

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2341 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití laserového mikroobrábění pro úpravu povrchu 3D tištěných
kovových dílů

Autor: **Martin Bureš**

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

Akademický rok 2017/2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin BUREŠ**
Osobní číslo: **S17B0026P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Název tématu: **Využití laserového mikroobrábění pro úpravu povrchu 3D
tíštěných kovových dílů**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Vlastní návrh experimentu a jeho provedení
4. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- **GIBSON, I., ROSEN, D. W., STUCKER, B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing.** Springer, 2010, ISBN 978-1-4419-1119-3
- **SCHERER, M. R. J. Double-Gyroid-Structured Functional Material.** University of Cambridge, UK, 2013, ISBN 978-3-3-319-00353-5
- **BÁRTOLO, P. J. et al. Virtual and Rapid Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping,** Taylor & Francis Group, London, UK, 2008, ISBN 978-0-0415-41602-3

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Konzultant bakalářské práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2017**
Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2018**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 18. října 2017

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu při studiu.

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 | |
| PRACOVISŤE | ZČU - FST - KTO | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | Využití laserového mikroobrábění pro úpravu povrchu 3D tištěných kovových dílů | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KTO | ROK ODEVZD. | 2018 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|
| CELKEM | 43 | TEXTOVÁ ČÁST | 28 | GRAFICKÁ ČÁST | 15 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY | Cílem bakalářské práce je povrchová úprava materiálu MS1 vytvořená 3D tiskem pomocí vláknového nanosekundového laseru. Jednotlivé kapitoly pojednávají o jednotlivých parametrech laseru, nastavení laseru při laserovém mikroobrábění a vliv jednotlivých parametrů na výslednou kvalitu povrchu spolu s experimentem. Cílem byla optimalizace jednotlivých parametrů za účelem dosažení co nejlepší kvality povrchu materiálu. |
| KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE | vláknový laser, optimalizace, laserové mikroobrábění, SCAPS SAMLight |

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

| | | | |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------|
| AUTHOR | Surname Bureš | Name Martin | |
| FIELD OF STUDY | Department of Machining technology | | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) doc. Ing. Zetek, Ph.D. | Name Miroslav | |
| INSTITUTION | ZČU - FST - KTO | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | Application of laser micromachining for the surface treatment of 3D printed metal parts | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | Machining Technology | SUBMITTED IN | 2018 |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|
| TOTALLY | 43 | TEXT PART | 28 | GRAPHICAL PART | 15 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | The main aim of bachelor thesis is the surface treatment of 3D printed metal parts by low-cost nanosecond fiber laser. The chapters of this thesis discuss about parameters of laser, setting of the laser for laser micromachining and influence of each parametrs on final surface quality and the experiment. The aim of this thesis is the optimalization of parameters to reach the best surface quality possible. |
| KEY WORDS | fiber laser, optimalization, laser micromachining, SCAPS SAMLight |

Seznam zkratk a symbolů

| | |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nd:Yag | typ pevnolátkového laseru s aktivním prostředím yttrium aluminium granát (YAG) obohacený Neodymem (Nd). |
| CO ₂ | plynový laser |
| DMLS | direct metal laser sintering |
| 3D | Trojrozměrný prostor |
| CNC | počítačově číslicově řízené obráběcí stroje |
| CAD | computer aided design |
| HAZ | heat affected zone – tepelně ovlivněná oblast |
| CW | continuous wave – laser s konstantní amplitudou a frekvencí, skoro vždy mají sinusový průběh |
| E_{max} | práh poškození vyjádřený v joulech |
| PRF0 | (Pulse Repetition Frequency) nastavení frekvence, při kterém paprsek dosahuje E_{max} |
| wfm0 | režim vlnové délky |
| SP | procentuálně vyjádřeno jak se jednotlivé pulsy překrývají |
| MS1 | Prášková nástrojová ocel určená pro tisk metodou DMLS třídy 19 |

Obsah

| | | |
|----------|-----------------------------------------------|-----------|
| 1 | Úvod | 11 |
| 1.1 | Laser | 11 |
| 1.2 | Princip laseru | 12 |
| 1.2.1 | Zdroj záření | 12 |
| 1.2.2 | Aktivní prostředí | 12 |
| 1.2.3 | Rezonátor | 13 |
| 2 | Rozbor současného stavu | 13 |
| 2.1 | Laserové mikroobrábění | 13 |
| 2.2 | Způsoby aplikace laseru | 13 |
| 2.2.1 | Laserové popisování (gravírování)..... | 13 |
| 2.2.2 | Laserové svařování..... | 14 |
| 2.2.3 | Laserové vrtání | 15 |
| 2.2.4 | Laserové řezání | 15 |
| 2.3 | Stav povrchu po 3D tisku metodou DMLS | 16 |
| 2.3.1 | Pískování | 17 |
| 2.3.2 | Konvenční obrábění | 17 |
| 2.4 | Faktory ovlivňující kvalitu povrchu | 18 |
| 2.4.1 | Absorpce laseru | 18 |
| 2.4.2 | Délka pulsu..... | 20 |
| 2.4.3 | HAZ a tepelná difuze | 22 |
| 2.4.4 | Parametry laseru | 25 |
| 3 | Vlastní návrh řešení..... | 27 |
| 3.1 | Specifikace používaného laseru..... | 27 |
| 3.2 | Obráběný materiál | 28 |
| 3.3 | Návrh postupu řešení mikroobrábění | 29 |
| 3.3.1 | Nastavení ohniskové vzdálenosti | 29 |
| 3.3.2 | Vytvoření rastru..... | 30 |
| 3.3.3 | Nastavení parametrů v programu SAMlight | 30 |

| | | |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| 3.4 | Experiment..... | 32 |
| 3.4.1 | První režim | 33 |
| 3.4.2 | Druhý režim..... | 35 |
| 3.4.3 | Třetí režim | 36 |
| 3.5 | Hodnocení výsledků experimentu | 37 |
| 4 | Závěr | 38 |

1 Úvod

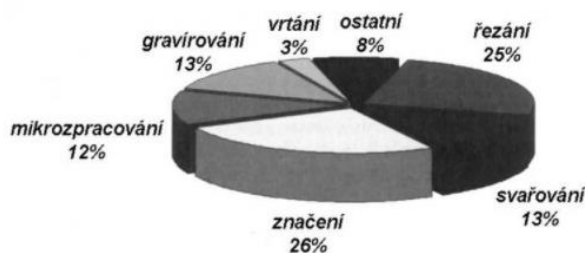
Laserové mikroobrábění se s postupem času stává hojně využívaným nástrojem v průmyslu kvůli svému víceúčelovému využití, šetření nákladů a bezkontaktního obrábění. Vláknové lasery začínají pomalu nahrazovat tradiční Nd:YAG lasery a to z důvodu nižších nákladů na údržbu, vysokou efektivností a vysokou kvalitou paprsku. Vláknové lasery dokáží operovat s vysokými energetickými pulsy s krátkou dobou pulsu, zatímco si zachovávají flexibilní nastavení s ohledem na změnu délky pulsu, tvaru paprsku a frekvenci. Vláknové lasery již ukázaly svoje využití pro zpracování široké škály materiálů a různé aplikace jako je například rytí, řezání, vrtání, popisování a čištění. Přestože vláknové lasery prokázaly svoje výše zmíněné vlastnosti a využití, je nutné neustále zkoumat schopnost jejich aplikace v průmyslu, aby dokázaly nahradit tradičně využívané Nd:YAG nebo CO₂ lasery.

Motivací pro tvorbu této práce byla snaha o optimalizaci jednotlivých parametrů laseru za účelem dosažení co nejvyšší kvality povrchu pomocí nízkonákladového nanosekundového vláknového laseru s průměrným výkonem 50W pro úpravu povrchu materiálu MS1. Tento jedinečný povrch vznikl spékáním jednotlivých vrstev kovového prášku laserem a vykazuje vysokou drsnost okolo Ra 8.

Hlavní podstatou této práce byla optimalizace parametrů laseru, nicméně můžeme očekávat prohloubení znalostí týkajících se procesních parametrů, a vliv jejich změn na výslednou kvalitu povrchu. Znalosti získané tvorbou této práce mohou vést ke značnému zkrácení času při optimalizaci parametrů u jiných druhů materiálů.

1.1 Laser [1]

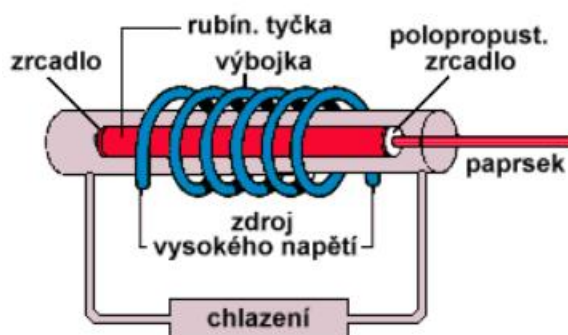
V laserovém zdroji je generováno laserové vlnění, které postupnou akumulací dosahuje energetického zesílení. Poté dochází k výstupu vlnění ven z laserového zdroje ve formě paprsku. Vlastnosti paprsku jsou dále ovlivňovány průchodem přes speciální optické komponenty. Takto upravený paprsek, který je zaostřený pomocí objektivu, vstupuje do pracovního prostředí. Vzhledem ke své složitosti a náročnosti k dosažení vysoké kvality a přesnosti se lasery začaly využívat v průmyslu až v 90. letech minulého století. Výrobní laserová technologie v té době dosáhla takové úrovně, že umožňovala vyrábět kvalitně a ve velkém množství. Dnešní laserové technologie jsou téměř bezporuchové a lze je považovat za stabilní součást výroby. Laser má v dnešní době vysokou škálu uplatnění v průmyslu (graf 1).



Graf 1 Přehled využití laseru [1]

1.2 Princip laseru

Laser se skládá z několika procesů, kterým je nutno porozumět, abychom si dokázali představit, jak takový laser pracuje (obrázek 1).



Obrázek 1 Schéma laseru [9]

1.2.1 Zdroj záření [2][3][4]

Zdroj záření slouží k dodávání energie elektronům v aktivním prostředí. Tím dochází k přechodu z nižší energetické hladiny na hladinu vyšší. Příroda na rozdíl od lidí energii nehýří, proto se snaží každý systém zaujmout takový stav, konfiguraci, polohu atd., v nichž má minimální možnou energii. Tělesu můžeme dodat energii různými způsoby, jako např. osvětlením, průchodem elektrického proudu nebo chemickou reakcí.

1.2.2 Aktivní prostředí [2][3][4]

V aktivním prostředí dochází ke vzniku paprsku. Aktivní prostředí musí obsahovat prvky, které mají tzv. metastabilní hladinu. Pokud narazí foton do elektronu, elektron se vybudí na vyšší energetickou hladinu, kde se neudrží a spadne na metastabilní hladinu. Důvod, proč potřebujeme, aby elektrony dosáhly metastabilní hladiny, je ten, že tam vydrží až 100 000 krát déle. Aktivním prostředím může být pevná látka s příměsí, kapalina i směs plynů.

1.2.3 Rezonátor [2][3][4]

Rezonátor se skládá ze dvou zrcadel, kde jedno je zcela odrazivé a druhé je polopropustné. Fotony letící mimo osu rezonátoru buďto ihned vyletí, nebo se několikrát odrazí a poté vyletí, kdežto fotony letící rovnoběžně na sebe neustále nabalují další fotony. Proto je důležitá metastabilní hladina, aby se fotony letící špatným směrem hned neuvolňovaly a počkaly, až je strhne foton letící správným (rovnoběžným) směrem. Až foton dosáhne požadované energetické hladiny, polopropustné zrcadlo vypustí fotony ve formě paprsku.

2 Rozbor současného stavu

2.1 Laserové mikroobrábění [5]

Tento pojem se začal dostávat do popředí v době, kdy se začala využívat důležitá vlastnost laserů, a to zpracování obrobků s minimálními rozměry. Laserové mikroobrábění se používá v několika oblastech výroby, kde nelze využít konvenční obrábění nebo je její využití nevýhodné. Paprsek laseru je bezkontaktní a univerzální nástroj. Při laserovém mikroobrábění dochází k uvolnění energie ve formě laserového svazku, který dopadá na povrch obrobku. Laserový svazek se vyznačuje hlavně tím, že je koherentní, kolimovaný a monochromatický. Tyto vlastnosti se využívají především v průmyslu k fokusaci paprsku do velmi malého bodu, a tím dochází k nárůstu vysoké plošné energie a natavení obrobené plochy. Materiál je odebírán formou sublimace, jedná se tedy o beztržkové obrábění, kdy dochází k natavení a poté k odpaření materiálu. Důležitou vlastností laseru při laserovém mikroobrábění je rychlost, přesnost a výkonnost.

2.2 Způsoby aplikace laseru

2.2.1 Laserové popisování (gravírování) [6][7][8]

Proces gravírování spočívá buďto v odebrání velmi tenké vrstvy, nebo pomocí chemické reakce. Popisování závisí především na popisovaném materiálu, kdy využití jednotlivých vlnových délek závisí na absorpci popisovaného materiálu. Téměř výhradně se používají lasery typu CO₂ pro nekovové materiály a Nd:Yag pro kovové materiály. Popisovat lze velkou škálu materiálů jako např. kovy, nekovové materiály, dřevo, některé plasty a dokonce i sklo. Laserové gravírování vyniká především svojí rychlostí, flexibilitou a samozřejmě trvanlivostí popisu, kdy popis lze odstranit pouze hrubou silou. Tato technologie se vyznačuje vlastnostmi, jež ji kvalitativně odlišují od dosud používaných postupů (sítotisk, tampónový tisk, mechanické rytí a ražení) a která řeší nevýhody těchto konvenčních technologií. Příklad gravírování lze vidět na obrázku 2.



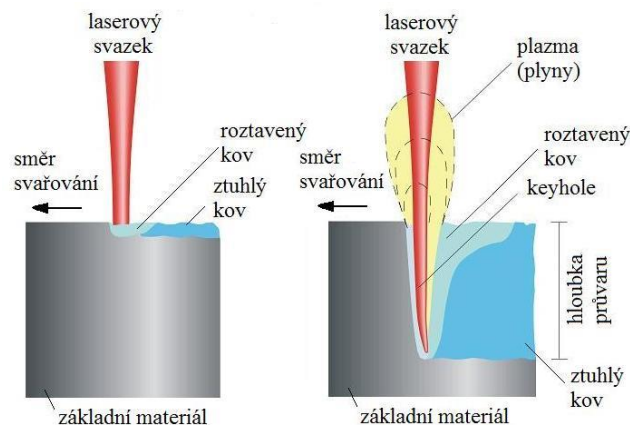
Obrázek 2 Příklad gravírování [31]

2.2.2 Laserové svařování [9][10]

Velmi důležitou částí při svařování je dodávání minimální energie na vstupu. Čím menší je energie na vstupu, tím menší oblast je tepelně ovlivněna a svar podléhá menšímu množství deformací. Laser (viz obrázek 3) je schopen dodávat energii ve velmi fokusované formě, čímž je zapříčiněn velmi hluboký a úzký svar s minimální tepelně ovlivněnou oblastí. Protože je malý objem roztaveného materiálu, není třeba dodávat přídavné materiály do svaru i při velké hloubce svaru. Vynikajícími materiály ke svařování pomocí laseru jsou např. nerezavějící oceli, nízkouhlíkaté oceli do 0,3% uhlíku, ale i například materiály jako jsou titanové, zirkonové a chromniklové slitiny. Laserové svařování je velmi často automatizováno, tím pádem dochází k velmi přesnému svařování i u obzvláště tvarově komplikovaných svarech. Laserové svařování se využívá především v sériové nebo hromadné výrobě.

Výhody použití laserového svařování:

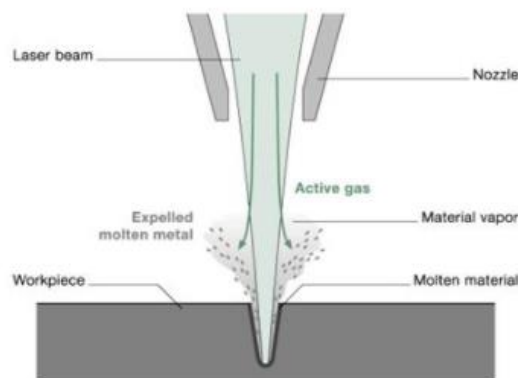
- lehce dosažitelný úzký a hluboký svar
- efektivní hluboké svary do tloušťky až 12 mm
- vysoká produktivita práce
- bez použití vakua, pouze se speciální inertní přídavnou atmosférou
- laserový paprsek dokáže svařovat i na těžce dostupných místech



Obrázek 3 Laserové svařování [30]

2.2.3 Laserové vrtání [11][12]

Jedna z nejčastěji používaných aplikací laseru je vrtání (obrázek 4). Vrtání laserem lze aplikovat na neomezené množství materiálu. I když jsou CO₂ lasery nejpoužívanějším typem pro vrtání, tak je začínající poptávka po laserech s pevnolátkovým zdrojem Nd:Yag. Lasery s Nd:Yag zdrojem dokážou provádět operace podobným způsobem jako lasery s CO₂, nicméně pevnolátkové lasery dokáží vrtat s menší tepelně ovlivnitelnou oblastí a díky svojí krátké vlnové délce 1060 nm jsou vhodné pro vrtání jak kovů, tak i vysoce reflektivních materiálů. Tyto lasery zjednodušují vrtání do materiálu o velké tloušťce díky svému vysokému špičkovému výkonu. Použití mikro-vrtání v průmyslu je uznáváno především díky svému použití u vodivých i nevodivých materiálů, vysoké produktivitě, malému materiálovému odpadu, nízké výrobní ceně, malé HAZ, bezkontaktnímu obrábění a ekologické šetrnosti. Pomocí laserů můžeme vrtat otvory s minimálními průměry až 0,1 milimetrů a s přesností až na 1 mikrometr. Tato technologie se používá především v leteckém a automobilovém průmyslu. Vrtat lze třemi způsoby, a to jednotlivými pulzy a nárazovým vrtáním, trepanačním vrtáním a spirálovým vrtáním.



Obrázek 4 Proces laserového vrtání [32]

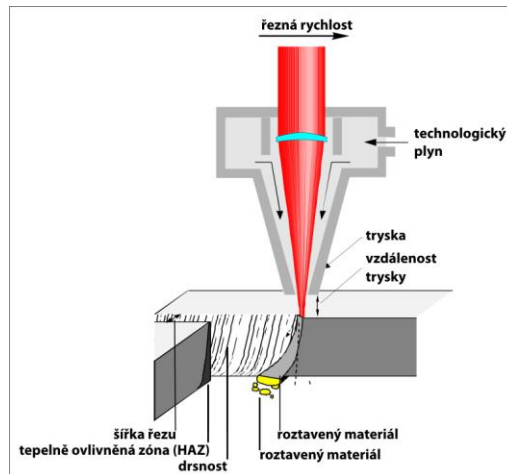
2.2.4 Laserové řezání [13][14]

Laserové řezání je dnes asi nejčastější průmyslovou laserovou aplikací. Řez vznikne počátečním průpalkem a postupným odtavováním materiálu (obrázek 5). Na vzdáleně podobném principu pracuje řezání lupenkovou pilou. Rozlišujeme 3 typy řezání a to oxidační, tavné a sublimační.

Oxidační řezání se používá u materiálů, které mají vysokou tepelnou vodivost. Mezi tyto materiály patří zejména černá ocel a měď. Jako procesní plyn se používá kyslík, který podporuje hoření v místě řezu, a tedy ovlivňuje lokální nárůst teploty. Výhoda oxidačního řezání oproti tavnému řezání se projevuje při větší tloušťce materiálu, kdy je možné snižovat výkon a množství dodávaného plynu, neboť je vytvořena větší tepelná plocha řezu, ze které plyn nemůže uniknout. To má za následek úsporu procesních plynů.

U tavného řezání se jako procesní plyn používá dusík nebo vzduch. Mezi materiály řezané tímto způsobem patří např. nerezové oceli, mosaz, pozink a hliník. Výjimku tvoří hliník, který je sice vysoce tepelně vodivý, avšak kvůli vysoké reaktivitě s kyslíkem nelze použít oxidační řezání. Procesní plyn účinně odstraní natavený materiál a díky následnému odfuku se docílí malé tepelně ovlivněné oblasti. U tavného řezání vznikají čisté nezoxidované řezy.

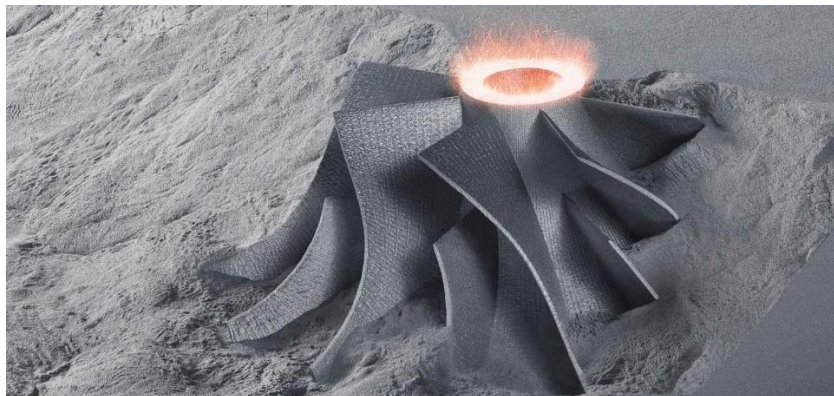
Pomocí sublimačního řezání je materiál taven a odpařen. Tento způsob se používá jen zřídka.



Obrázek 5 Proces laserového řezání [33]

2.3 Stav povrchu po 3D tisku metodou DMLS [15][16][17]

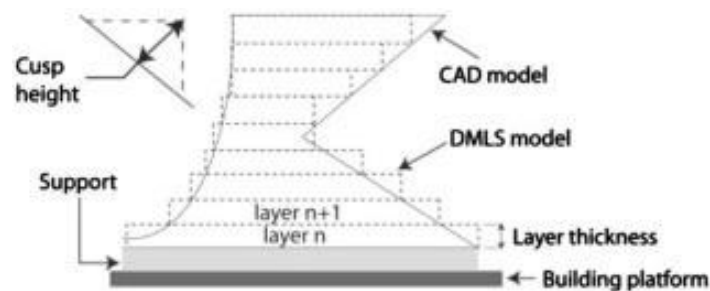
DMLS (Direct Metal Laser Sintering) pracuje na principu spékání kovového prášku po jednotlivých vrstvách pomocí laseru (obrázek 6). Tato metoda je výhodná především pro tisk specifických součástí, které jsou obtížně vyrobitelné a také při výrobě prototypů. DMLS výtisky jsou pevné, trvanlivé a tepelně odolné. Při tištění metodou DMLS se dosahuje přesností 0,02 – 0,08 mm s drsností povrchu okolo Ra 8 mikrometrů. Tištěné povrchy často vyžadují sekundární obráběcí procesy pro zlepšení drsnosti povrchu, zahlazení prohlubní a zkosení. Sekundární procesy mohou mít nepříznivý vliv na kvalitu povrchu a to z hlediska ztráty detailů a rozměrových tolerancí. Drsnost povrchů lze zlepšit pomocí různých dokončovacích procesů až na drsnost 0,025 mikrometrů. U 3D tisku kovových součástí je obzvláště obtížné odstranění podpor, což snižuje výslednou kvalitu povrchu.



Obrázek 6 3D tisk metodou DMLS [34]

2.3.1 Pískování [18][19]

Pískování je technologický proces, při kterém dochází k obrušování a čištění povrchu pomocí jemně namletého křemičitého písku. Tento písek je vrhán na povrch vysokou rychlostí buďto pomocí stlačeného vzduchu, nebo pomocí mechanického metání písku rotujícími lopatkami. Ve strojírenství se tato metoda používá k závěrečnému čištění před povrchovou úpravou. Tato metoda se u tištěných kovových součástích využívá především k odstranění zbytkových částí, které zůstaly na povrchu při odstraňování podpor a také pro odstranění “schodiště“, které vzniklo vrstvením (obrázek 7). Pokud má součást dosáhnout určitých rozměrových a pevnostních kritérií, je důležité si uvědomit, jak velké množství materiálu bude odebráno pískováním. Pokud by bylo potřeba odebrat větší vrstvu materiálu, tak je to třeba zohlednit při tvorbě modelu před tiskem a navrhnout větší tloušťku stěn.



Obrázek 7 Schodiště vytvořené 3D tiskem metodou DMLS [35]

2.3.2 Konvenční obrábění [20]

Konvenční obrábění se většinou používá pro výrobu menšího množství výrobků, a to bez použití dalších dokončovacích procesů. Nicméně konvenční obrábění se také začalo používat jako sekundární proces pro úpravu povrchu u aditivních technologií. Jedním z důvodů, proč se používá konvenční obrábění jako sekundární proces, je zlepšení rozměrové přesnosti. V průmyslech jako jsou například automobilový a lékařský, kde se kladou vysoké požadavky na toleranci a funkčnost, je požadavek opakovatelnosti výroby s vysokými nároky. Většina aditivních technologií, mezi které patří i metoda DMLS, dokáže vyrábět s rozměrovou přesností $\pm 125 \mu m$, ale to v některých případech není dostačující. Nicméně, s CNC obráběním můžeme dosáhnout rozměrové přesnosti až $\pm 50 \mu m$. Součásti vyrobené metodou DMLS jsou často navrhovány pro náročné využití, takže jsou velmi často obráběny několika-osou frézou, aby se dosáhlo požadované přesnosti. Pokud aplikace vyžaduje specifické rozměry, je třeba podle toho změnit 3D CAD data součástky. Při navrhování 3D modelu, který bude dále povrchově upravován pomocí standardního obrábění, je třeba brát v potaz několik zásad:

- Vestavět přebytečný materiál (přídavek) – 3D tištěná součást musí obsahovat nadbytek materiálu tak, aby při obrábění součást obsahovala dostatek vrstev pro odebrání materiálu a dosáhla potřebné přesnosti. Na obrázku 8 lze vidět příklad množství odebraného přebytečného materiálu.

- Brát ohled na oblasti s přesnými tolerancemi – je třeba probrat kritické kóty, které se budou obrábět, s konstruktéry a technologi. Velmi často musí dojít k úpravě návrhu a optimalizovat stavbu součásti k obrábění, jako je například zesílení stěny.
- Udělat kritické oblasti dosažitelné – je třeba umístit oblasti, které jsou nutné obrobit, pokud je to možné do snadně dosažitelných míst. Ani 5ti-osá frézka neumožní obrábění ve všech místech 3D tištěných součástí.



Obrázek 8 Před a po obrobení 3D tištěného kovového dílu [36]

2.4 Faktory ovlivňující kvalitu povrchu

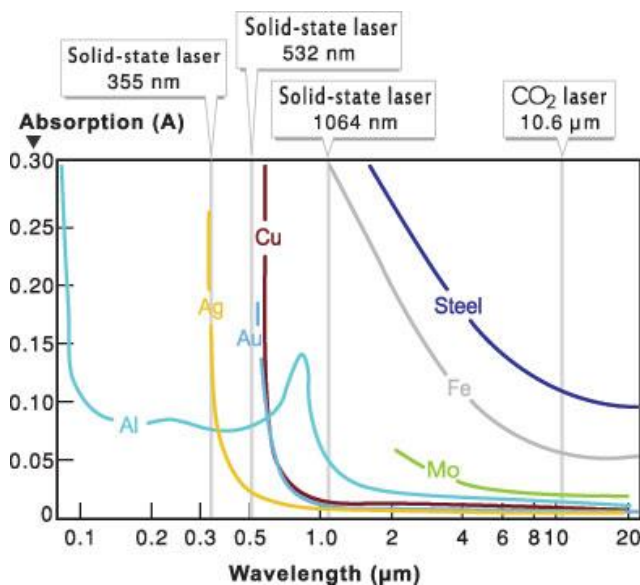
Při laserovém mikroobrábění závisí kvalita povrchu jak na charakteristice laseru (absorpce materiálu, délka pulsu, tepelně ovlivněná oblast), tak i na parametrech laseru (výkon, frekvence, rychlost snímání a drážkování laseru).

2.4.1 Absorpce laseru [21][22][23]

Při dopadu laserového záření na povrch může dojít buďto k jeho odrazení (může projít skrz), nebo může být laserové záření absorbováno. Například difuzní odrazivosti se využívá především u laserových experimentů, kdy se paprsek odrazí do všech směrů, a tím se zvyšuje bezpečnost experimentu. Hladký lesklý povrch má dobrou odrazivost. Laserové záření u výkonných laserů jako jsou Nd:Yag prochází skrze průhledné objekty jako je sklo nebo voda. Pro laserové mikroobrábění je u těchto tří vlastností nejdůležitější absorpce. Aby mohlo dojít k ablaci materiálu, musí dojít k přeměně elektromagnetické energie laserového světla na energii tepelnou. Množství přeměnné energie závisí na schopnosti materiálu absorbovat laserové světlo. Je to tenhle „sekundární“ typ energie, absorbovaná energie, než samotný laserový paprsek, který způsobuje zahřátí kovu a produkuje pro nás žádoucí efekt. Schopnosti absorpce u kovů záleží na několika různých parametrech zahrnující jak parametry kovu, tak i parametry samotného laseru.

Důležitými parametry laseru ovlivňující absorpci jsou například vlnová délka laserového paprsku (graf 2), úhel dopadu a polarizace laserového paprsku. V některých případech může

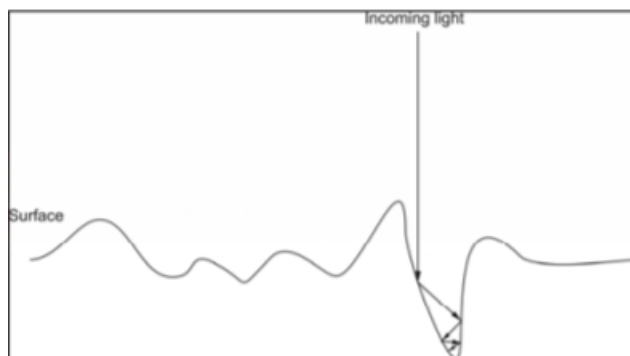
také záleží na intenzitě, což je kombinace výkonu a velikosti ohniskové plochy laserového paprsku.



Graf 2 Závislost absorpce materiálu na vlnové délce laseru [23]

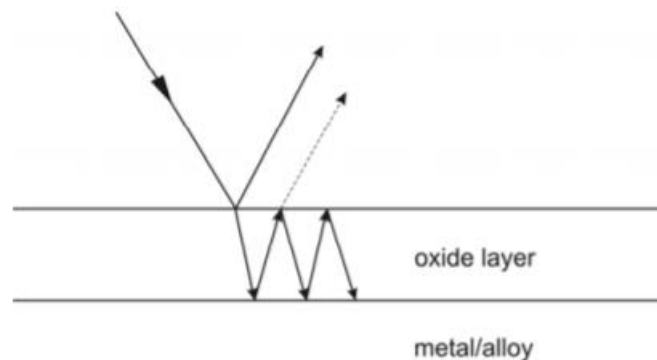
Základním materiálovým parametrem, který rozhoduje o množství absorbovaného světla je složení materiálu, zda pracujeme s čistými prvky (jako jsou hliník, měď, železo, atd.) nebo se slitinou (jako je ocel nebo mosaz). Světlo a elektrony uvnitř materiálu nebo slitiny na sebe vždy působí, bez ohledu na složení materiálu či slitiny, poněvadž světlo je elektromagnetická vlna a elektrické či magnetické pole působí pouze s nabitou hmotou. Elektrony se pomocí elektrického pole zrychlí a prostřednictvím různých kolizí s ostatními složkami v kovu se energie přenesou do mřížky. Jakmile je energie přenesena do kovu, dojde k zahřátí. S rostoucí teplotou může dojít ke změně množství absorbovaného světla, jelikož jak elektrony, tak atomy mřížky v kovu získávají kinetickou energii, což ovlivní frekvenci jednotlivých kolizí.

Absorpce je silně závislá na vlastnostech povrchu kovu nebo slitiny. Skutečné povrchy nejsou ani zdaleka rovné, každý povrch má určitý stupeň drsnosti povrchu, což ovlivní jejich optické chování. Díry a jámy (obrázek 9) mohou zachytit část světla, a tím zvýšit absorpci.



Obrázek 9 Struktura povrchu může zachytit část světla, a tím zvýšit absorpci [23]

U kovů se na povrchu přirozeně vyskytují vrstvy oxidů a jejich chemické a optické vlastnosti se mohou velmi lišit od vlastností kovů nebo slitin nacházející se pod oxidy. Poté může nastat situace, která se nachází na obrázku 10, kde je světlo „zachyceno“ oxidační vrstvou, což může dále zvýšit absorpci.



Obrázek 10 Schéma zachycení světla v oxidační vrstvě [23]

A nakonec, kontaminace jako jsou nečistoty, olej a prach mohou nepříznivě ovlivnit absorpční potenciál materiálu. Ty se tam mohou objevit po předchozích povrchových úpravách jako je pískování či finišování, manipulací se součásti nebo to jsou nečistoty vzniklé samotnou výrobou materiálu či slitiny.

Absorpce se u kovů spočítá pomocí Kirchhoffova zákona:

$$A = 1 - R = 1 - \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2}$$

A – pohltivost

R – odrazivost

n – index lomu materiálu

k – koeficient extinkce materiálu

2.4.2 Délka pulsu [24]

S vývojem techniky přichází také dostupnost ultrakrátkých pulsových laserů a jejich aplikace v oblasti strukturování povrchu a ablace. Je čím dál tím více evidentní, že vysoce přesné procesy s délkou pulsu ve femtosekundách a pikosekundách demonstruje v mnoha případech zlepšení kvality u mnoha materiálů v porovnání s nanosekundovými lasery a lasery s delší délkou pulsu. Ultrakrátké laserové pulsy mohou eventuálně hrát důležitou roli ve zpracování materiálového povrchu, proto je nutné určit limitaci důležitých parametrů, abychom mohli zvolit optimální laserový systém pro určitou aplikaci. Kvalita strukturování či zpracování povrchu laserem je nicméně velice závislá na druhu materiálu či vlnové délce, a proto není vždy z hlediska přesnosti a ovladatelnosti výhodné použít krátké délky pulsů. Je všeobecně známo, že u kovů nedochází k výrazným změnám v kvalitě povrchu u délky pulsů do 10 ps.

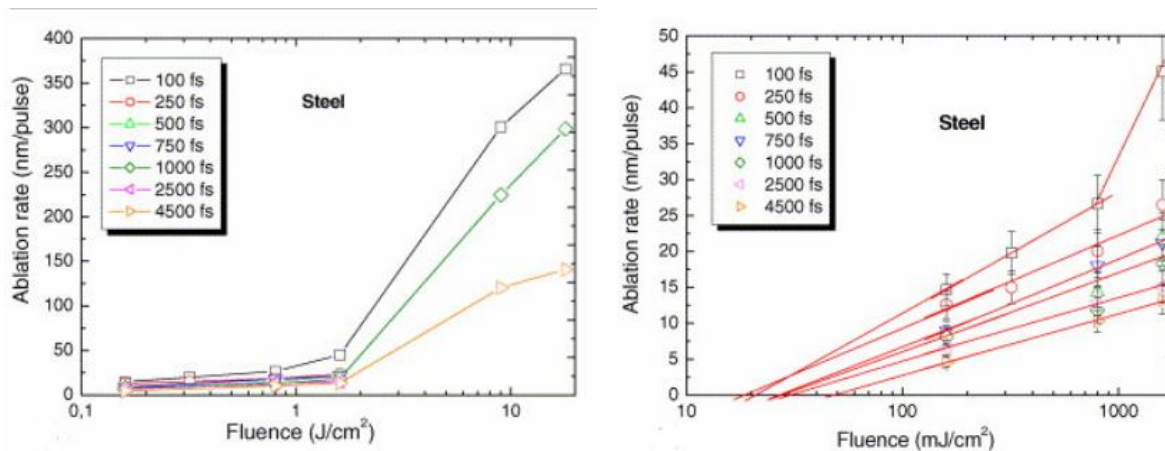
Hloubka ablace může být popsána známou logaritmickou rovnicí:

$$L = \lambda \log \left(\frac{F}{F_{th}} \right)$$

kde F_{th} vyjadřuje minimální fluenci energie (hustota prošlé energie) potřebnou pro ablaci materiálu. F je dodané množství fluence energie. λ vyjadřuje efektivní hloubku penetrace laserové energie ($1/\alpha$ je nejjednodušší aproximace). Z tohoto vzorečku vyplývá, že když operujeme s hodnotami blížíící se k hranici minimální fluence energie potřebné pro ablaci materiálu, dochází k odebrání velmi malé hloubky. Pokud ale zvýšíme množství fluence energie, dojde ke zvýšení ablace, nicméně může dojít k většímu prostupu tepla i u laserů s tak krátkými délkou pulsu jako jsou femtosekundové. Abychom zachovali určitou míru odebrání materiálu, ale přitom zachovali kvalitní znaky ultrakrátkých laserových pulsů, je potřeba zajistit velké množství opakování. Přestože jde vývoj ultrakrátkých laserových pulsů dopředu, tak ještě stále zaostávají za nanosekundovými lasery, co se týče velkých povrchových úprav v průmyslovém odvětví.

Studie Le Harzic et al. (2005) se zaměřuje na ablaci materiálu při délce pulsu v rozsahu od 5 ps do 100 fs u oceli, mědi a hliníku. Měření bylo rozděleno na dva režimy, a to na nízkou fluenci energie (0-1,6 J/cm²) a vysokou fluenci energie (1,6-20 J/cm²).

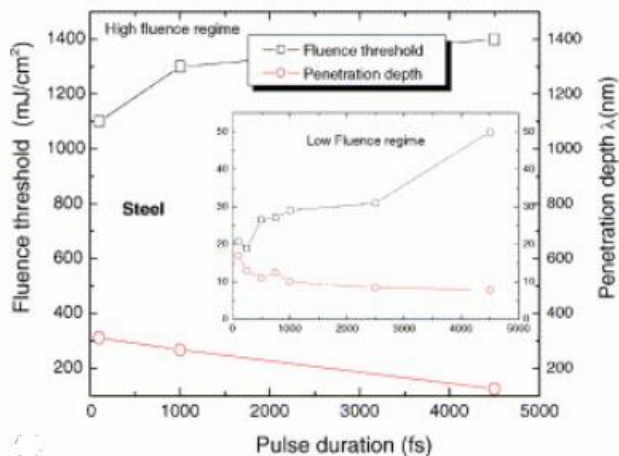
V grafu 3 můžeme pozorovat hodnoty ablace v závislosti na délce pulsu o délkách 100, 250, 500, 1000, 2500 a 4500 fs. Velikost ablace byla vydedukována zprůměrováním parametrů, jako jsou: frekvence, rychlost snímání, průměr ohniskového bodu a opakování. Pokud se podíváme z blízka na graf 3 s nízkou fluencí energie, můžeme pozorovat, že množství ablace klesá s rostoucí délkou pulsu. Navíc tyto poznatky poukazují na to, že když zvyšujeme délku pulsu, dojde také k navýšení minimální fluence energie potřebnou pro ablaci materiálu. Podíváme-li se na vývoj hodnot u grafu s nízkou fluencí energie, zjistíme, že jsou skoro rovnoběžné, jenom s malým poklesem.



Graf 3 Množství odebraného materiálu v závislosti na fluenci pro různé délky pulsů [24]

Dosadíme-li hodnoty z grafu 3 do výše uvedené rovnice, můžeme přímo dopočítat minimální fluenci energie potřebnou pro ablaci materiálu a hloubku energetické penetrace. Tam, kde se

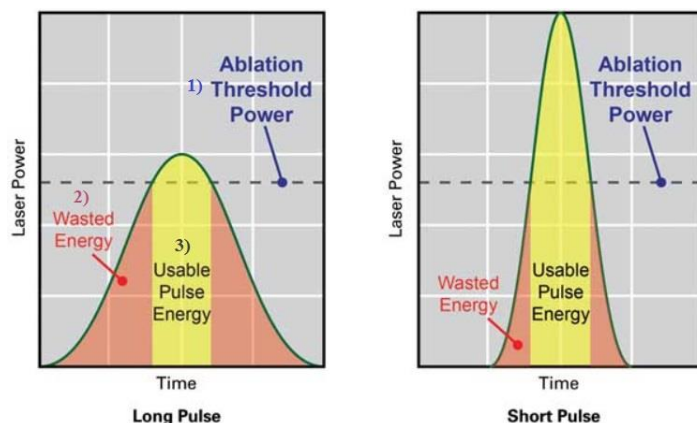
protínají hodnoty s dolní osou v grafu 3, značí velikost minimální fluence energie potřebnou pro ablaci materiálu. Hodnoty velikosti minimální fluence energie potřebnou pro ablaci materiálu a hloubky energetické penetrace v závislosti na délce pulsu lze pozorovat na grafu 4. Můžeme tedy z grafu vydedukovat, že u oceli je velmi nízká velikost minimální fluence energie potřebnou pro ablaci materiálu, která se pohybuje od 20 mJ/cm² u 100 fs pulsu do 50 mJ/cm² u 4500 fs pulsu. Například u mědi začíná minimální fluence energie potřebnou pro ablaci materiálu na 110 mJ/cm² a u hliníku na 190 mJ/cm². A podle toho lze říci, že s délkou pulsu klesá efektivní energetická hloubka penetrace.



Graf 4 Závislost minimální potřebné fluence energie pro odebrání materiálu a hloubky penetrace na délce pulsu [24]

2.4.3 HAZ a tepelná difuze [26][27]

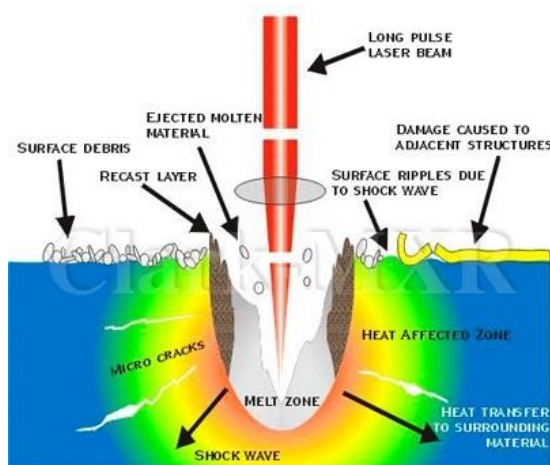
S tepelně ovlivněnou oblastí a tepelnou difuzí souvisí délka pulsu, která byla podrobně popsána v kapitole 2.4.2. Lasery s krátkou délkou pulsu obecně vytváří lepší povrch, lze lépe kontrolovat hodnotu úběru, vytváří ostřejší hrany a tepelně ovlivněná oblast je minimální. Jak je vidět na obrázku 11, krátký puls má mnohem větší špičkový výkon. Pokud se délka pulsu dostane do pikosekundových hodnot, špičkový výkon bude natolik vysoký, že dojde k multifotonové absorpci. To je vysoce nelineární efekt, při kterém dojde k roztržení meziatomových vazeb. Krátké pulsy tedy odstraňují materiál podle výše zmíněného procesu a tepelnou ablací. Zatímco nanosekundové lasery odebírají materiál pouze tepelnou ablací. Při využití krátkých laserových pulsů leží větší část špičkového výkonu nad hranicí minimální potřebné špičkové intenzity, což maximalizuje efektivitu a minimalizuje tepelně ovlivněnou oblast. U laseru s delšími pulsy se velká část energie ztratí ve formě tepla. Mluvíme tedy o tepelné difuzi, která je nežádoucí.



Obrázek 11 Vliv délky pulsu na mikroobrábění 1) minimální výkon potřebný pro úběr materiálu 2) ztracená energie ve formě tepla 3) využitá energie ve formě úběru materiálu [26]

Při absorpci delších pulsů dochází k natavení a následnému vypaření materiálu, což může mít za následek kontaminaci okolního prostředí, mikrotrhliny a odebrání materiálu o větších rozměrech než ohniskový bod. Dalšími nežádoucími účinky jsou poškození přilehlých struktur, delaminace a vytvoření přetaveného materiálu. Pokud se při obrobení uvolní velké množství tepla do nataveného materiálu, tak natavený materiál začne vařit. Jak lze vidět na obrázku 12, vařící materiál uvolňuje kapky nataveného materiálu (dle obrázku 12 jako *surface debris*), které následně dopadají na povrch, a dojde k jeho znehodnocení.

Tepelná difuze ovlivňuje velkou oblast kolem ohniskového bodu. Tato oblast se nazývá tepelně ovlivněná oblast (HAZ). Jednotlivé tepelné vlny procházejí materiálem a dochází k ohřátí materiálu. Následné zchlazení způsobuje mechanické napětí, a to vede k mikrotrhlinám a v některých případech může dojít i k makrotrhlinám v materiálu. V praxi se při namáhání mohou tyto trhliny šířit dál do objemu a může dojít k předčasnému selhání zařízení. Další nežádoucí vliv má přetavená část materiálu. Přetavená část materiálu má většinou jiné chemické a fyzické vlastnosti než nepřetavená část materiálu a pokud je to nutné, musí se odstranit.

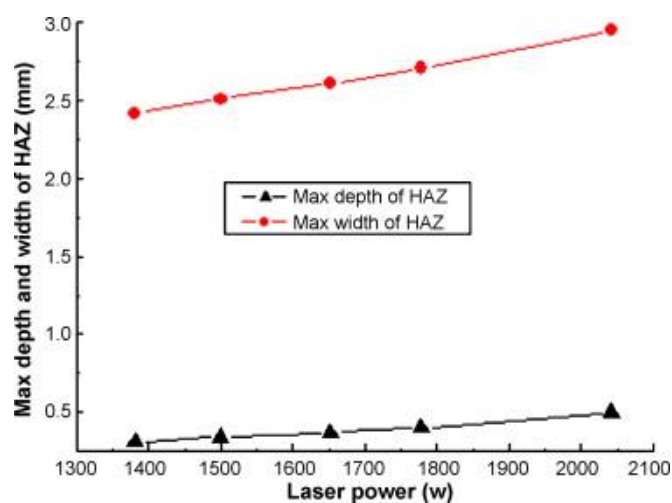


Obrázek 12 Formy ovlivnění HAZ [26]

Ve studii Yang et al. (2010) se zabývali tvorbou 3D modelu tvorby HAZ a parametry laseru ovlivňující HAZ při laserovém mikroobrábění slitiny Ti6Al4V a následné odchylky modelu od

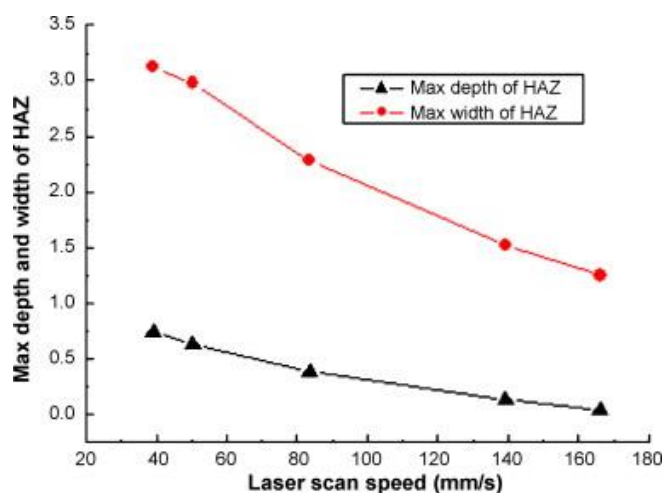
experimentálně naměřených hodnot. Zaměříme se pouze na experimentální část studie, kde se určovala šířka a hloubka HAZ v závislosti na jednotlivých parametrech, neboť praktická část této bakalářské práce se bude zabývat úprav povrhu v závislosti na změnách parametrů laseru. V této studii bylo experimentálně prokázáno, že šířka a hloubka HAZ je velice závislá na parametrech laseru (výkon, rychlost snímání, úhel dopadu a průměr paprsku) a také na parametrech obráběného materiálu (tepelná vodivost, hustota a měrné teplo).

První test probíhal s konstantní rychlostí snímání a konstantním průměrem paprsku a proměnná hodnota byl výkon. Jak můžeme pozorovat na grafu 5, šířka a hloubka HAZ se téměř lineárně zvyšuje s rostoucím výkonem.



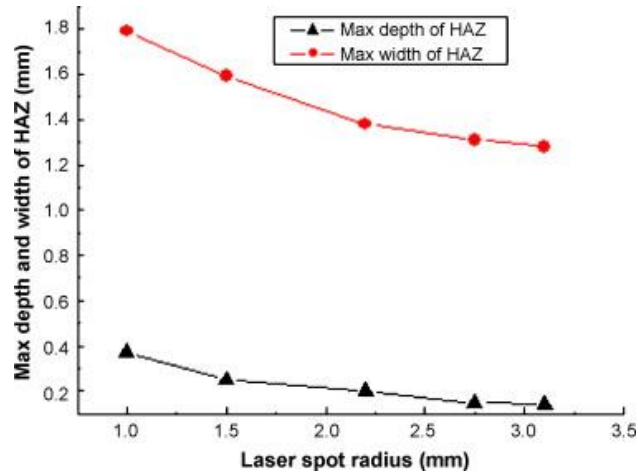
Graf 5 Závislost hloubky a šířky HAZ na výkonu laseru [27]

Účinek skenovací rychlosti na hloubce a šířce HAZ můžeme vidět na grafu 6. Bylo pozorováno pro pět hodnot rychlostí snímání 39.06, 50.28, 83.58, 139.18 a 166.25 mm/s s konstantním výkonem a průměrem laserového paprsku, že s rostoucí rychlostí snímání klesají maximální hodnoty šířky a hloubky HAZ.



Graf 6 Závislost hloubky a šířky HAZ na rychlosti skenování [27]

Vliv průměru laserového paprsku na hloubce a šířce HAZ je ukázáno na grafu 7 při zachování stejné hodnoty výkonu a rychlosti snímání pro hodnoty průměru paprsku 1.0, 1.50, 2.20, 2.75 a 3.1 mm. Můžeme vidět pokles hodnot maximální šířky a hloubky HAZ s rostoucím průměrem laseru.



Graf 7 Závislost hloubky a šířky HAZ na diametru paprsku [27]

2.4.4 Parametry laseru [28][29]

Tři nejzákladnější parametry ovlivňující kvalitu povrchu a hodnotu úběru jsou výkon, rychlost a frekvence.

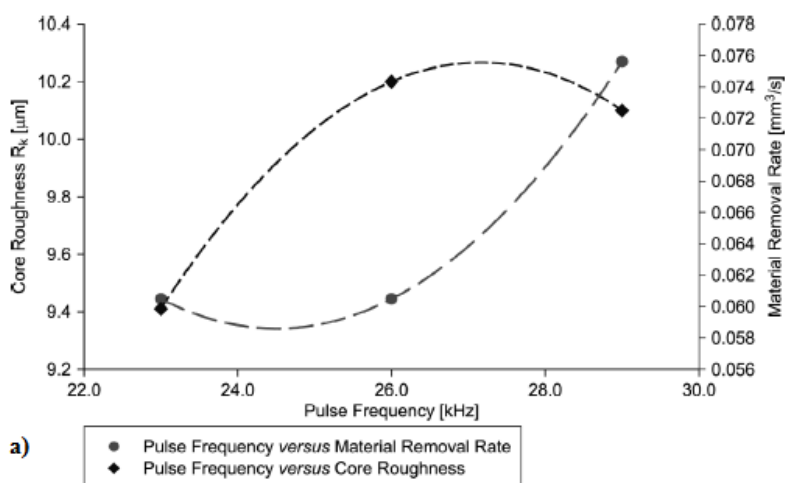
Laser může vydat pouze takový výkon, na jaký byl navržený. Nelze překročit maximální výkon, a proto lze měnit toto nastavení u laseru procentuálně od 0 do 100%. Většinou se hledá kompromis mezi výkonem a rychlostí, přičemž se doporučuje zvýšit rychlost než snížit výkon, ušetří se tak čas procesu.

Parametr rychlost určuje, jak rychle se bude pohybovat laserový paprsek po ploše. Systém řízení paprsku používá skenovací galvanometry s připevněnými zrcadly k pohybu laserového paprsku skrze čočky a po povrchu. Tento systém umožňuje při maximálních hodnotách rychlosti takový pohyb laseru po ploše, že povrch není schopen adekvátně absorbovat laserový paprsek, proto se maximální rychlosti ve většině případů téměř nepoužívají. Užitečná hodnota rychlosti velice záleží na obráběném materiálu a na výkonu laseru.

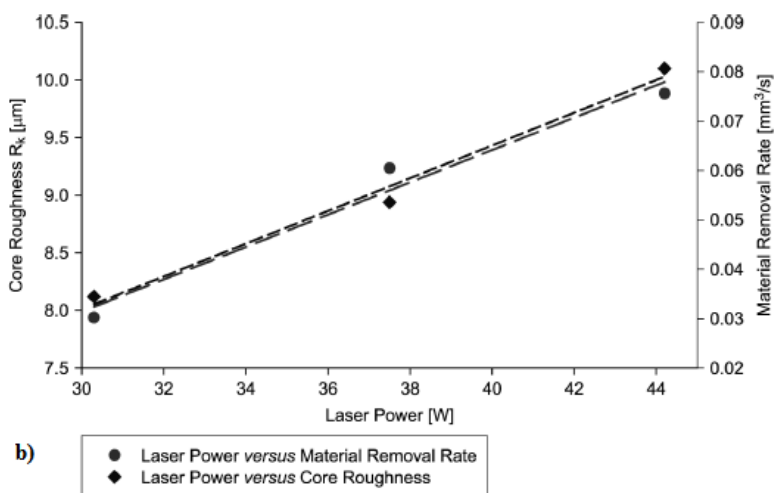
Vliv frekvence jednotlivých pulsů záleží, jaký typ laseru používáme, tedy buďto pulsový laser, nebo CW laser. Pokud ale mluvíme o mikroobrábění, používají se převážně lasery pulsové. Každý z těchto pulsů má velmi krátkou dobu trvání v hodnotách nanosekund a nižších. Jakmile snížíme frekvenci pulsů, energie v jednotlivých pulsech se zvýší. Frekvenci pulsů lze ale snižovat do určité hodnoty, neboť jak samotný laser, tak i jeho vnitřní části mají určitý práh poškození a je zajištěno, aby výstupní energie nepřekročila tento práh poškození. Lasery s pevnou délkou pulsu a vláknové lasery mají práh poškození okolo 1mj energie, to znamená, že i kdybychom teoreticky nastavili tak nízkou frekvenci, že by výstupní energie přesáhla práh

poškození, tak nedojde k navýšení energie. Pokud nastavíme frekvenci příliš vysoko, tak jednotlivé pulsy nebudou mít dostatek energie pro úběr materiálu.

Ve studii Bartolo et al. (2006) se zabývali, jaké parametry mají vliv na množství ablace a drsnosti povrchu. Experiment probíhal na laseru typu Nd:YAG s výkonem 100 W. Experiment probíhal na tvrzené oceli. Bylo zjištěno, že s rostoucím výkonem roste hloubka ablace na úkor horší drsnosti povrchu (graf 9). Dále bylo zjištěno, že s rostoucí frekvencí (graf 8) a rychlostí klesá drsnost povrchu.

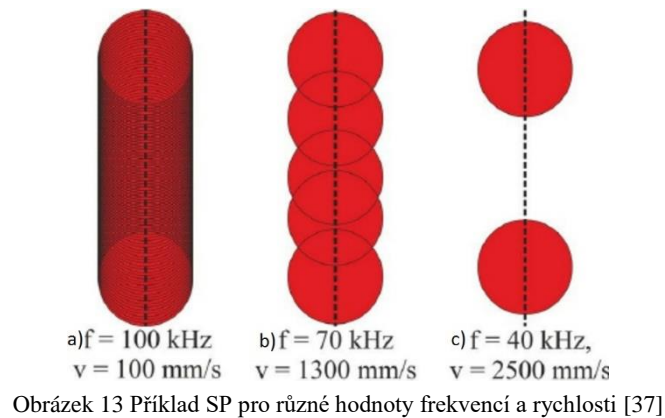


Graf 8 Vliv frekvence na drsnosti a úběru materiálu [29]



Graf 9 Vliv výkonu na drsnosti a úběru materiálu [29]

Vysoký vliv na kvalitu povrchu a množství ablace má tzv. stupeň překrytí (SP). SP je dán funkcí rychlosti pohybu paprsku po ploše (rychlost snímání) a množství dodaných paprsků za čas (frekvence). Je všeobecně známo, že čím je větší výkon, nižší frekvence a nižší rychlost, tím je dosaženo hlubšího značení na úkor horší kvality povrchu. Naopak nižší výkon, vyšší frekvence a vyšší rychlost má za následek lepší kvalitu povrchu na úkor malé hloubky značení. Jestliže se jedná o pulsový laser, tak se drážky vytváří překrytím jednotlivých pulsů (obrázek 13).



Pokud dojde ke snížení rychlosti nebo zvýšení frekvence, tak dojde ke zvýšení překrytí jednotlivých pulsů (obrázek 13). Naopak se zvyšující se rychlostí a snižující se frekvencí se snižuje i překrytí nebo dojde k případu, kdy se jednotlivé pulsy vůbec nepřekrývají (obrázek 13). Na obrázku 14 lze vidět rozdíl v kvalitě povrchu při různém stupni překrytí.



Obrázek 14 Kvalita značení při různém překrytí [38]

3 Vlastní návrh řešení

V této kapitole bakalářské práce bude popsán vlastní experiment, který byl proveden na laseru od firmy Lintech s pulzačním zdrojem typu G4 Pulsed Fiber Laser od firmy SPI lasers a programem SAMLight. Využití těchto laserů je převážně v oblasti popisování a gravírování ploch, nicméně tento experiment bude zaměřen na aplikaci laserového mikroobrábění pro úpravu povrchů 3D tištěných kovových součástí, které jsou známé svou vysokou drsností povrchu okolo $Ra 8$ a jejich požadavky na sekundární procesy pro zlepšení kvality povrchu. Samotné vyhodnocování bude probíhat na 3D mikroskopu IFM-G4 od firmy Alicona.

3.1 Specifikace používaného laseru

Používaný laser pracuje na principu pulzujícího vláknového laseru G4 typu Z, který se značí svou vysokou kvalitou paprsku a velmi malým ohniskovým průměrem paprsku okolo $0,032 \text{ mm}$, proto se velmi často používá pro obrábění malých ploch s vysokou přesností. Laser je ovládán softwarem SAMlight, který podporuje jak funkci 2D, tak i 3D. Pro naše potřeby bude stačit funkce 2D, protože bude zkoumána hodnota úběru na jeden cyklus, kdy se hloubka úběru pohybuje řádově v mikrometrech. Parametry používaného laseru jsou uvedeny níže v tabulce 1.

| Parametr | Hodnota | Jednotky |
|-------------------------|-------------|----------|
| Průměrný výstupní výkon | 50 | [W] |
| Špičkový výkon | 10 | [kW] |
| Maximální energie pulsu | 1,0 | [mJ] |
| Vlnová délka | 1059 – 1065 | [nm] |
| Délka pulsu | 6 – 500 | [ns] |
| M ² | 1,0 – 1,6 | [-] |
| Průměr paprsku | 32 | [μm] |

Tabulka 1 Specifikace laseru pro režim wfm0

3.2 Obráběný materiál

Jedná se o materiál EOS MaragingSteel MS1 (tabulka 2), jehož chemické složení odpovídá normě US třídy 18% Ni Maraging 300, EU 1.2709 a Německé X3NiCoMoTi 18-9-5. Jedná se o materiál dodávaný v práškové formě pro 3D tisk kovových součástí. Tento druh oceli je charakteristický svými dobrými mechanickými vlastnostmi a je snadno tepelně ovlivnitelný za použití tepelného procesu stárnutí, díky čemuž získá výbornou tvrdost a pevnost. Tento druh oceli je díky malému obsahu uhlíku snadno obrobitelný. Díky procesu stárnutí se může vytvrdit na tvrdost 55 HRC.

| Prvek | Hmotnostní poměr v % | | |
|-------|----------------------|--------|-------------|
| Fe | dobilancováno | Al | 0,05 – 0,15 |
| Ni | 17-19 | Cr, Cu | ≤ 0,5 |
| Co | 8,5 – 9,5 | C | ≤ 0,03 |
| Mo | 4,5 – 5,2 | Mn, Si | ≤ 0,1 |
| Ti | 0,6 – 0,8 | P, S | ≤ 0,01 |

Tabulka 2 Materiálové složení

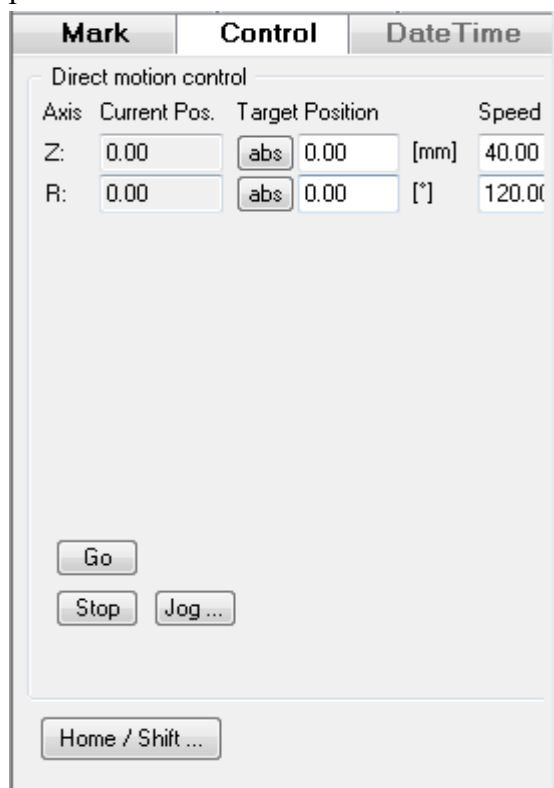
3.3 Návrh postupu řešení mikroobrábění

1. ustavit vzorek do přípravku
2. nastavení ohniskové vzdálenosti
3. vytvoření rastru v programu SAMLIGHT
4. nastavení parametrů v programu SAMLIGHT

Experiment byl proveden na dutém hranolu vyrobený metodou DMLS, na kterém se obrobily obdélníky 4x2 mm a následně byla změřena hloubka tohoto obdélníku na jeden cyklus, neboť pak lze dopočítat potřebný počet cyklů na určitou hloubku úběru. Jak již bylo zmiňováno v předchozích kapitolách, laserové mikroobrábění je bezkontaktní proces odebrání materiálu a z toho plynou nízké nároky na upnutí. Z toho se vycházelo při návrhu jednoduchého přípravku, kdy bylo dostačující, aby byl vzorek opřen ze dvou stran. Tento způsob upnutí byl ověřen při opakovaném vložení vzorku, kdy byly odchylky v posunu od původního vložení minimální. Další jednotlivé kroky budou probíhat v programu SAMLIGHT, kdy jejich postup bude naznačen v dalších podkapitolách.

3.3.1 Nastavení ohniskové vzdálenosti

Nastavení správné ohniskové vzdálenosti je nutnou součástí kvalitně obrobeného povrchu. Jiná ohnisková vzdálenost než ohnisková vzdálenost měřená od povrchu součásti se používá především u řezání či ohřátí součásti. V tomto případě je nejdůležitější nastavit ohniskovou



Obrázek 15 Najetí referenčního bodu

vzdálenost na povrch obráběné součásti pro dosažení potřebné kvality povrchu kvůli fokusovanému laserovému svazku.

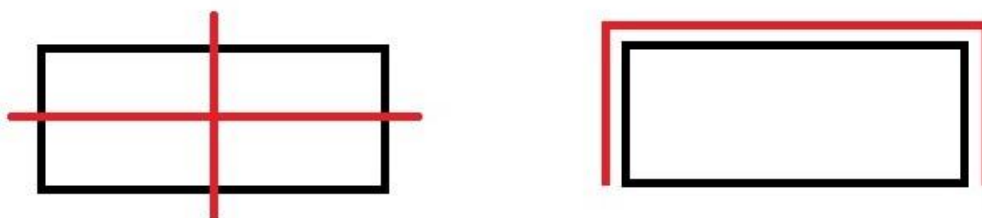
Při spuštění nezná laser svoji polohu, proto je nutné najet na referenční bod v kladném směru osy Z. Předtím, než najedeme na referenční bod, je třeba se ujistit, že pracovní prostor je čistý. Laserová hlava se pohybuje pouze ve směru Z, pohyb ve směru osy X a Y je řízen galvanometry se zrcadly. Pohyb do referenčního bodu se provede programem SAMLIGHT (obrázek 15). Nejdříve je potřeba najet do referenčního bodu, to se provede tlačítkem **Home/Shift**. Jakmile laser najede na referenční bod, zná laser svoji polohu vůči pracovní desce. Poté je třeba najet na požadovanou ohniskovou vzdálenost vůči vzorku. Do kolonky **Target position** v ose Z zadáme výšku vzorku a provedeme tlačítkem **Go**. Tím, že ohnisková vzdálenost dané čočky je konstantní,

v mém případě je to konkrétně 160mm, tak stačí do programu zadat vzdálenost obráběné plochy od pracovní desky a laserová hlava najede na požadovanou ohniskovou vzdálenost.

Pokud bychom chtěli obrábět do větší hloubky, je třeba použít funkci 3D, protože při větším počtu úběru dochází k posunutí ohniskové vzdálenosti, proto je třeba nastavit posuv laserové hlavy ve směru osy Z o hodnotu úběru materiálu na jeden cyklus. Nebo zde existuje druhá funkce, a to posuv v ose Z na jeden cyklus. Tuto funkci lze použít jenom u jednoduchých tvarů, kdy se s hloubkou nemění původní tvar plochy.

3.3.2 Vytvoření rastru

Při tvorbě rastru bylo vycházeno z toho, že hodnota úběru materiálu byla měřena na 3D optickém mikroskopu IFM-G4. Protože měření hloubky úběru materiálu pracuje na principu porovnávání obrobenej plochy od neobrobenej (referenční) plochy, bylo třeba laserem obrobít referenční drážku, díky které byla zajištěna pozice obou ploch, a mikroskop změřil deviaci obrobenej plochy od referenční plochy. Při prvním návrhu, jak je možno vidět na obrázku 16, byla umístěna referenční drážka do obráběné plochy pro lepší spojení ploch, ale jelikož se materiál u laseru odebrává způsobem ablace, to znamená, že část materiálu je natavena a část materiálu vysublimuje, tímto procesem byla referenční drážka znehodnocena. Proto se přišlo k druhému návrhu, kdy je drážka odsazena od obráběné plochy (viz obrázek 16). Tento způsob se ukázal jako korektní, nicméně, při prvním návrhu byla drážka umístěna příliš blízko k obráběné ploše a laserový paprsek tepelně ovlivnil i část plochy kolem drážky, nezbylo tak dostatečné množství původní plochy pro adekvátní spojení ploch. Proto se přistoupilo k většímu odsazení drážky od plochy.



Obrázek 16 Návrh tvaru rastru

3.3.3 Nastavení parametrů v programu SAMlight

Než se začne měnit nastavení parametrů u laseru, je třeba si uvědomit, jak jejich změna ovlivní interakci laseru s obráběným povrchem.

Jedna z unikátních vlastností vláknového laseru je tzv. technologie “pulzního ladění“, to umožňuje přesné ladění jednotlivých dodaných pulsů ve formě předdefinovaných průběhů vln. Jednotlivé průběhy vln jsou optimalizovány pro dosažení maximálního špičkového výkonu při určité frekvenci pulsu.

V tomto experimentu byl použit režim wfm0, který má maximální hodnotu energie pulsu E_{max} 1 mJ a délku pulsu 35 ns. Frekvence, při které dosáhne puls maximálního špičkového výkonu

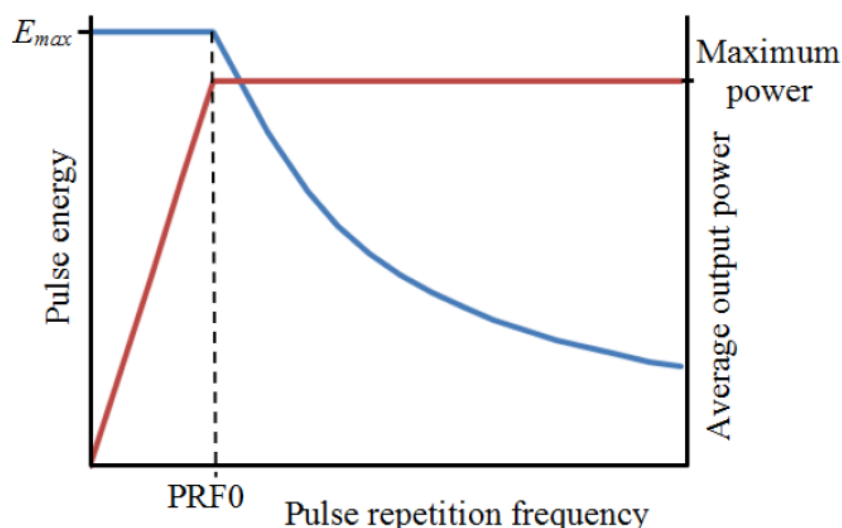
a maximální hodnoty energie pulsu, je 50 kHz. Tato hodnota frekvence se označuje jako PRF0 a je důležité si uvědomit, co se stane, jestliže se nastaví hodnota frekvence nižší či vyšší, než je PRF0. Graf 10 ukazuje vývoj energie pulsu a průměrného výkonu v závislosti na frekvenci. Jak můžeme vyčíst z grafu, jestliže se zvyšuje frekvence, tak průměrný výkon zůstane konstantní, nicméně dojde ke snížení energie pulsu podle rovnice:

$$E_{\text{pulsu}} = \frac{\text{průměrný výkon}}{\text{frekvence}} = [\text{J}]$$

Jestliže dojde ke snížení hodnoty frekvence pod PRF0, dojde ke snížení průměrného výkonu, zatímco energie pulsu zůstává konstantní, neboť laser má určitý práh poškození E_{max} . Na grafu 12 můžeme vidět průběh energie pulsu pro vybrané hodnoty. Protože je špičkový výkon funkcí energie pulsu a délky pulsu dle rovnice:

$$P_{\text{špičkový}} = \frac{\text{energie pulsu}}{\text{délka pulsu}} = [\text{W}]$$

zůstává i maximální špičkový výkon konstantní. Proto se hodnoty nastavení frekvence pod PRF0 též nazývají “funkční hodnoty frekvence“.




Graf 10 Průběh energie pulsu a průměrného výkonu v závislosti na frekvenci [39]

Dalším parametrem, který má značný vliv na kvalitu obrobeného povrchu, je stupeň překrytí (SP). SP vyjadřuje hodnotu překrytí jednotlivých pulsů pohybující se po předem definované cestě. Stupeň překrytí je funkcí rychlosti a frekvence a lze ji snadno spočítat podle vzorce:

$$SP = \left(1 - \frac{\text{rychlost snímání}}{\text{frekvence} * \text{průměr paprsku}} \right) * 100 = [\%]$$

V tabulce 4 můžeme vidět vypočítaný SP pro zvolené parametry v tomto experimentu. Tabulka 3 znázorňuje vybrané parametry pro tento experiment.

| Parametr | Hodnota (rozsah) | Jednotky |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Vzdálenost šraf | 0,05 | [mm] |
| Úhel natočení | 0 | [°] |
| Strategie skenování |  | [-] |
| Diametr laseru | 0,032 | [mm] |
| Výkon | 20 – 90 | [W] |
| Frekvence | 20 – 700 | [kHz] |
| Rychlost | 80 – 700 | [mm/s] |

Tabulka 3 Nastavení parametrů laseru

3.4 Experiment

Při tomto experimentu byly pomocí laseru vytvořeny kapsy o velikosti 4x2 mm za použití parametrů (viz tabulka 5) s konstantním výkonem 40W. Poté byly vybrány pomocí mikroskopu vizuálně nejvhodnější povrchy a u těchto povrchů byla následně změřena hodnota úběru. Nejdříve se zkoumala kvalita povrchu v závislosti na rychlosti snímání a frekvenci, tedy SP (tabulka 4), poté proběhla optimalizace vybraných vzorků v závislosti na změně výkonu. Při pozorování jednotlivých vzorků docházelo při určitých nastavení frekvencí k výrazné změně struktury, proto byl následující pokus rozdělen do 3 režimů nastavení frekvence s ohledem na dané změny ve struktuře povrchu.

| SP v % | | Rychlost snímání [mm/s] | | | | | | | |
|-----------------|-----|-------------------------|-------|-------|--------------|--------------|-------|--------------|--------------|
| | | 80 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 | 550 | 700 |
| Frekvence [kHz] | 20 | 87,50 | 84,38 | 76,56 | 68,75 | 53,13 | 37,50 | 14,06 | -9,38 |
| | 50 | 95,00 | 93,75 | 90,63 | 87,50 | 81,25 | 75,00 | 65,63 | 56,25 |
| | 80 | 96,88 | 96,09 | 94,14 | 92,19 | 88,28 | 84,38 | 78,52 | 72,66 |
| | 120 | 97,92 | 97,40 | 96,09 | 94,79 | 92,19 | 89,58 | 85,68 | 81,77 |
| | 250 | 99,00 | 98,75 | 98,13 | 97,50 | 96,25 | 95,00 | 93,13 | 91,25 |
| | 350 | 99,29 | 99,11 | 98,66 | 98,21 | 97,32 | 96,43 | 95,09 | 93,75 |
| | 500 | 99,50 | 99,38 | 99,06 | 98,75 | 98,13 | 97,50 | 96,56 | 95,63 |
| | 700 | 99,64 | 99,55 | 99,33 | 99,11 | 98,66 | 98,21 | 97,54 | 96,88 |

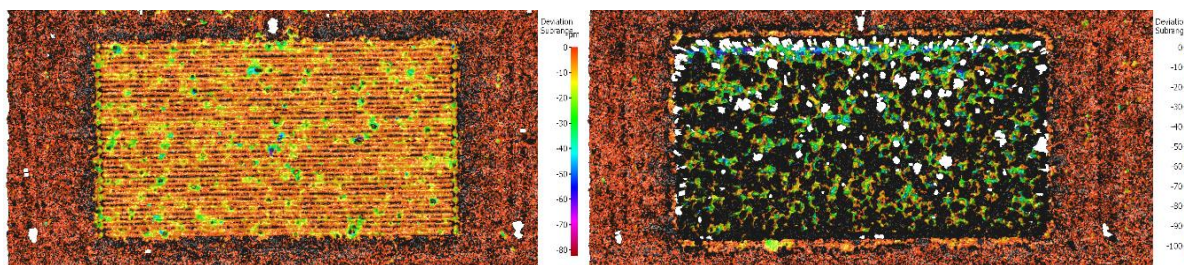
Tabulka 4 Stupeň překrytí

| Hloubka úběru v μm | | Rychlost snímání [mm/s] | | | | | | | |
|----------------------------------|-----|-------------------------|-----|-----|---------------|---------------|-----|---------------|---------------|
| | | 80 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 | 550 | 700 |
| Frekvence [kHz] | 20 | x | x | x | 2,1319 | 1,8762 | x | x | x |
| | 50 | x | x | x | x | x | x | 1,8584 | 1,7360 |
| | 80 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | 120 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | 250 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | 350 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | 500 | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | 700 | x | x | x | x | x | x | x | x |

Tabulka 5 Výběr vhodných parametrů

3.4.1 První režim

Všechny vizuálně nejvhodnější povrchy byly vytvořeny při nastavení frekvencí 20 – 50 kHz, tedy při použití tzv. “funkčních nastavení frekvencí“. Z naměřených vzorků šlo vypožorovat, že pokud se pohybujeme nad SP 80%, tak dochází k vytvoření horšího povrchu. Podobný jev vykazovaly povrchy zařazené do druhého režimu, i když s ne takovou intenzitou, a kde bude tento jev podrobněji vysvětlen v kapitole 3.4.2. Jakmile byla zvýšena rychlost, došlo ke snížení překrytí, kdy se SP pohyboval mezi 80 – 40 %, a tím i ke zlepšení kvality povrchu. Při vysokých rychlostech dochází k velmi malému překrytí nebo se jednotlivé pulsy vůbec nepřekrývají a při strukturování povrchu nemají drážky plynulý průběh, k němuž dochází u SP nižší než 30%. Nejlepší nastavení bylo tedy u SP pohybující se okolo 60%. To je v souladu se studií Bartolo et al. (2006). Na obrázku 17 lze vidět rozdíl ve struktuře povrchu mezi vhodným naměřeným povrchem a nejhorším naměřeným povrchem.



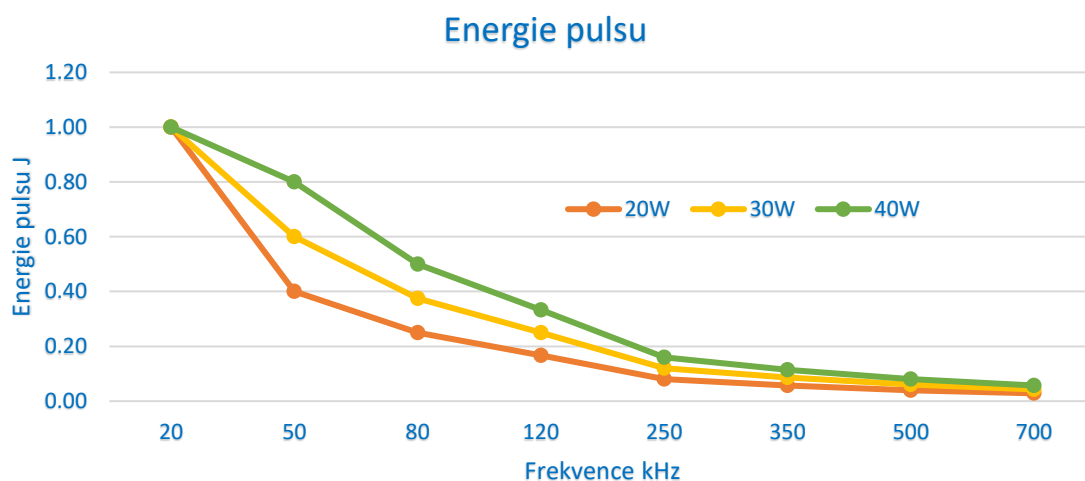
Obrázek 17 Kapsy při nastavení a) výkonu 40W, frekvence 20kHz a rychlosti snímání 200 mm/s b) výkonu 40W, frekvence 80kHz, rychlost snímání 200 mm/s

V tabulce 6 byly vybrány vzorky, u kterých byl vizuálně vyhodnocen nejlepší povrch, a tyto vzorky byly optimalizovány z hlediska výkonu. Nicméně bylo zjištěno, že u frekvence 50 kHz a 20 kHz a rychlosti 200 mm/s docházelo k nárůstu drsnosti s klesajícím výkonem, což odporuje

studii Bartolo et al. (2006), a u frekvence 20 kHz a 300 mm/s docházelo k malému zlepšení drsnosti. Důvodem, proč k tomu došlo, je ten, že na rozdíl od studie Bartolo et al. (2006) byl v tomto experimentu mikroobráběn velmi drsný povrch pohybující se okolo Ra 8. Z grafu 11 bylo možno vyčíst, že při frekvenci 50 kHz se snižujícím se průměrným výkonem dochází k poklesu energie pulsu, a tím i ke snížení špičkového výkonu. Jednoduše řečeno, nedojde k takovému zarovnání povrchu jako při pulsech s vyšší energií. Ani u jednoho nastavení však nedošlo k úplnému zarovnání povrchu. Indikací toho, že nedošlo k zarovnání povrchu, byl i velký rozsah naměřených drsností v jednom vzorku pohybující se okolo $\pm 2 \mu\text{m}$. Kvůli tomu, že nedocházelo k vyrovnaní povrchu na jeden cyklus, tak nelze předpokládat, že hodnota úběru u povrchu s drsností pohybující se okolo Ra 8 bude stejná jako u povrchu s nižší drsností. Proto bude potřeba provést další experiment a zjistit tak počet cyklů, kdy dojde k zarovnání povrchu a k ustálení drsnosti povrchu, a tedy k co nejpodobnějším podmínkám pro úběr materiálu. Nejlepší naměřená drsnost tedy byla při nastavení 50 kHz a 700 mm/s s hodnotou drsnosti Ra 4,3627 μm .

| Drsnost Ra v μm | | Výkon | | |
|----------------------------|-------------------------------|--------|--------|--------|
| | | 20W | 30W | 40W |
| Nastavení parametrů | 20 kHz/200 mm*s ⁻¹ | 5,2919 | 5,6057 | 4,9440 |
| | 20 kHz/300 mm*s ⁻¹ | 4,4234 | 4,6512 | 5,0973 |
| | 50 kHz/550 mm*s ⁻¹ | 5,4069 | 4,9103 | 4,3912 |
| | 50 kHz/700 mm*s ⁻¹ | 5,3802 | 4,4998 | 4,3627 |

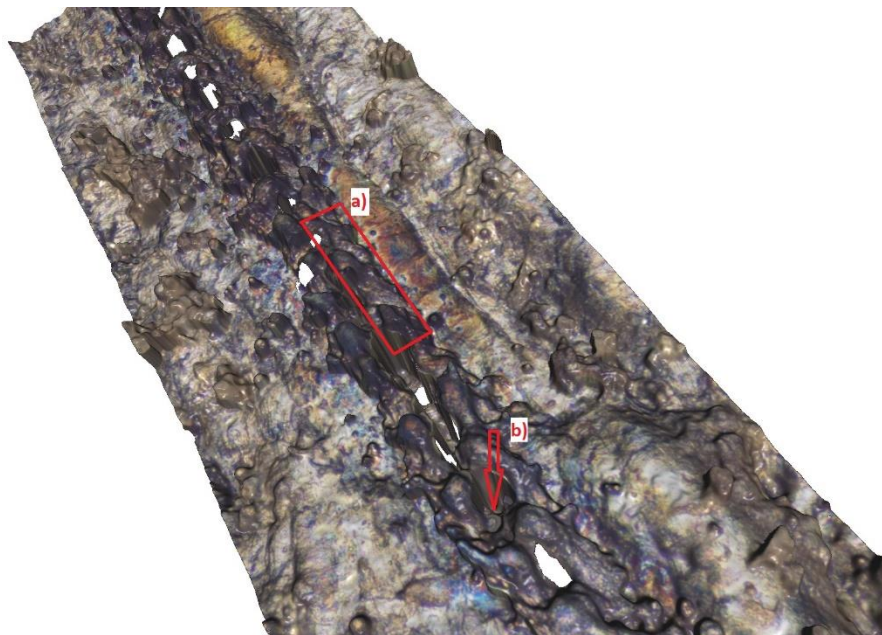
Tabulka 6 Optimalizování výkonu u vybraných vzorků



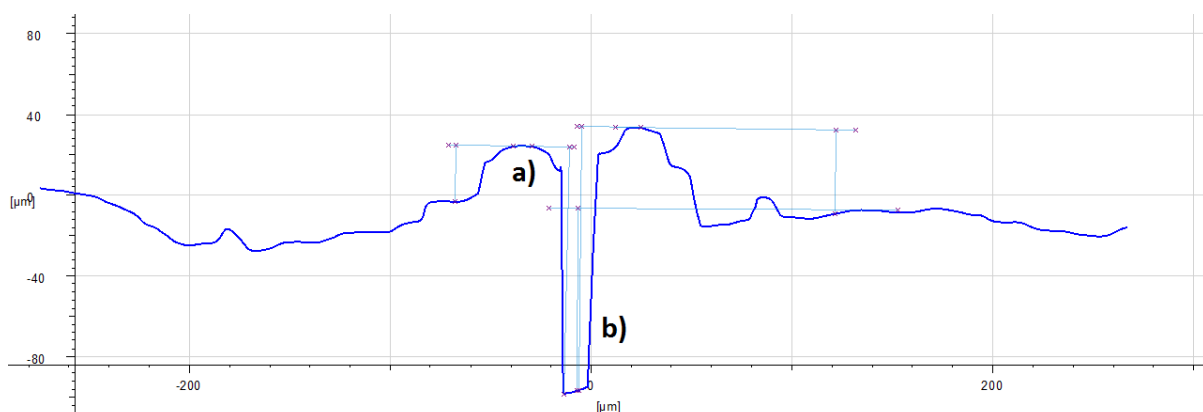
Graf 11 Závislost energie pulsu na frekvenci při výkonu 20,30,40 W

3.4.2 Druhý režim

Na obrázku 17 bylo možno pozorovat, že velká část povrchu se zbarvila do černa. Z toho plyne, že velká část plochy po obrobení leží nad referenční plochou. Navíc se povrch skládal z vrcholů a kráterů, a to vedlo ke zhoršení kvality povrchu. Aby bylo možno pochopit, proč dochází k navýšení povrchu nad referenční plochu a vytvoření daného povrchu, bylo třeba pomocí laseru vytvořit pouze jednu drážku (obrázek 18), neboť při nastavení drážkování 0,05 mikronů dochází k jejich vzájemnému ovlivňování. Nicméně jev, který nastal, lze pozorovat i na obrázku 17 u poslední drážky, kterou vytvořil laser a u které nedošlo k takovému vzájemnému ovlivnění mezi drážkami. Na obrázku 18 můžeme vidět, co se stalo s povrchem při nastavení parametrů výkonu 40W, frekvence 80 kHz a rychlosti 200 mm/s.



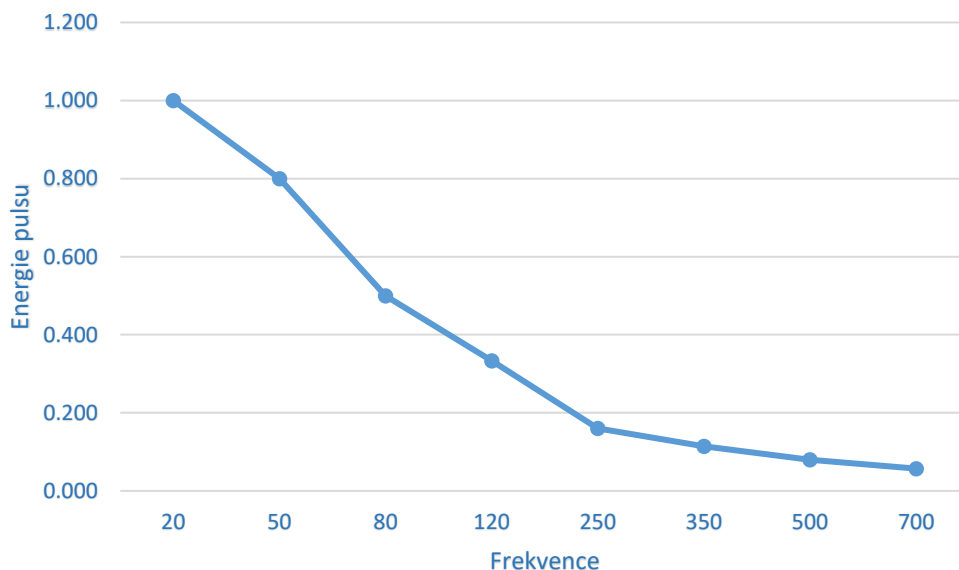
Obrázek 18 Povrch po přejetí laseru při nastavení 40W, 80kHz a 200 mm/s a) vyvržený materiál po hranici drážky b) vytvořený kráter



Obrázek 19 Řez drážkou a) vytvořená hráz z nataveného materiálu b) vytvořený kráter

Na obrázku 18 a 19 můžeme vidět, že došlo k vytvoření hlubokých kráterů pohybujících se okolo hloubky 100 mikronů a k vyvržení materiálu po hranicích drážky. Tento materiál má jiné chemické složení a fyzické vlastnosti než původní, a to vede ke znehodnocení povrchu. Tento

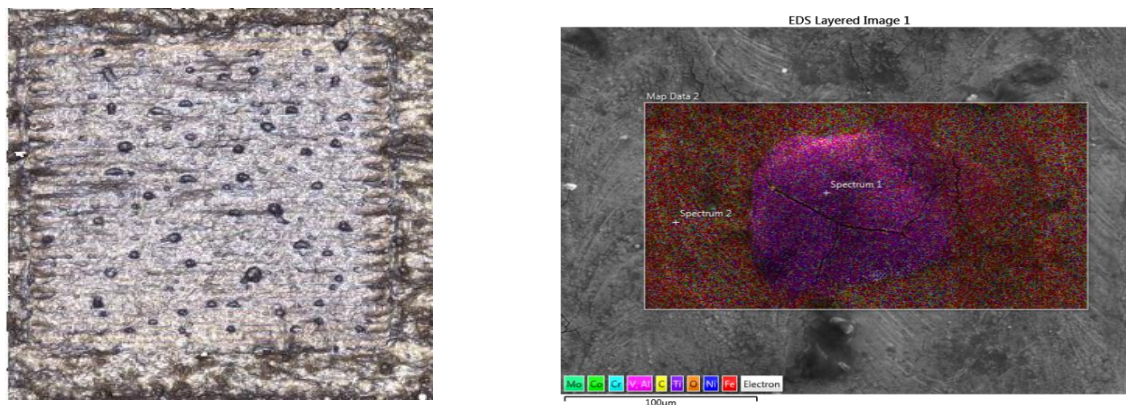
jev způsobují dva parametry, a to energie pulsu a stupeň překrytí. Z grafu 12 můžeme vyčíst, že při frekvenci 80 kHz má laser energii pulsu 0,5 mJ a 92 % překrytí (kapitola 3.3.3), to znamená, že laser dopadne na stejné místo s vysokou energií až 17x, což způsobí nárůst teploty, a tím dochází k nárůstu absorpce. Další vliv na absorpci materiálu má hloubka kráteru. Se zvyšující se hloubkou kráteru dojde k zachycení většího množství světla, a tím i k nárůstu absorpce a k většímu úběru materiálu. Tento proces, kdy dojde k masivnímu vyvržení materiálu, se nazývá explosive boiling. Podobný jev vznikl mezi hodnotami frekvence 80-300 kHz, samozřejmě s různou intenzitou.



Graf 12 Energie pulsu při 80% výkonu v závislosti na frekvenci

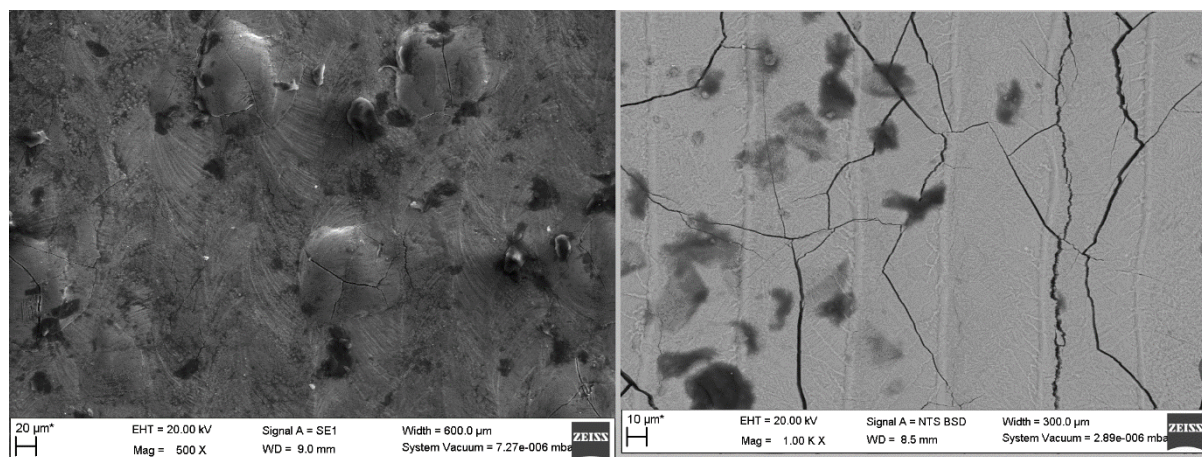
3.4.3 Třetí režim

V třetím režimu měli jednotlivé pulsy malou energii pulsu pohybující se v setinách mJ, viz graf 12. Proto při nastavení vysoké frekvence nedocházelo jako v předchozích případech k takovému množství nataveného a vysublimovaného materiálu, ale docházelo spíše k vyhlazení povrchu. Při tomto režimu měl povrch nejlepší drsnost, nicméně nastaly 3 problémy při povrchové úpravě pro tento režim. První byl ten, že došlo pouze k vyhlazení povrchu, a tím pádem nedošlo k vyrovnání povrchu, a na povrchu zůstaly hrboly a prohlubně. Tento problém nebyl tak zásadní, aby došlo k vyřazení těchto parametrů z následné optimalizace. Nicméně, druhý problém nastal při obrobení povrchu za pomoci vysokých frekvencí, kdy se začaly objevovat černé kapky (obrázek 20a). Byl předpoklad, že se jedná o kapky složené převážně z titanu. Poté, co byly vzorky poslány na analýzu, se tento předpoklad potvrdil (obrázek 20b).



Obrázek 20 a) titanové kapky na povrchu po obrobení b) analýza kapky

Třetí problém byl, že například při nastavení vysoké frekvence 700 kHz a rychlosti 300 mm/s dopadl paprsek, i když s malou energetickou hodnotou, na stejné místo asi 80x. Kvůli tomu došlo k popraskání jak vzniklých kapek z titanu, tak i k popraskání povrchu, převážně v místě okolo kapek.



Obrázek 21 Vyhodnocení povrchu pomocí elektronového mikroskopu

3.5 Hodnocení výsledků experimentu

Z hodnot získaných experimentem bylo možno vidět, že nejlepší naměřené hodnoty byly získány za použití nastavení frekvencí v prvním režimu (tabulka 5), kde se hodnota úběru pohybovala okolo 2 μm . Při optimalizaci výkonu vzhledem k drsnosti (tabulka 6) nedocházelo k výraznému vývoji při změně parametrů výkonu a naměřené parametry neměly vypovídající hodnotu. To se dalo předpokládat, neboť při hodnotě úběru okolo 2 μm nemohlo dojít k zarovnání drsného povrchu pohybujícího se okolo drsnosti R_a 8 μm . To znamená, že kvalita povrchu se měnila spíše v závislosti na drsnosti původní plochy než na změně výkonu. Nejlepší naměřená hodnota drsnosti R_a byla přitom 4,3627 μm . Taková drsnost získaná po povrchové úpravě je ale nedostačující. Nelze ovšem s určitostí říct, že tato povrchová úprava pro materiál MS1 pomocí laserového mikroobrábění je v praxi nepoužitelná, neboť tato drsnost není konečná a lze předpokládat, že zlepšení drsnosti povrchu může být dosaženo i optimalizací dalších parametrů laseru. Pro úplnost bude ještě potřeba provést další experimenty, ve kterých bude nejprve zarovnan povrch a až následně dojde k optimalizaci parametrů.

Druhý a třetí režim byl z následné optimalizace vyloučen kvůli špatné kvalitě povrchu po obrobení. Avšak možné řešení pro zlepšení kvality povrchu u druhého režimu by mohlo být snížení výkonu, které by mělo za následek snížení energie pulsu, a tím i následné zlepšení kvality povrchu. Nicméně abychom věděli, o jakou hodnotu změnit výkon, je potřeba zjistit práh ablace. Tento práh ablace se mění s frekvencí, a proto je třeba dopočítat jeho hodnotu při změně frekvence, aby nenastala situace jako v druhém režimu. Navíc by zjištěná hodnota prahu ablace mohla být využita i při prvním režimu, kdy při nastavení jejích hodnot by mohlo dojít k vyhlazení povrchu obrobené plochy. Nicméně, toto je pouze předpoklad, jehož pravdivost nelze bez skutečného experimentu ověřit.

4 Závěr

Tato práce byla zaměřena na optimalizaci procesních parametrů laserového mikroobrábění při použití nástrojové oceli třídy 19 s označením MS1. Cílem této optimalizace bylo dosažení co nejlepší kvality povrchu při aplikaci laserového mikroobrábění a zjištění závislosti výsledné kvality povrchu na nastavení jednotlivých parametrů.

Tato práce popisuje využití laserů v průmyslu a funkci jednotlivých nastavitelných parametrů, které mají vliv na výslednou kvalitu povrchu. Vliv zkoumaných procesních parametrů byl ověřen experimentem, ve kterém byla vytvořena matice o 64 zkušebních vzorcích a následně byla podrobně zkoumána kvalita jejich povrchu. Nejlepší dosažená drsnost povrchu byla naměřena při nastavení frekvence 50 kHz a rychlosti snímání 700 mm/s.

Při laserovém mikroobrábění provedeném v rámci popisovaného experimentu docházelo ke dvěma nežádoucím procesům, které ovlivnily měření hloubky provedené porovnáváním ploch před a po úběru. První nežádoucí proces nastal při pohybu laserového paprsku po okrajích obráběných vzorků. Vlivem tepelného ovlivnění neobrobené plochy od paprsku laseru docházelo k vyvýšení původní plochy po obrobení. Druhý nežádoucí proces způsoboval vytvoření kráteru na začátku každé drážky. Při laserovém mikroobrábění docházelo k dopadu paprsku na povrch materiálu a až teprve poté se začal tento paprsek pohybovat ve směru předem definované drážky. Prodleva mezi působícím paprskem a jeho pohybem po drážce způsobila, že laserový paprsek působil nějakou dobu na jednom místě, a tím docházelo k vytváření hlubších kráterů na začátcích drážek a ke znehodnocování příslušného povrchu. Tento nežádoucí proces měl výraznější vliv na přesnost měření než proces první.

Po provedení experimentu byly nalezeny kombinace parametrů, při kterých bylo dosaženo významné zlepšení v kvalitě povrchu, i když nalezení zcela vyhovující kombinace by vzhledem k povaze experimentu vyžadovalo více zkušebních vzorků a větší rozsah zkoumaných parametrů použitého laseru. Jedná se především o parametry, jako jsou délka pulsu, stupeň překrytí jednotlivých drážek, ohnisková vzdálenost atd. Výzkum právě těchto parametrů bude předmětem následujícího výzkumu.

Použitá literatura

- [1] „Historie laserů“, *LASCAM systems*, 25-čvc-2015. [Online]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/historie/>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [2] „Laser“, *Wikipedie*. 04-říj-2017. [Online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [3] „Laser - Princip laseru“. [Online]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/princip.html>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [4] „Laser – WikiSkripta“. [Online]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Laser>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [5] „Využití laseru v průmyslu – minulost a současnost > LAO - lasery a optika“. [Online]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/vyuziti-laseru-v-prumyslu--minulost-a-soucasnost-313>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [6] „Informace o laserovém gravírování – LASCAM systems“. [Online]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/laserove-gravirovani/>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [7] „Laserové gravírování - MEPAC CZ s.r.o Laserové navařování, CNC obrábění, leštění, servis a oprava forem, broušení, frézování, laserové kalení“. [Online]. Dostupné z: <http://www.mepac.cz/cz/lasery---sluzby/laserove-gravirovani3/2/laserove-gravirovani>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [8] „Značení a gravírování laserem“. [Online]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/znaceni-a-gravirovani-laserem>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [9] „LASER A JEHO VYUŽITÍ“. [Online]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k31>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [10] „svarovani“. [Online]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/svarovani>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [11] „Lasery pro vrtání“, *LASCAM systems*, 11-lis-2016. [Online]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/lasery-pro-vrtani/>. [Viděno: 01-úno-2018].

- [12] <http://www.webovy-servis.cz>, „Lintech s.r.o." [Online]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-vrtani>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [13] „Laserové řezání - základní rozdělení", *LASCAM systems*, 06-bře-2017. [Online]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/zakladni-rozdeleni-laseroveho-rezani/>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [14] „Princip fungování laserového řezání - MEPAC CZ s.r.o Laserové navařování, CNC obrábění, leštění, servis a oprava forem, broušení, frézování, laserové kalení". [Online]. Dostupné z: <http://www.mepac.cz/cz/lasery---sluzby/laserove-rezani-planzet/2/princip-fungovani-laseroveho-rezani>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [15] „DMLS Finishing | Services". [Online]. Dostupné z: <http://gpiprototype.com/services/dmls-finishing.html>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [16] „DMLS Metal Technology for 3D Printing". [Online]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/materials/dmls-material/>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [17] „Support structures for 3D printing with metal - an easier approach", *RP Platform*, 28-čvc-2017. [Online]. Dostupné z: <https://rpplatform.com/2017/07/28/support-structures-3d-printing-metal/>. [Viděno: 01-úno-2018]
- [18] „How Does a Sandblaster Work? | Sandblasters, sand blasting equipments". [Online]. Dostupné z: <http://www.sandblasting-sandblasters.com/faq-sand-blasting-equipments/how-does-a-sandblaster-work.html>. [Viděno: 01-úno-2018]
- [19] „How to Smooth 3D-Printed Parts", *Machine Design*, 29-dub-2014. [Online]. Dostupné z: <http://www.machinedesign.com/3d-printing/how-smooth-3d-printed-parts>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [20] „When To CNC Machine Your 3D Printed Parts | Stratasys Direct". [Online]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/technologies/cnc-machining/cnc-machining-3d-printed-parts>. [Viděno: 01-úno-2018].

- [21] „Laser Characteristics | Environmental Health and Safety". [Online]. Dostupné z: <https://ehs.research.uiowa.edu/laser-characteristics>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [22] „Section 2.9: Reflection and Absorption of Laser Beams". [Online]. Dostupné z: <http://www.aml.engineering.columbia.edu/ntm/level2/ch02/html/12c02s09.html>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [23] D. Bergström, „The absorption of laser light by rough metal surfaces", *DIVA*, 2008. [Online]. Dostupné z: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-26182> [Viděno: 01-úno-2018].
- [24] R. Le Harzic *et al.*, „Pulse width and energy influence on laser micromachining of metals in a range of 100fs to 5ps", *Applied Surface Science*, roč. 249, č. 1, s. 322–331, srp. 2005.
- [25] O. H. Inc Dirk Müller and Frank Gäbler, Coherent, „Shorter Pulse Widths Improve Micromachining". [Online]. Dostupné z: <https://www.photonics.com/a54123>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [26] „Heat Affected Zone". [Online]. Dostupné z: <http://www.cmxr.com/Education/HAZ> [Viděno: 01-úno-2018].
- [27] J. Yang, S. Sun, M. Brandt, a W. Yan, „Experimental investigation and 3D finite element prediction of the heat affected zone during laser assisted machining of Ti6Al4V alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, roč. 210, č. 15, s. 2215–2222, lis. 2010.
- [28] „Getting Started Using a Fiber Laser". [Online]. Dostupné z: <https://www.jimani-inc.com/blog/bid/207189/Getting-Started-Using-a-Fiber-Laser>. [Viděno: 01-úno-2018].
- [29] P. Bartolo, J. Vasco, B. Silva, a C. Galo, „Laser micromachining for mould manufacturing: I. The influence of operating parameters", *Assembly Automation*, roč. 26, s. 227–234, čvc. 2006.
- [30] Seriál na téma lasery - laserové svařování. [Online]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134> [Viděno: 01-úno-2018].
- [31] PPlaser [Online]. Dostupné z: <http://www.pplaser.cz/sluzby/laserove-gravirovani/> [Viděno: 01-úno-2018].

- [32] SlidePlayer [Online]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3764859/> [Viděno: 01-úno-2018].
- [33] Seriál na téma lasery - laserové řezání [Online]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129> [Viděno: 01-úno-2018].
- [34] All3DP [Online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-metal-3d-printer-metal-3d-printing/> [Viděno: 01-úno-2018].
- [35] F. Calignano, „Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting“, *Materials & Design*, roč. 64, s. 203–213, pro. 2014.
- [36] Engineering.com Dostupné z:
<https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/15202/7-Issues-to-Look-Out-for-in-Metal-3D-Printing.aspx> [Viděno: 01-úno-2018].
- [37] „Impact of processing parameters on the LTCC channels geometry*“, *ResearchGate*. [Online]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/290213343_Impact_of_processing_parameters_on_the_LTCC_channels_geometry/figures?lo=1. [Viděno: 01-úno-2018].
- [38] SPI lasers [Online]. Dostupné z: <https://www.spilasers.com/application-marking/marketing-with-a-pulsed-fiber-laser/> [Viděno: 01-úno-2018].
- [39] G4 Pulsed Fiber Laser V8 Interface Manual [Online]. Dostupné z:
https://www.spilasers.com/wp-content/uploads/2015/12/G4_V8_control_interface_manual_SM-S00360_A.pdf [Viděno: 01-úno-2018].

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Materiáloví list oceli MS1

Příloha č. 2 – Specifikace laserového zdroje

Příloha č. 3 – Specifikace mikroskopu



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 $\times 10^{-3}$ inch, R_z 0.78 $\times 10^{-3}$ inch |
| MS1 Performance (40 μm) | R_a 5 μm ; R_z 28 μm R_a 0.19 $\times 10^{-3}$ inch, R_z 1.10 $\times 10^{-3}$ inch |
| MS1 Speed (50 μm) | R_a 9 μm ; R_z 50 μm R_a 0.47 $\times 10^{-3}$ inch, R_z 2.36 $\times 10^{-3}$ inch |
| - after shot-peening | R_a 4 – 6.5 μm ; R_z 20 – 50 μm R_a 0.16 – 0.26 $\times 10^{-3}$ inch R_z 0.78 – 1.97 $\times 10^{-3}$ inch |
| - after polishing | R_z up to < 0.5 μm R_z up to < 0.02 $\times 10^{-3}$ inch (can be very finely polished) |



Material data sheet

| Volume rate [5] | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| - Parameter set MS1_Surface 1.0 / default job MS1_020_default.job (20 µm layer thickness) | 1.6 mm ³ /s (5.8 cm ³ /h) 0.35 in ³ /h |
| - Parameter set MS1_Performance 2.0 / default job MS1_040_default.job (40 µm layer thickness) | 3 mm ³ /s (10.8 cm ³ /h) 0.66 in ³ /h |
| - Parameter set MS1_Performance 1.0 / for M 280 / 400 W (40 µm layer thickness) | 4.2 mm ³ /s (15.1 cm ³ /h) 0.92 in ³ /h |
| - Parameter set MS1_Speed 1.0 / for M 280 / 400 W (50 µm layer thickness) | 5.5 mm ³ /s (19.8 cm ³ /h) 1.21 in ³ /h |

- [1] Based on users' experience of dimensional accuracy for typical geometries, as built. Part accuracy is subject to appropriate data preparation and post-processing, in accordance with EOS training.
- [2] Ageing temperature 490 °C (914 °F), 6 hours, air cooling
- [3] Mechanical stability is dependent on geometry (wall height etc.) and application
- [4] Due to the layerwise building, the surface structure depends strongly on the orientation of the surface, for example sloping and curved surfaces exhibit a stair-step effect. The values also depend on the measurement method used. The values quoted here given an indication of what can be expected for horizontal (up-facing) or vertical surfaces.
- [5] Volume rate is a measure of build speed during laser exposure of hatched areas. The total build speed depends on the average volume rate, the recoating time (related to the number of layers) and other geometry- and machine setting-related factors.



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 ± 0.8 W/m°C typ. 104 ± 6 Btu in/(h ft² °F) | typ. 20 ± 1 W/m°C typ. 139 ± 7 Btu in/(h ft² °F) |
| Specific heat capacity | typ. 450 ± 20 J/kg°C typ. 0.108 ± 0.005 Btu/(lb °F) | typ. 450 ± 20 J/kg°C typ. 0.108 ± 0.005 Btu/(lb °F) |
| Maximum operating temperature | | approx. 400 °C approx. 750 °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.

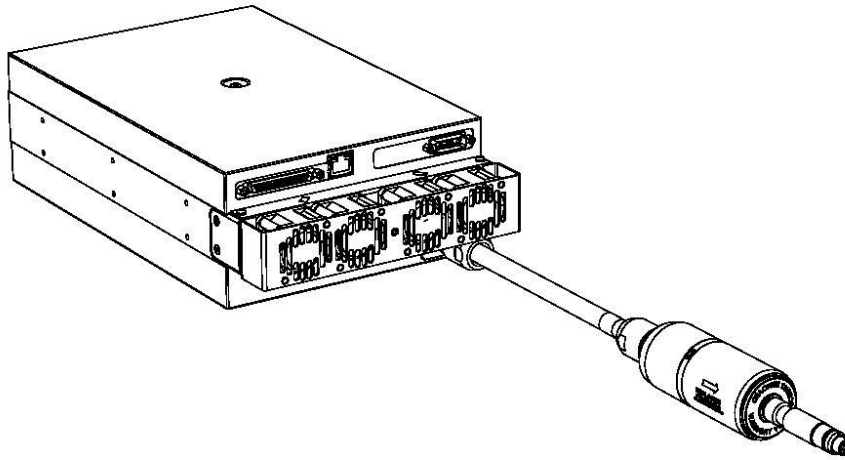
EOS®, EOSINT® and DMLS® are registered trademarks of EOS GmbH.

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

G4 Pulsed Fibre Laser Specification

Applicable Part numbers

| Part number | Options |
|--------------------|------------------------------------|
| SP-050P-A-EP-Z-B-N | 3m optical cable, no pilot laser |
| SP-050P-A-EP-Z-B-Y | 3m optical cable, with pilot laser |



System Integration Details

| parameter | unit | range |
|--------------------------------------|------|----------------|
| Laser Module type | | A1 |
| Laser Module Dimensions | mm | 347 x 201 x 95 |
| Beam delivery type | | ILLK |
| Control interface version | | V8 |
| Power Supply Voltage | V DC | 24 ± 2 |
| Logic Power Supply Requirement | W | 50 |
| Laser Diode Power Supply Requirement | W | 250 |
| Operating temperature range | °C | 0 to +40 |
| Storage temperature range | °C | -10 to +60 |

Related Documents

| Document number | Description |
|-----------------|------------------------------------------------------------------|
| SM-500227 | OEM Safety and System Integration Manual: Module Types A1 and A2 |
| SM-500360 | V8 Control Interface Manual |
| SM-500220 | G4 Accessories Datasheet |

Laser Characteristics

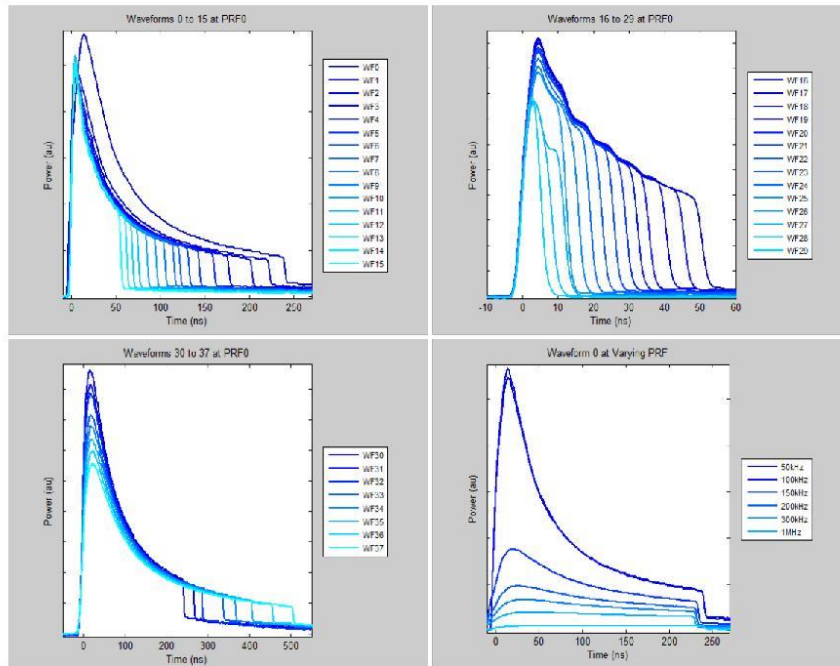
All parameters specified at PRF0 for wfm 0, rated power, over operating temperature range unless otherwise stated.


| parameter | unit | range |
|---------------------------------------------------------|---------|-------------|
| Average Output Power | W | > 50 |
| Output Power Stability | % p-p | < 5 |
| Maximum Pulse Energy | mJ | > 1.0 |
| Maximum Peak Power | kW | > 10 |
| Pulse Width Range (see pulse waveform table) | ns | 6 – 500 |
| Pulse-to-Pulse Energy Stability (at stable temperature) | % rms | < 3 |
| CW Mode | | Yes |
| Central Emission Wavelength | nm | 1059 – 1065 |
| Emission Bandwidth | nm | < 12 |
| Fraction of power within $\lambda_0 \pm 20$ nm | % | > 80 |
| M^2 | | 1.0 – 1.6 |
| Full-angle divergence | mrad | 80 – 120 |
| Circularity | % | > 90 |
| Beam pointing error | mrad | < 10 |
| Beam offset | mm | < 0.1 |
| Astigmatism | $1/z_R$ | < 0.3 |
| Degree of polarization | % | < 20 |

Pulse Waveform Table

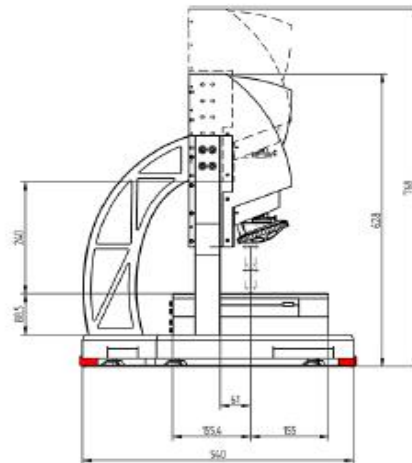
| wfm | PRF0 (kHz) | PRFmax (kHz) | Max. pulse energy, E_{max} (mJ) | Typ. FWHM pulse width at E_{max} (ns) | Pulse width at 10% (ns) | Typ. peak power at E_{max} (kW) |
|-----|------------|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 50 | 1000 | 1.00 | 35 | 250 | 12 |
| 1 | 63 | 1000 | 0.79 | 34 | 230 | 12 |
| 2 | 68 | 1000 | 0.74 | 32 | 210 | 12 |
| 3 | 73 | 1000 | 0.68 | 29 | 183 | 12 |
| 4 | 76 | 1000 | 0.66 | 27 | 167 | 12 |
| 5 | 81 | 1000 | 0.62 | 26 | 150 | 12 |
| 6 | 86 | 1000 | 0.58 | 23 | 137 | 13 |
| 7 | 91 | 1000 | 0.55 | 23 | 127 | 13 |
| 8 | 93 | 1000 | 0.54 | 23 | 120 | 13 |
| 9 | 98 | 1000 | 0.51 | 23 | 110 | 13 |
| 10 | 103 | 1000 | 0.49 | 23 | 100 | 12 |
| 11 | 108 | 1000 | 0.46 | 23 | 90 | 12 |
| 12 | 113 | 1000 | 0.44 | 23 | 80 | 13 |
| 13 | 121 | 1000 | 0.41 | 23 | 73 | 12 |
| 14 | 129 | 1000 | 0.39 | 23 | 67 | 12 |
| 15 | 136 | 1000 | 0.37 | 23 | 60 | 12 |
| 16 | 144 | 1000 | 0.35 | 23 | 55 | 12 |
| 17 | 154 | 1000 | 0.32 | 23 | 50 | 12 |
| 18 | 164 | 1000 | 0.30 | 23 | 45 | 12 |
| 19 | 176 | 1000 | 0.28 | 23 | 40 | 12 |
| 20 | 192 | 1000 | 0.26 | 23 | 37 | 12 |
| 21 | 209 | 1000 | 0.24 | 23 | 33 | 11 |
| 22 | 227 | 1000 | 0.22 | 23 | 30 | 11 |
| 23 | 252 | 1000 | 0.20 | 21 | 27 | 12 |
| 24 | 290 | 1000 | 0.17 | 19 | 23 | 12 |
| 25 | 353 | 1000 | 0.14 | 16 | 20 | 11 |
| 26 | 429 | 1000 | 0.12 | 12 | 17 | 11 |
| 27 | 542 | 1000 | 0.09 | 12 | 13 | 9 |
| 28 | 720 | 1000 | 0.07 | 9 | 10 | 9 |

| | | | | | | |
|----|------|------|------|----|-----|----|
| 29 | 1000 | 1000 | 0.05 | 6 | 7 | 9 |
| 30 | 50 | 940 | 1.00 | 63 | 270 | 10 |
| 31 | 50 | 940 | 1.00 | 67 | 290 | 10 |
| 32 | 50 | 835 | 1.00 | 70 | 320 | 9 |
| 33 | 50 | 625 | 1.00 | 76 | 350 | 8 |
| 34 | 50 | 625 | 1.00 | 79 | 380 | 8 |
| 35 | 50 | 625 | 1.00 | 84 | 420 | 7 |
| 36 | 50 | 520 | 1.00 | 89 | 460 | 7 |
| 37 | 50 | 520 | 1.00 | 94 | 500 | 6 |



| | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | INVISIBLE LASER RADIATION AVOID EYE OR SKIN EXPOSURE TO DIRECT OR SCATTERED RADIATION CLASS 4 LASER PRODUCT <small>Wavelength: 1040 - 1143nm Pulsed output - Max average power ~ 20W Max pulse energy ~ 20mJ Repetition rate: 1-10000Hz Pulse duration: 1ns - 500ns CW Output power ~ 100W</small> | <small>Wavelength: 500 - 670nm Output power ~ 5mW CW</small> VISIBLE LASER RADIATION AVOID DIRECT EYE EXPOSURE CLASS 3R LASER PRODUCT <small>ECEN 60825-1:2007</small> | COMPONENT FOR INCORPORATION <small>This product is intended as a component for incorporation in a laser product and as such retail its usual safety features for laser safety and to comply with IEC/EN60325-1 and 21CFR1540.10</small> |
| | <small>© 2014 SPI Lasers UK Ltd. Commercial In Confidence</small> | | |

Příloha č. 3



Version G4 f and following:

| Objectives | | 2.5x | 5x | 10x | 20x | 50x | 100x |
|-------------------------------------|-----------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Lateral sampling distance | μm | 3.52 | 1.76 | 0.88 | 0.44 | 0.18 | 0.09 |
| Min. lateral resolution | μm | 58.71 | 23.48 | 11.74 | 8.8 | 6.4 | 4.4 |
| Max. lateral resolution | μm | 6.92 | 3.49 | 1.75 | 0.88 | 0.64 | 0.44 |
| Min.Repeatability (vert.) | μm | 0.8 | 0.12 | 0.03 | 0.015 | 0.008 | 0.003 |
| Max.scan height (approx.) | mm | 8 | 22 | 16 | 12 | 9 | 3.2 |
| Best vertical resolution* | nm | 2300 | 410 | 100 | 50 | 20 | 10 |
| Vertical dynamic | | 3400 | 52000 | 160000 | 250000 | 430000 | 380000 |
| Working distance | mm | 8.8 | 23.5 | 17.5 | 13.0 | 10.1 | 3.5 |
| Field of view X | μm | 5716 | 2858 | 1429 | 715 | 286 | 143 |
| Field of view Y | μm | 4351 | 2175 | 1088 | 544 | 218 | 109 |
| Max. Extended field of view | mm ² | 10000 | 10000 | 10000 | 4500 | 700 | 150 |
| Max. uni-directional scan extension | mm | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Limits of Resolution and Application

| Objective | | 2.5x | 5x | 10x | 20x | 50x | 100x |
|-------------------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|------|------|------|
| min. measurable height | nm | 2300 | 410 | 100 | 50 | 20 | 10 |
| max. measurable height (approx.) | mm | 8 | 22 | 16 | 12 | 9 | 3.2 |
| Step height accuracy (at 1mm height step) | % | | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| max. measurable area | mm ² | 10000 | 10000 | 10000 | 4500 | 700 | 150 |
| max. measurable profile length | mm | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| min. repeatability | nm | 800 | 120 | 30 | 15 | 8 | 3 |
| min. measurable roughness (Ra)* | nm | 7000 | 1200 | 300 | 150 | 60 | 30 |
| min. measurable roughness (Sa)* | nm | 3500 | 600 | 150 | 75 | 30 | 15 |
| min. measurable radius | μm | 20 | 10 | 8 | 5 | 2 | 1 |
| min. measurable vertical angle | ° | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |