (HRC) hardness measurement according to EN ISO 6508-1 on polished surface. Note that measured hardness can vary significantly depending on how the specimen has been prepared.

Material data sheet

Thermal properties of parts

	As built	After age hardening [2]
Thermal conductivity	typ. $15 \pm 0.8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ typ. $104 \pm 6 \text{ Btu in/(h ft}^2 \text{ }^\circ\text{F)}$	typ. $20 \pm 1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ typ. $139 \pm 7 \text{ Btu in/(h ft}^2 \text{ }^\circ\text{F)}$
Specific heat capacity	typ. $450 \pm 20 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ typ. $0.108 \pm 0.005 \text{ Btu/(lb }^\circ\text{F)}$	typ. $450 \pm 20 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ typ. $0.108 \pm 0.005 \text{ Btu/(lb }^\circ\text{F)}$
Maximum operating temperature		approx. $400 \text{ }^\circ\text{C}$ approx. $750 \text{ }^\circ\text{F}$

Abbreviations

typ.	typical
min.	minimum
approx.	approximately
wt	weight

Notes

The data are valid for the combinations of powder material, machine and parameter sets referred to on page 1, when used in accordance with the relevant Operating Instructions (including Installation Requirements and Maintenance) and Parameter Sheet. Part properties are measured using defined test procedures. Further details of the test procedures used by EOS are available on request. Unless otherwise specified, the data refer to the default job MS1_040_default.job or the equivalent parameter set MS1_Performance 2.0. The corresponding data for the default job MS1_020_default.job or the equivalent parameter set MS1_Surface 1.0 are approximately the same except where otherwise specified.

The data correspond to our knowledge and experience at the time of publication. They do not on their own provide a sufficient basis for designing parts. Neither do they provide any agreement or guarantee about the specific properties of a part or the suitability of a part for a specific application. The producer or the purchaser of a part is responsible for checking the properties and the suitability of a part for a particular application. This also applies regarding any rights of protection as well as laws and regulations. The data are subject to change without notice as part of EOS' continuous development and improvement processes.

EOS[®], EOSINT[®] and DMLS[®] are registered trademarks of EOS GmbH.

© 2011 EOS GmbH – Electro Optical Systems. All rights reserved.