

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**EFEKTIVNÍ MIKROOBRÁBĚNÍ LASEREM S VYUŽITÍM
BURST-MÓDU**

EFFICIENT LASER MICROMACHINING USING BURST-MODE

AUTOR:	Matěj Hála
STUDIJNÍ PROGRAM:	Výroba a ekonomika ve strojírenství
VEDOUCÍ PRÁCE:	Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
KONZULTANT:	Ing. Tomáš Primus

PRAHA 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hála** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **491752**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Efektivní mikroobrábění laserem s využitím burst-módu

Název bakalářské práce anglicky:

Efficient laser micromachining using burst-mode

Pokyny pro vypracování:

1. Základy laserové technologie
Základní části laseru
Fyzikální princip laseru
2. Vlastnosti a parametry laserového paprsku
3. Interakce paprsku laseru s materiálem
4. Burst-mód
Popsání režimu generace pulsů v burst-módu
Využití burst-módu pro laserové mikroobrábění
5. Návrh experimentu pro porovnání konvenčního laserového mikroobrábění a přístupu s využitím burst-módu
6. Realizace a vyhodnocení experimentu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

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

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

Platnost zadání bakalářské práce: _____

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze literaturu a informační zdroje v přiloženém seznamu.

Nemám žádný závažný důvod pro použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Dne:.....

Podpis:.....

Anotace

Jméno autora:	Matěj Hála
Název práce:	Efektivní mikroobrábění laserem s využitím burst-módu
Rozsah práce:	76 stránek, 41 obrázků, 12 tabulek
Akademický rok:	2021/2022
Univerzita:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Tomáš Primus
Klíčová slova:	laser, mikroobrábění, burst mód, ablace, slinutý karbid
Anotace:	<p>Cílem bakalářské práce je porovnání efektivnosti mikroobrábění s využitím burst-módu s mikroobráběním, při němž je použit prostý pulzní režim laseru. Jako experimentální materiál byla použita vyměnitelná břitová destička ze slinutého karbidu od výrobce Tungaloy. Pro obrobení břitové destičky bylo použito zařízení MASTER1 s pulzním laserem s femtosekundovými pulzy a burst módem. K vyhodnocení výsledků byl použit mikroskop Alicona G5, kterým byla změřena hloubka obroběných ploch a textura povrchu. Bylo zjištěno, že využití burst-módu pro mikroobrábění slinutého karbidu je efektivnější než použití běžného jedno-pulzního režimu jen při určitých hodnotách fluence.</p>

Annotation

Author's name: Matěj Hála

Subject: Efficient laser micromachining using burst-mode

Range of work: 76 p., 41 fig., tab. 12

Academic year: 2021/2022

University: CTU – Faculty of Mechanical Engineering

Supervisor: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

Consultant: Ing. Tomáš Primus

Key words: laser, micromachining, burst-mode, ablation, sintered carbide

Annotation: The aim of the bachelor thesis is to compare the efficiency of burst-mode micromachining with micromachining using a simple pulsed laser mode. Experimental material was used a replaceable cutting plate from sintered carbide produced by Tungaloy. MASTER1 with femtosecond pulsed laser and burst mode was used for machining the replaceable cutting plate. A Alicona G5 microscope was used to measure the depth of machined areas and surface texture It was found that the use of burst mode for micromachining of sintered carbide is more efficient than the use of conventional single-pulse mode only at certain fluence values.

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Tomáši Primusovi za odborné konzultace, pomoc při realizaci a vyhodnocení experimentu. Dále bych také chtěl rád poděkovat svým rodičům a bratrovi za jejich podporu a trpělivost během mého studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
1 Úvod	10
2 Cíle práce	11
3 Teoretická část	12
3.1 Základy laserové technologie	12
3.1.1 Laserové záření	12
3.1.2 Základní části laseru.....	12
3.1.3 Fyzikální princip laseru	14
3.1.4 Vznik laserového paprsku v optickém rezonátoru.....	17
3.2 Vlastnosti laserového paprsku	19
3.3 Parametry laserového paprsku	22
3.3.1 Společné parametry laseru v pulzním a v kontinuálním režimu.....	22
3.3.2 Parametry laserového paprsku v pulzním režimu.....	24
3.4 Klasifikace laserů podle pracovního režimu.....	26
3.4.1 Kontinuální pracovní režim laseru	26
3.4.2 Pulzní pracovní režim laseru	27
3.4.3 Ultra-krátký pulzní pracovní režim.....	27
3.5 Interakce laserového paprsku s materiály.....	28
3.5.1 Absorpce laserového záření materiálem.....	28
3.5.2 Ablace.....	28
3.6 Burst mód	30
3.6.1 Metody generace burstů	31
3.6.2 Laserová ablace při použití dvou pulzů v burstu	34
3.6.3 Laserová ablace při použití tří pulzů v burstu	35
3.6.4 Laserová ablace při použití více pulzů v burstu	35
3.7 Laserové mikroobrábění a gravírování.....	38
3.7.1 Použití burst módu v laserovém mikroobrábění	39
4 Praktická část	40
4.1 Návrh experimentu	40
4.1.1 Experimentální zařízení.....	40
4.1.2 Vyhodnocovací zařízení	42
4.2 Testovaný materiál	43

4.3	Nastavení experimentu	44
4.4	Realizace experimentu	47
4.5	Měření hloubky a průměrné výšky obrobených oblastí (Sa).....	48
4.6	Vyhodnocení experimentu.....	50
4.7	Shrnutí výsledků experimentu	56
5	Závěr.....	60
6	Reference	61
7	Seznam obrázků a tabulek	70
	Příloha 1.....	73

Seznam použitých zkratek a symbolů

a	Délka strany obrobeneho čtverce	[mm]
\vec{B}	Vektor magnetické indukce	[T]
BPP	Beam parameter product	[$mm \cdot mrad$]
c	Rychlost světla ve vakuu	[m/s]
CO_2	Oxid uhličitý	[$-$]
D	Průměr laserového paprsku	[mm]
D_s	Průměr světelného paprsku	[mm]
E	Energie	[J]
E_1	Energie základního stavu	[J]
E_2	Energie excitovaného stavu	[J]
ΔE	Rozdíl energie excitovaného stavu a základního stavu	[J]
\vec{E}	Vektor elektrické indukce	[V/m]
E_p	Energie v pulzu	[J]
F	Fluence	[J/cm^2]
f	Frekvence	[Hz]
f_{rep}	Opakovací frekvence jednotlivých pulzů	[Hz]
f_o	Ohnisková vzdálenost	[mm]
f_b	frekvence jednotlivých burstů	[Hz]
f_p	opakovací frekvence pulzů uvnitř burstu	[Hz]
H	Průměrná hloubka obrobeneho čtverce	[mm]
h	Planckova konstanta	[$J \cdot s$]
Δl	Rozdíl optických drah obou pulzů mez interferometru	[m]
m	Počet interferometrů	[$-$]
N_m	Počet atomů v metastabilní hladině	[$-$]
N_n	Počet atomů v základní hladině	[$-$]
n	Počet pulzů v burstu	[$-$]
P_{avg}	Průměrný výkon	[W]

P_{peak}	Vrcholový výkon	[W]
S_x	Překryv jednotlivých pulzů	[%]
S_a	Průměrná výška měřené oblasti	[μm]
Δt	Perioda	[s]
Δt_{1-2}	Zpoždění mezi dvěma pulzy	[s]
Δt_b	Perioda jednotlivých burstů	[s]
Δt_p	Perioda jednotlivých pulzů uvnitř burstu	[s]
U	Rychlost úběru materiálu	[mm^3/min]
v	Skenovací rychlost	[mm/s]
w_0	Poloměr laserového paprsku v ohnisku	[mm]
θ	Polovina úhlu divergence	[$mrad$]
σ	Čas mikroobrábění jednoho čtverce	[min]
π	Ludolfovo číslo	[–]
λ	Vlnová délka	[m]
τ	Délka pulzu	[s]

1 Úvod

Laser patří mezi nekonvenční technologie obrábění. Laserový paprsek je univerzální bezkontaktní nástroj, kterým lze obrábět velkou škálu materiálů, a to i ty, které jsou těžko obrobitelné konvenčními metodami (karbidy, sklo, diamant a další), jelikož pro laser nejsou důležité mechanické vlastnosti obráběného materiálu, ale naopak jsou pro něj důležité jeho fyzikální vlastnosti. Díky tomu je možno laserem nahradit v některých případech konvenční metody obrábění. Laserová technologie se využívá u odstraňování povlaků čištění, kalení, řezání, 3D tisku, vrtání, svařování a také u mikroobrábění.

Laserové mikroobrábění je v dnešní době čím dál více rozšířenější. Jeho využití je od technických oborů, optického průmyslu, letectví, šperkařství, až po medicínu, kde se využívá hlavně u výrobků, u nichž je kladen vysoký důraz na kvalitu, přesnost a rychlost procesu. U laserového mikroobrábění se v dnešní době používají hlavně pulzní lasery. Pro zvýšení produktivity celého procesu laserového mikroobrábění se začaly vyvíjet femtosekundové lasery s výstupním výkonem přesahující 100 W. Takovéto lasery se však neukázaly jako vhodné pro mikroobrábění, jelikož generují pulzy s energií, která přesahuje ablační práh o více než dva řády. Tím pádem při mikroobrábění dochází k vysoké akumulaci tepla a ta vede k celkovému snížení kvality procesu. Tento problém řeší tzv. burst mód, poměrně nová metoda generace laserových pulzů, kterým se tato bakalářská práce zabývá.

2 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je navržení experimentu a následné porovnání rychlostí úběru a dosažených drsností povrchu slinutého karbidu mikroobráběním s využitím burst módu oproti mikroobrábění při němž je použit jedno-pulzního režimu laseru. Výsledky této práce bude možné následně použít při efektivním laserovém mikroobrábění slinutých karbidů.

Dalšími cíli této bakalářské práce je teoreticky popsat laserovou technologii od základních částí laseru, vznik laserového záření, jeho vlastnosti, parametry, pracovní režimy, interakci laserového paprsku s materiálem, laserovou ablací až po samotný burst mód, laserové mikroobrábění a gravírování.

Znalosti z teoretické části byly poté využity v praktické části při návrhu a vyhodnocení experimentu, kde v první části bylo na vyměnitelné břitové destičce ze slinutého karbidu s označením K10 obrobena třicet čtverců s různým nastavením výstupních výkonů laseru a různým počtem pulzů v burstu. V druhé části byly změřeny hloubky a textury povrchů obrobených ploch. V poslední části proběhlo vyhodnocení rychlosti úběru materiálu a výsledné kvality povrchu.

3 Teoretická část

V teoretické části této bakalářské práce byla zpracována problematika týkající se oblasti laserové technologie, pracovními režimy laseru, parametry laserového paprsku, interakcí laserového paprsku s materiály, laserovou ablací. Důležitou kapitolou teoretické části byl pak samotný burst mód, laserové mikroobrábění a gravírování.

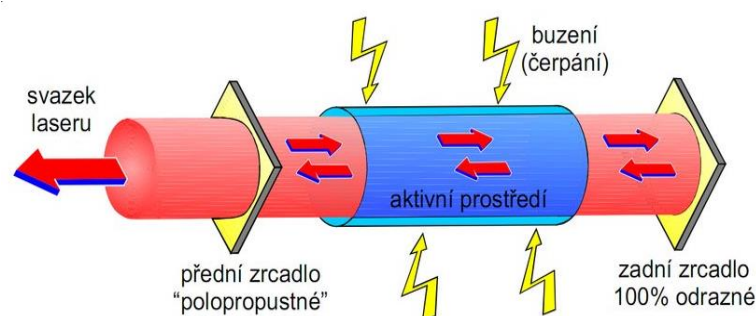
3.1 Základy laserové technologie

3.1.1 Laserové záření

Laser je zkratka anglického slovního spojení *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* [1], což lze přeložit jako: zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Laserové záření je tedy zdroj elektromagnetického záření, které má specifické vlastnosti: koherentnost, monochromaticnost a malou divergenci (rozbíhavost). [1] [2]

3.1.2 Základní části laseru

Hlavní částí každého laseru je optický rezonátor viz Obr. 1, jehož součástí je aktivní prostředí, budící zařízení a optické čočky, další nepostradatelnou částí, která se nachází v optickém rezonátoru je poté chladicí zařízení. [3] [4] [11]



Obr. 1 Základní části optického rezonátoru [3]

Optický rezonátor

Optický rezonátor je optický systém, který umožňuje zformovat a zesílit záření. Konstrukce optického rezonátoru má vliv na intenzitu záření, koherenci, pravidelnost, prostorové a spektrální charakteristiky. Optický rezonátor se skládá nejméně ze dvou

zrcadel, jenž jedno je polopropustné a druhé 100% odrazivé. Tato dvě zrcadla jsou rovnoběžná a mají společnou osu. Fotony, které se šíří jiným než rovnoběžným směrem s osou zrcadel, optický rezonátor po chvíli opustí a v rezonátoru zůstávají jen fotony, jež se šíří rovnoběžně s osou zrcadel, tyto fotony poté mohou být zesíleny. [3] [4] [11]

Aktivní prostředí

Aktivní prostředí je pevná látka, popř. kapalina nebo plyn, která obsahuje atomy (molekuly), jež mohou být pomocí buzení (čerpání) přivedeny ze základního stavu s nižší energií do stavu excitovaného (vybuzeného) stavu s vyšší energií, ze kterého je možno emitovat záření. Právě v této části dochází ke stimulované emisi. Látka, z níž je aktivní prostředí, musí být průhledná a schopná odvádět teplo, které vzniká při záření. Pokud je pracovní látkou plyn, využívá se například směs helia a neonu či oxidu uhličitého. V případě pevné látky je prostředí tvořeno krystalem například rubínem a při užití kapaliny je prostředí tvořeno roztoky organických barviv. [2] [3] [11]

Budící zařízení

Budící zařízení dodává do aktivního prostředí energii, která je zapotřebí pro započítí jevu stimulované emise, díky které laser generuje laserové záření. Způsob buzení je dán látkou tvořící aktivní prostředí. Plynové lasery jsou buzeny elektrickým výbojem, střídavým nebo stejnosměrným proudem, ale lze také použít fotodisociaci nebo rychlou expanzi plynu. Pevnolátkové lasery se zase nejčastěji budí pomocí výbojek nebo zářením jiného laseru například polovodičovým laserem. [3] [4] [11]

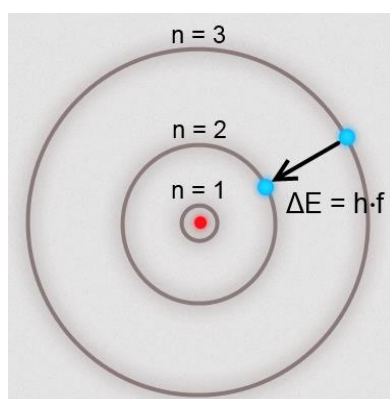
Chladící zařízení

Aktivní prostředí je buzeno pomocí energie z budícího zařízení, tato energie jen z malé části přemění v laserové záření, např. v případě krystalových pevnolátkových laserů jen z 15 %. Zbytek energie dodané budícím zařízením se přemění na energii ve formě tepla, které může poškodit optický rezonátor nebo negativně ovlivnit laserový paprsek, proto aby se zabránilo těmto negativním vlivům se používá chladící zařízení. U laserů používaných na zpracování materiálů se převážně používá chlazení vodou. Chladící okruh má dvě větve, vnitřní a vnější. Vnitřní větev obvykle využívá deionizovanou vodu

a ve vnější je voda z vodovodní sítě, nebo ze zásobníku s čerpadlem. V dnešní době výrobci poskytují také speciální chladicí systému, kde ve vnitřním okruhu je jako médium vzduch. [3] [4] [11]

3.1.3 Fyzikální princip laseru

Princip funkce laseru je založen na základě kvantové fyziky. Kde se pro lepší znázornění vychází z planetárního modelu atomu Nielse Bohra viz Obr. 2. Ten říká, že se elektrony pohybují kolem jádra atomu v určitých drahách, kde každá dráha má přesně určenou energii, tzv. energetická hladina. *Na tyto dráhy působí elektrostatické síly, přičemž dráhy, které jsou od jádra vzdálenější mají vyšší energii než dráhy, jejichž vzdálenost od jádra je menší [4].* Atom se za normálních podmínek nachází ve stavu termodynamické rovnováhy, tj. setrvává ve stavu s nejnižší energií (základním stavu). [4][5][6][24]



Obr. 2 Bohrov model atomu [24]

Elektrony mohou přecházet z jedné energetické hladiny do druhé, tento jev však neprobíhá plynule, ale ve skocích, jelikož jednotlivé energetické hladiny, mají přesně definovanou energii a tato energie je kvantovaná (nabývá pouze diskrétních hodnot viz Obr. 2). Pokud elektron přechází z energeticky nižší hladiny na vyšší vstřebává kvantum energie. Tento jev se nazývá absorpce. Naopak když elektron přechází na energeticky nižší hladinu, musí energii vyzářit tzv. emitovat. Tento jev se nazývá spontánní, nebo stimulované emise. [4] [5] [6] [24]

Absorpce

Pokud se tedy atom nachází v základním stavu E_1 , může dojít k absorpci energie ve formě záření viz Obr. 3, dle rovnice:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = h \cdot f \quad (1)$$

kde:

E je energie [J]

h je Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

c je rychlost světla ve vakuu $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

λ je vlnová délka [m]

f je frekvence [Hz].

Při absorpci se elektron dostává na energeticky vyšší hladinu do tzv. excitovaného stavu E_2 . Pro zachování zákona energie tedy platí rovnice (2). V excitovaném stavu však elektron setrvá pouze omezenou dobu, protože je tento stav termodynamicky nestabilní. [6][7][23]

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h \cdot f \quad (2)$$

kde:

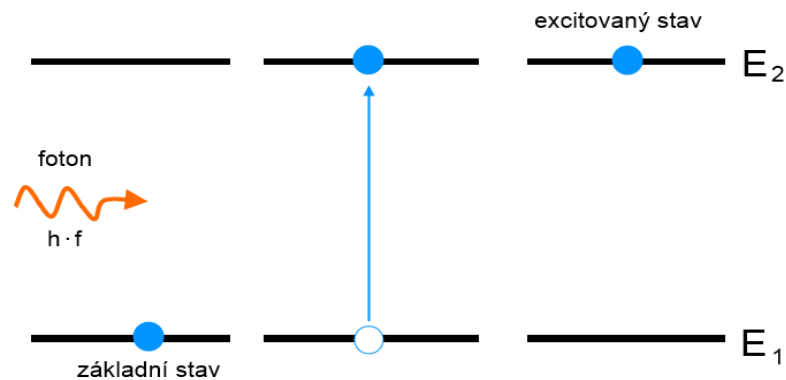
ΔE je rozdíl energie excitovaného stavu a základního stavu [J]

E_2 energie excitovaného stavu [J]

E_1 energie základního stavu [J]

h je Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

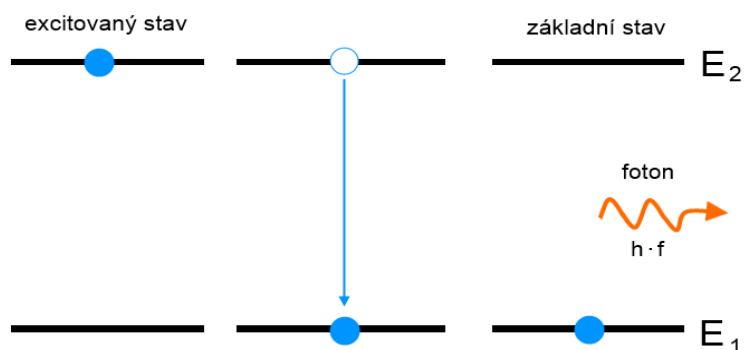
f je frekvence [Hz].



Obr. 3 Schéma průběhu absorpce [23]

Spontánní emise

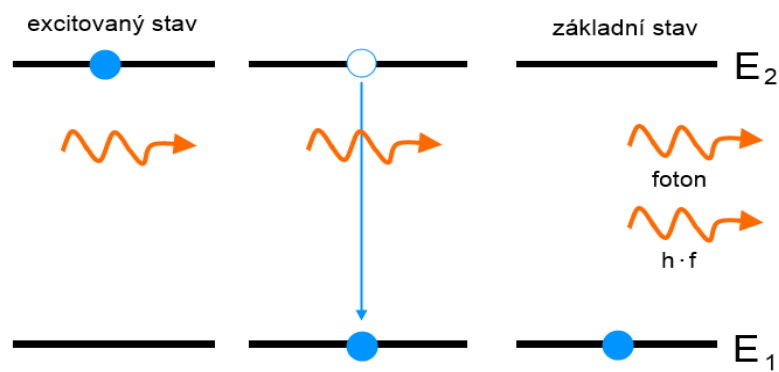
Jakmile uplyne doba, po kterou elektron může setrvat v excitovaném stavu E_2 , tak se elektron samovolně (spontánně), vrací do základního stavu E_1 viz Obr. 4. Při přechodu elektron musí vyžářit energii ve formě fotonu, proto aby došlo k zachování energetické rovnováhy. Jednotlivé fotony se vyzařují nekoordinovaně s různou fází, amplitudou i vlnovou délkou. Vznikající elektromagnetické záření je poté nekoherentní, nemonochromatické a s malou intenzitou. [6] [7] [8] [11] [23]



Obr. 4 Schéma průběhu spontánní emise [23]

Stimulovaná emise

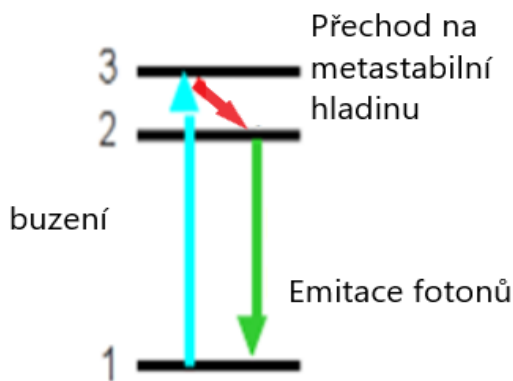
Laser, jak již bylo zmíněno, je založen na principu stimulované emise. Stimulovaná emise se liší od spontánní emise tím, že neprobíhá samovolně. Je-li elektron v excitovaném stavu E_2 , tak jeho sestup na základní energetickou hladinu E_1 iniciuje foton, který je pohlcen elektronem v excitovaném stavu. Elektron poté místo toho, aby vystoupil do vyšší energetické hladiny, sestoupí zpět na základní energetickou hladinu a zároveň vyžáří dva fotony, které mají stejný směr šíření, stejnou vlnovou délku a stejnou fází, jako foton, který byl atomem pohlcen viz Obr. 5. [6] [7] [8] [11] [23] [27]



Obr. 5 Schéma průběhu stimulované emise [23]

3.1.4 Vznik laserového paprsku v optickém rezonátoru

Pro vysvětlení vzniku laserového paprsku v optickém rezonátoru je použit tří hladinový systém viz Obr. 6. Atomy v optickém rezonátoru jsou vybuzeny pomocí budícího zařízení do excitovaného stavu (energetická hladina 3). V excitovaném stavu setrvávají atomy velice krátkou dobu, poté se atomy přesouvají do metastabilní hladiny (energetická hladina 2), kde jsou atomy schopny setrávat mnohem delší dobu a kde je tak větší pravděpodobnost interakce atomu s dalším fotonem pro vznik stimulované emise. [2] [7] [11] [21] [25] [26] [27]



Obr. 6 Schéma tří hladinového systému [22]

Pro to, aby došlo ke generaci laserového záření je ještě zapotřebí, aby nastal stav označovaný, jako inverze populace. Inverze populace je stav, který nastává nachází-li se na metastabilní hladině více atomů než na hladině základní (3).

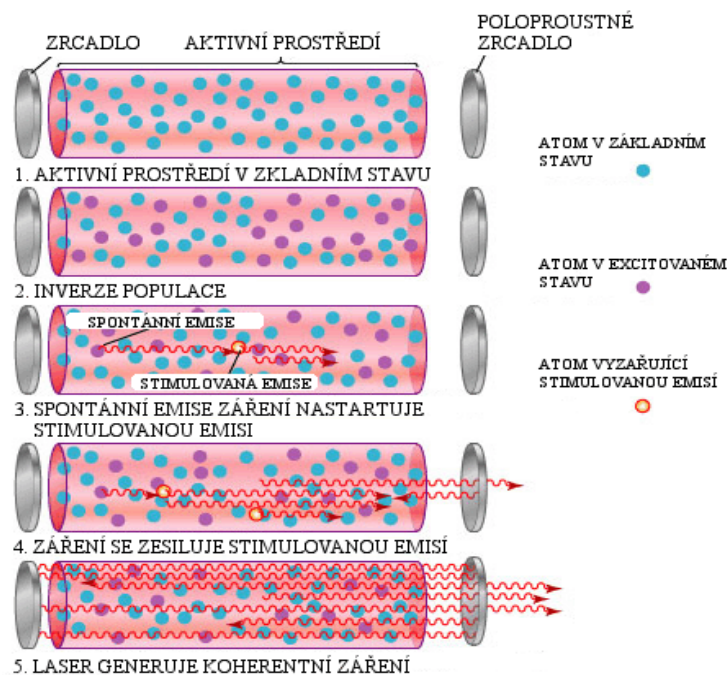
$$\frac{N_m}{N_n} > 1 \quad (3)$$

Kde:

N_m je počet atomů v metastabilní hladině [–]

N_n je počet atomů v základní hladině [–]

Poté co nastane inverze populace, dochází při další excitaci k lavinovitému efektu, kdy se začnou vyzářovat fotony a atomy se vrací zpět do základního energetického stavu. Vyzářené fotony poté působí jako stimulující pro ostatní atomy na metastabilní hladině, které zase vyzáří fotony, jež se přidají ke stimulujícím fotonům. Tímto principem dochází k zesilování světla, avšak nedochází k vytvoření laserového záření, jelikož takto vyzářené fotony mají různé směry šíření. Proto, aby vyzářené fotony měly shodný směr se používá optický rezonátor (kap.3.1.2) ve kterém fotony, jenž mají jiný směr šíření, než je rovnoběžný s osou optického rezonátoru zanikají. [2] [3] [4] [7] [11] [21] [27]



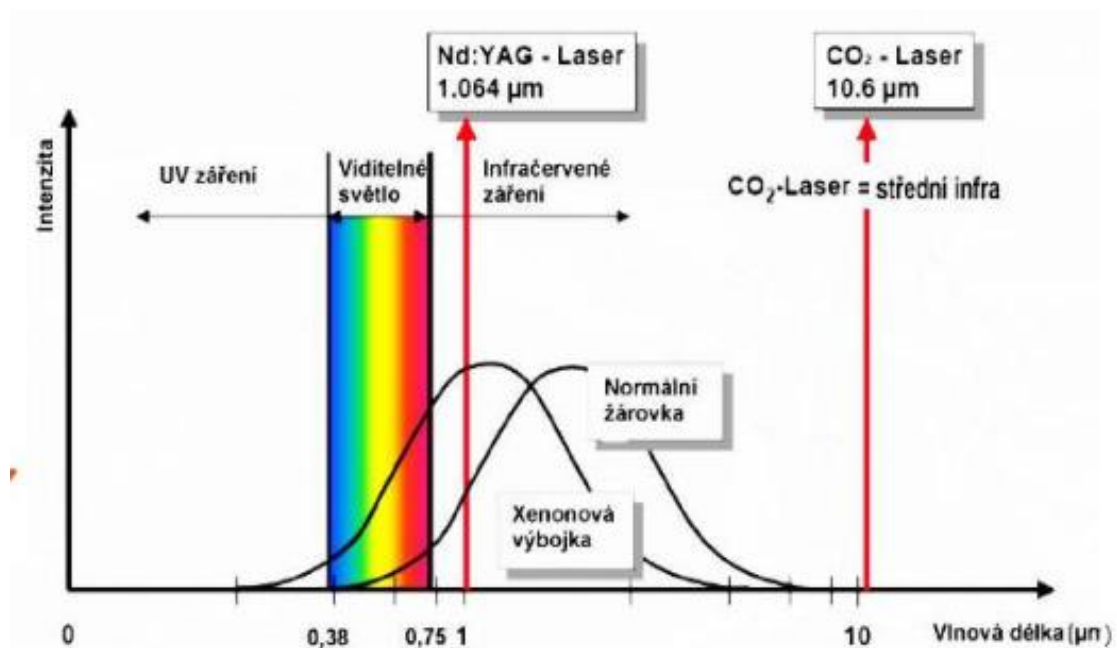
Obr. 7 Fáze vzniku laserového záření v optickém rezonátoru [2]

3.2 Vlastnosti laserového paprsku

Jak již bylo zmíněno mezi hlavní vlastnosti laseru patří monochromaticnost, malá rozbíhavost (divergence) a koherence. [9]

Monochromaticnost

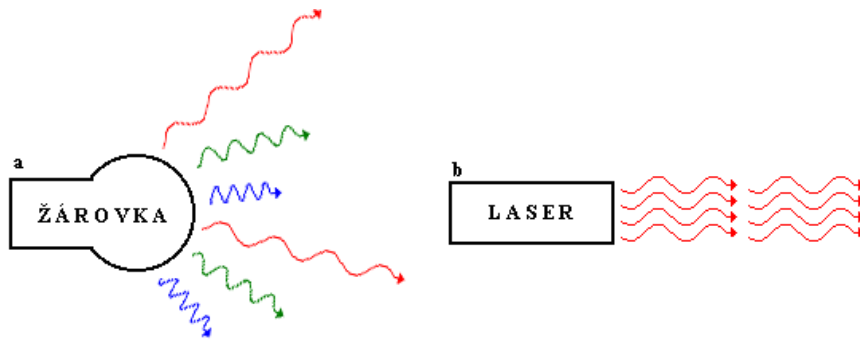
Laserové záření je monochromatické, to způsobuje, že laserový paprsek je monochromatický neboli jednobarevný na rozdíl například od záření emitovaného žárovkou viz Obr. 8, kde se vlnová délka záření žárovky pohybuje od 0,38 μm do skoro 10 μm , zatímco laserové záření CO₂ laseru má vlnovou délku pouze 10,6 μm . Barva laserového paprsku je závislá na aktivním prostředí a na způsobu buzení v optickém rezonátoru. [9] [10] [11]



Obr. 8 Porovnání vlnových délek laserového záření, záření emitovaného žárovkou a xenonovou výbojkou [11]

Koherence

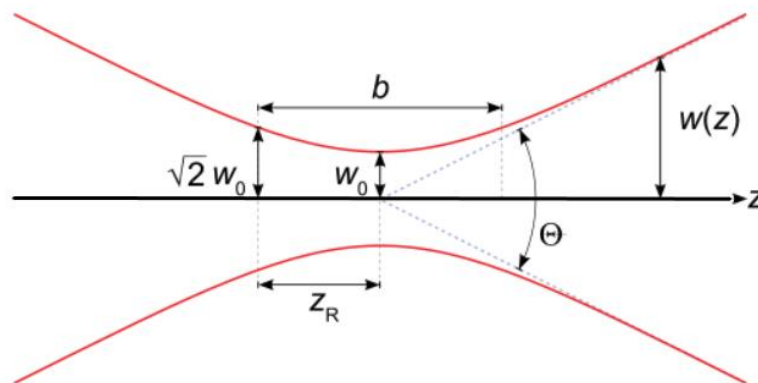
Laserové záření má jednu vlnovou délku a zároveň má stejný směr šíření a stejný fázový posun v daném místě a času. To je vidět na Obr. 9, kde je znázorněno nekoherentní záření v podobě žárovky a koherentní ve formě laseru. [8]



Obr. 9 Nekoherentní záření (a) a koherentní záření (b) [8]

Divergence (rozbíhavost)

Divergence je úhel, který udává, jak rychle se zvětšuje poloměr laserového paprsku se vzdáleností od výstupu z optického rezonátoru viz Obr. 10. Divergenci ovlivňuje vlnová délka, jelikož divergence je tím menší, čím je vlnová délka kratší. Zároveň pomocí nastavení divergence je možno fokusovat laserový paprsek na menší plochu. K měření divergence se obvykle používá poloměr laserového paprsku v ohnisku w_0 . Úhel divergence je poté dán rovnicí (4). [10] [11] [12] [13]



Obr. 10 Schéma poloměru paprsku s úhlem divergence a dalšími parametry (upraveno) [12]

$$2\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{\pi w_0}\right) = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (4)$$

Kde:

θ je polovina úhlu divergence [*mrad*]

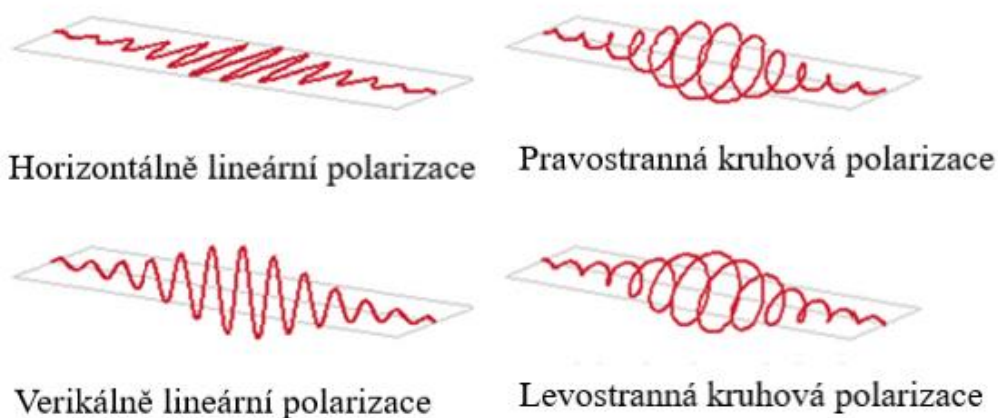
λ je vlnová délka [*mm*]

π je Ludolfovo číslo [–]

w_0 je poloměr laserového paprsku v ohnisku [*mm*]

Polarizace

Světlo je příčné elektromagnetické vlnění, jenž je popsáno dvěma vektory. Vektorem elektrické intenzity \vec{E} a vektorem magnetické indukce \vec{B} . Pokud jsou směry kmitání těchto dvou vektorů kolmé a zároveň leží v rovině kolmé na směr šíření světla, jedná se o světlo polarizované. U laserového záření jsou používány dva typy polarizace lineární a kruhová viz Obr. 11, ale laserové záření může být i nepolarizovaný. [11] [15]



Obr. 11 Druhy lineární polarizace (vlevo) a druhy kruhové polarizace (vpravo)
(upraveno) [14]

3.3 Parametry laserového paprsku

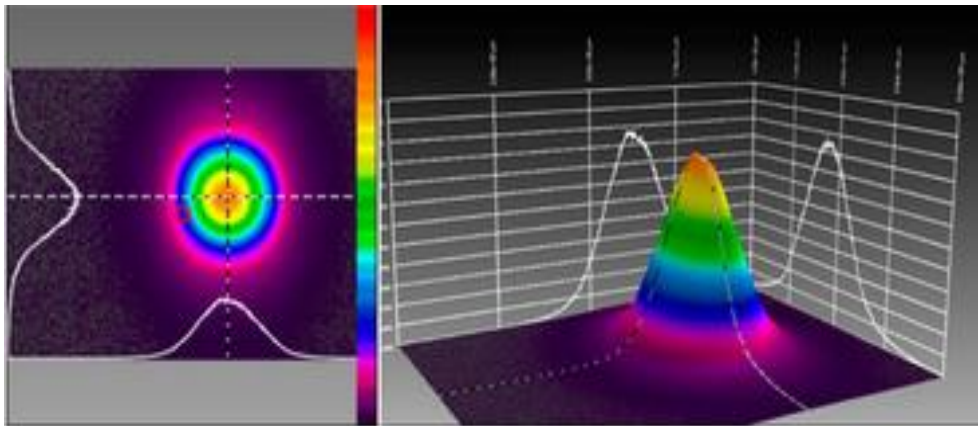
Laser může pracovat v pulzních režimech (pulzní, ultra-krátko pulzní) nebo v kontinuálním režimu v tzv. režimu kontinuální vlny (CW). Tyto typy režimů mají různé použití. Výsledné vlastnosti laserového paprsku závisí na několika parametrech a na jejich vzájemné kombinaci. [19]

3.3.1 Společné parametry laseru v pulzním a v kontinuálním režimu

V této podkapitole jsou popsány parametry charakterizující pulzní režim a režim kontinuální vlny laseru.

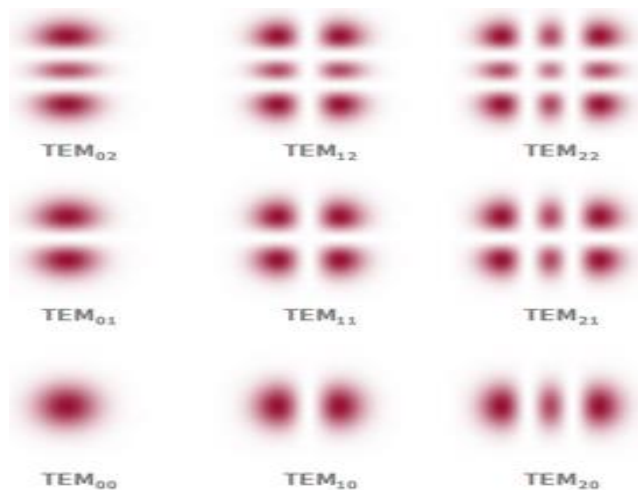
Příčné rozložení intenzity laserového paprsku – TEM (transverse electromagnetic mode)

Laserový paprsek má různé módy rozložení intenzity záření označovány jako TEM (transverse electromagnetic mode). Tvar a rozložení intenzity je dán způsobem konstrukce optického rezonátoru. Základní mód označován TEM_{00} viz Obr. 12 má nejkoncentrovanější energii kolem osy rezonátoru a jeho tvar odpovídá tvaru Gaussovy křivky. [3] [11] [15] [17]



Obr. 12 Zobrazení základního modu TEM_{00} ve 3D [16]

Všechny ostatní módy mají energii rozprostřenou do větší plochy viz Obr. 13, a tudíž se jejich intenzita zmenšuje. Například mód TEM_{01} je používán pro tepelné zpracování nebo povlakování. Jednotlivé módy jsou poté určeny parametrem M^2 , jenž platí pouze pro Gaussovské paprsky. Parametr M^2 udává kvalitu laserového paprsku, a K číslo, jehož rozpětí hodnot je od 0 do 1 a je to převrácená hodnota M^2 parametru. Existují však i jiná rozložení intenzity pro top-hat, square, donut či Besselův paprsek. [3] [11] [15] [17] [29]



Obr. 13 Rozložení intenzity a tvaru záření pro Gaussovské paprsky [17]

Beam Parameter Product (BPP)

Beam parameter product je definován jako poloměr paprsku a polovičním úhlem divergence. BPP se často používá k určení kvality laserového paprsku a to tak, že čím vyšší hodnotu BPP nabývá tím menší je kvalita laserového paprsku. BPP je určena pro kruhově symetrické svazky tzv Gaussovské, ale také jej lze definovat pro nekruhové svazky. U nekruhových svazků se pro určení divergence a poloměru používají sekundové momenty a BPP může nabývat různých hodnot ve vertikálním a horizontálním směru. [11] [12] [18]

Lze jej spočítat pomocí rovnice:

$$BPP = \theta \cdot w_0 = \frac{\lambda}{\pi} \cdot M^2 \quad (4)$$

BPP je Beam parameter product [$mm \cdot mrad$]

w_0 je počáteční poloměr paprsku [mm]

θ je poloviční úhel divergence [$mrad$]

λ je vlnová délka [mm]

π je Ludolfovo číslo [–]

M^2 je parametr charakterizující kvalitu laserového paprsku [–]

Výkonová hustota energie

Výkonová hustota energie vyjadřuje počet fotonů, jež dopadají na materiál. Tím, že laser je koherentní záření s malou divergencí, je možno jej fokusovat na malou plochu. Pro laser o výkonu 1 kW je možné dosáhnout hustoty výkonu až 10^7 W/cm^2 v místě interakce laserového paprsku s materiálem.[19]

Průměr laserového paprsku (spot diameter)

Průměr laserového paprsku je závislý na ohniskové vzdálenosti, vlnové délce, průměru laserového paprsku a M^2 parametru, podle rovnice (5). Kromě vlnové délky a M^2 parametru, která je dána volbou typu laseru, jsou ostatní parametry na sobě závislé a je nutné nastavovat opatrně. [19]

$$D_s = \frac{2 \cdot f \cdot \lambda \cdot M^2}{D} \quad (5)$$

Kde:

D_s je průměr světelného bodu [mm]

f je ohnisková vzdálenost [mm]

λ je vlnová délka [mm]

M^2 je parametr charakterizující kvalitu paprsku [–]

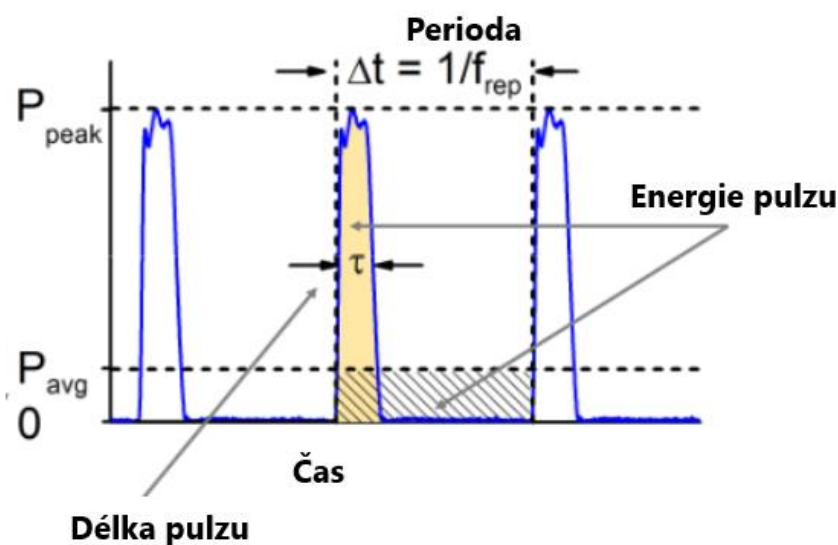
D je průměr laserového paprsku [mm]

3.3.2 Parametry laserového paprsku v pulzním režimu

V předchozí kapitole byly popsány parametry spolčené pro laserové záření vytvářené pulzním a kontinuálním režim. Pulzní režim má však ještě další parametry viz Obr. 14, jako je vrcholový výkon, energie v pulzu, frekvenci opakování pulzů a jejich délce. [19] [39] [40]

Vrcholový výkon (peak power)

Vrcholový výkon je dán energií pulzu, délkou pulzu, průměrným výkonem a periodou opakování jednotlivých pulzů viz rovnice (6). Z toho vyplývá, že i laser který má nízký výkon může dosahovat vysokého vrcholového výkonu, díky zkrácení délka pulzu. Například pulz, jenž má energii 1 J dodané během 1 milisekundy, může mít vrcholový výkon až 1 kW. Vrcholový výkon však může být ještě vyšší, protože energie není po dobu trvání pulzu dodávána rovnoměrně. Zároveň energie v jednom pulzu je rovna průměrnému výkonu za periodu mezi dvěma pulzy viz Obr. 14 [19] [.39] [40]



Obr. 14 Parametry laserového paprsku v pulzním režimu [40]

Vrcholový výkon je dán rovnicí:

$$P_{peak} = \frac{P_{avg}}{f_{rep} \cdot \tau} = \frac{P_{avg} \cdot \Delta t}{\tau} \quad (6)$$

Kde:

P_{peak} je vrcholový výkon [W]

P_{avg} je průměrný výkon [W]

f_{rep} je opakovací frekvence [Hz]

Δt je perioda [s]

τ je délka pulzu [s]

Energie v pulzu

Energie v pulzu je energie v jednotlivých pulzech, které se periodicky opakují v čase, kde mezi jednotlivými periodami laser nevyzařuje žádné záření. Celková energie v pulzu je dána periodou, délkou pulzu a průměrným výkonem, jak je uvedeno v rovnici (7). [19] [40]

Energie v pulzu je dána rovnicí:

$$E_p = \frac{P_{avg}}{f_{rep}} = P_{avg} \cdot \Delta t \quad (7)$$

Kde:

E_p je energie v pulzu [J]

P_{avg} je průměrný výkon [W]

f_{rep} je opakovací frekvence [Hz]

Δt je perioda [s]

Frekvence opakování pulzů a jejich délka

Při pulzním režimu vyzařuje laser energii v pulzech, jež mají přesně definované doby trvání s opakovací frekvencí. Na délce pulzu poté závisí ablace. [19]

3.4 Klasifikace laserů podle pracovního režimu

3.4.1 Kontinuální pracovní režim laseru

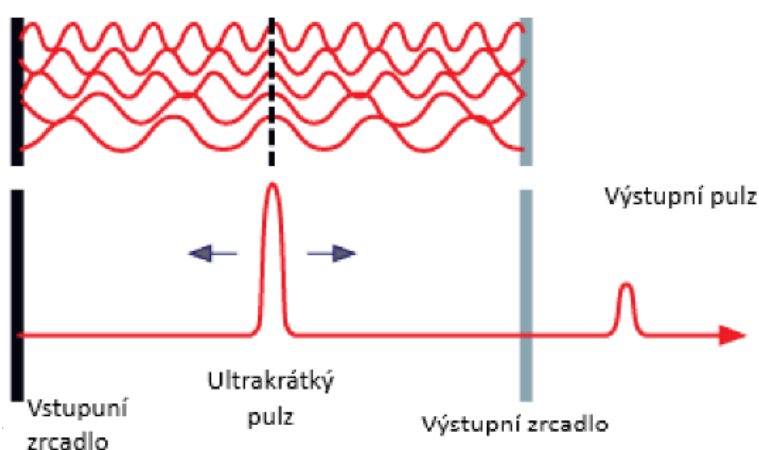
Laserové záření při kontinuálním režimu je vyzařováno v určité frekvenci. Tato frekvence se rovná frekvenci přechodu aktivního prostředí v rezonátoru a také se rovná rezonanční frekvenci optického záření. Pokud je tedy energie dodávaná aktivnímu prostředí pomocí buzení konstantní, laser poté pracuje v kontinuálním režimu nebo také v režimu kontinuální vlny (CW). Výsledný laserové záření má konstantní intenzitu. [11] [19] [31]

3.4.2 Pulzní pracovní režim laseru

V pulzním pracovním režimu je délka pulsu v rozsahu nanosekund. Během pulzního režimu z laseru vystupuje několik pulsů, jež se pravidelně opakují s vysokou frekvencí. V pulzních laserech je možno generovat pulzy s mnohem vyšší energií, zároveň tyto pulzy mají řádově vyšší vrcholový výkon než průměrný výkon. Pro generování takovýchto pulsů se používá metoda q-switching. Princip metody q-switching je založen na tom, že aktivnímu prostředí je dodávána energie, ale optický rezonátor je ukončen modulátorem, který propustí záření jen od určité energie. Tudíž se v optickém rezonátoru hromadí excitované atomy a teprve, když excitované atomy dosáhnou určité energie, modulátor se otevře a vyšle laserový pulz, tento cyklus se poté opakuje. Spínání modulátoru může být mechanické, akusticko-optické nebo elektrické. [31] [32] [33] [34]

3.4.3 Ultra-krátký pulzní pracovní režim

Ultra-krátké pulzy jsou generovány pomocí metody nazývané mode-locking. Tato metoda je založena na zřazování jednotlivých vln, s různou vlnovou délkou. Zřazování vlastně znamená, že jednotlivé vlny jsou „uzamčeny“ uvnitř optického rezonátoru pomocí aktivního nebo pasivního mode-lockingu, poté jsou interferovány, a to má za následek vzniku ultrakrátkých pulsů viz Obr. 15. Výsledné pulzy poté obvykle trvají v rozmezí od 30 fs do 30 ps. Vrcholový výkon u laserů využívající pro generaci laserových pulsů mode-locking je možné dosáhnout ještě vyššího vrcholového výkonu, než u pulsů generovaných pomocí metody q-switching.[35] [36] [37]

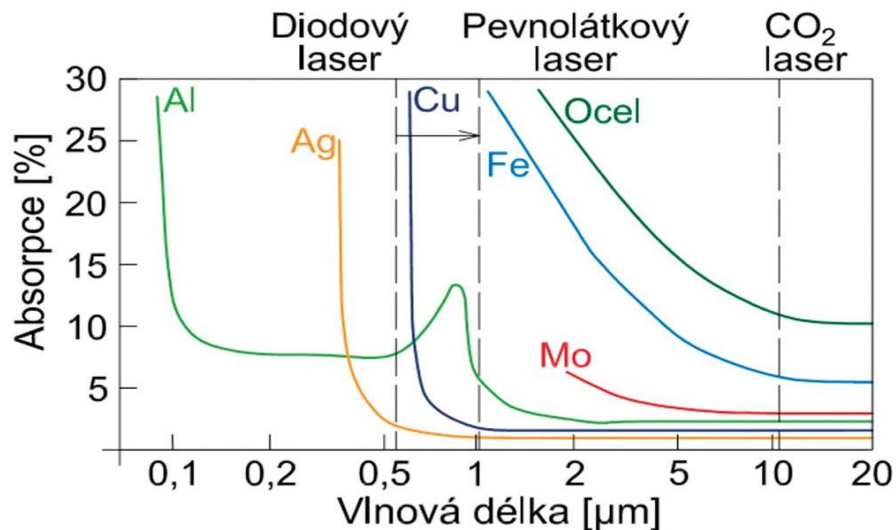


Obr. 15 Tvorba ultrakrátkých pulsů pomocí metody mode-locking [37]

3.5 Interakce laserového paprsku s materiály

3.5.1 Absorpce laserového záření materiálem

Absorpce je vlastnost materiálu pohltit energii laserového záření a je velice podstatná pro mikroobrábění, řezání a další aplikace. Velikost absorpce se poté udává v procentech, přičemž s narůstajícím procentem absorpce narůstá energie, která je pohlcena materiálem. Každý materiál má definovanou hodnotu absorpce (tzv. absorpční koeficient μ , $0 < \mu < 1$). Materiály absorbují záření jen o určitých vlnových délkách, proto je důležité vybrat vhodnou vlnovou délku, při které je absorpce laserového paprsku materiálem nejvyšší viz Obr. 16. Nicméně absorpce materiálu může být také ovlivněna povrchovou úpravou nebo také tím, že tavenina a pevná látka mají rozdílnou absorpci. V zásadě platí, že čím je vyšší absorpční účinnost tím efektivnější mikroobrábění je. [28] [29] [30]



Obr. 16 Absorpce jednotlivých materiálů [30]

3.5.2 Ablace

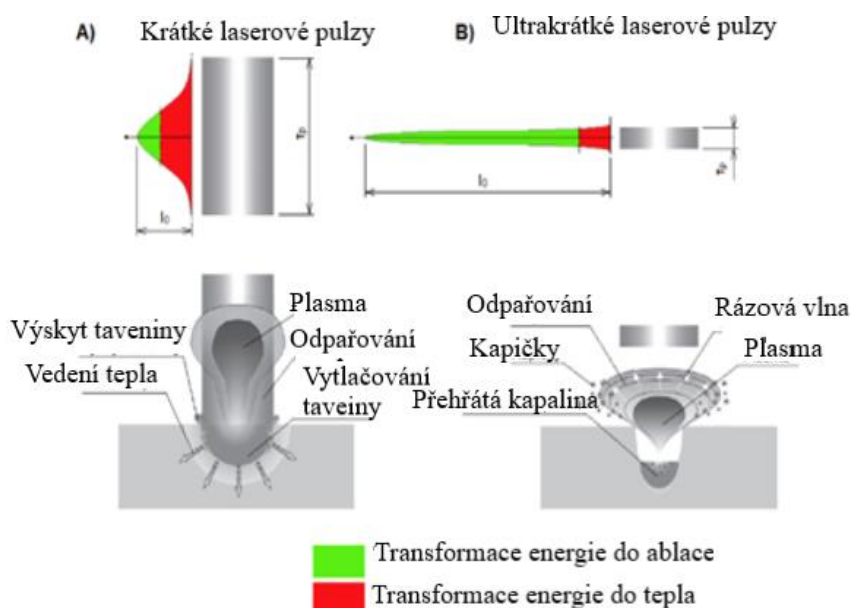
Laserová ablace je proces odstraňování atomů z pevné látky, či taveniny, jejím ozařováním laserovým zářením. Proto, aby ablace nastala musí být překročen ablační práh. Ablační práh je definován jako nejnižší množství energie, při němž ve struktuře materiálu nastávají trvalé změny. Velikost ablace poté závisí kromě na materiálových vlastnostech (absorpce, tepelná vodivost, tepelná kapacita), tak také závisí na vlnové délce, délce pulsu, výkonu a konfiguraci jednotlivých pulsů (jednotlivé pulsy, či burst mode). Vlivem těchto parametrů se ablace dělí na termální a atermální ablaci. [29] [38] [39]

Termální ablace

Termální ablace nastává u laserů využívající režim kontinuální vlny nebo u pulzních laserů s délkou pulzu >10 ps. Během termální ablace dochází k normální látkové přeměně, a to že se pevné látky stává tavením kapalina poté pomocí varu plyn. Velká část energie laserového záření je však absorbována materiálem ve formě tepla a vzniká tak tepelně ovlivněná oblast (HAZ-Heat-Affected-Zone). Takto tepelně ovlivněná zóna může vykazovat oxidaci, změny geometrického tvaru nebo jiné druhy degradace zejména v kovech, jež mají vysokou tepelnou vodivost viz Obr. 17. [38] [39]

Atermální ablace

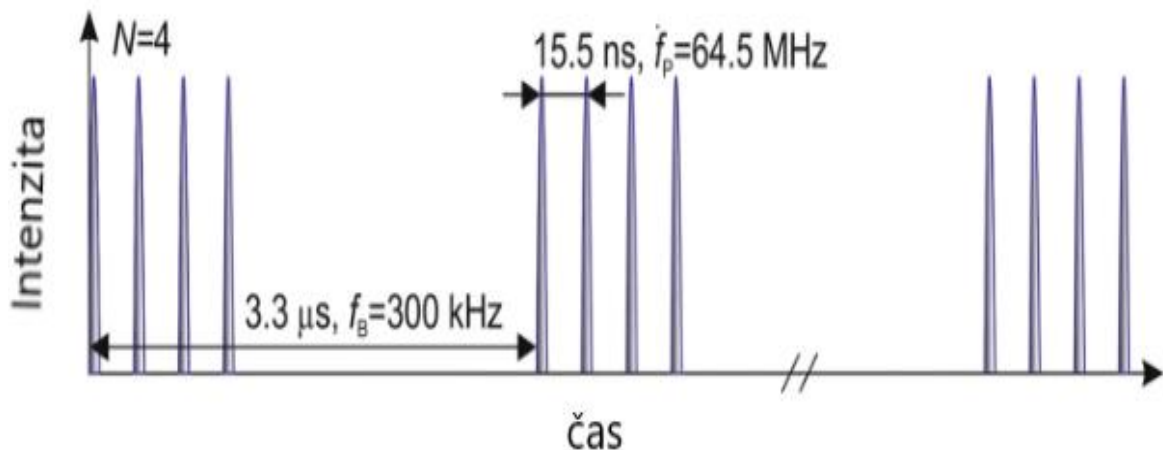
Jev atermální ablace nastává při použití laserů s ultrakrátkými pulzy, kde délka pulzu <10 ps. Během studené ablace je materiál odpařen dříve, než se teplo stihne přenést do objemu materiálu. Délka pulzu je tak krátká, že energie laserového záření je absorbována nejdříve elektrony ty jsou z materiálu odstraněny a vniká tak silné elektrostatické pole, které odtrhne ionty z mřížky. Tento proces odtrnutí iontů skončí dříve, než jsou jednotlivé ionty materiálu zahřáty. V praxi je však nemožné dosáhnout 100 % atermální ablace, protože Gaussovský svazek má jen část nad tzv. ablačním prahem, zbytek energie je přeměněn na teplo. Tepelně ovlivněná oblast u atermální ablace je, ale mnohonásobně menší než u termální ablace, proto ultrakrátké pulzní lasery dosahují mnohem vyšší přesnosti a využívají se pro mikroobrábění viz Obr. 17.[38] [39]



Obr. 17 Rozložení energie v pulzu u krátkých a ultrakrátkých pulzů [29]

3.6 Burst mód

Burst mód je inovativní technika generování laserových pulzů, která byla vyvinuta za účelem zvýšení efektivity úběru materiálu. Efektivnost burst módu oproti konvenčním metodám laserového mikroobrábění spočívá v jeho principu generování laserových pulzů. Při použití burst módu je energie v pulzu, která může přesahovat energii ablačního prahu až o několik řádů, rozdělena do „balíků“ pulzů tzv. burstů. Každý burst se poté skládá minimálně ze dvou pulzů, ale může obsahovat až několik set, nebo tisíc pulzů. Jednotlivé pulzy se uvnitř burstu opakují s frekvencí f_p , která se nazývá vnitřní opakovací frekvence (intra-burst repetition rate). Vnitřní opakovací frekvence pulzů uvnitř burstu, je poté až o tři řády vyšší než opakovací frekvence jednotlivých burstů f_b (inter-burst repetition rate) viz Obr. 18. Každý pulz v burstu poté má energii v pulzu blízkou se k optimálnímu nastavení rychlosti ablace, při níž se zvyšuje objem ablovaného materiálu. Krom navýšení objemu ablovaného materiálu dále použití burst módu ještě více snižuje nežádoucí efekt akumulace tepla v místě interakce pulzu s materiálem a rozšíření tepelně ovlivněné zóny (HAZ) vedoucí k nevratnému tepelnému poškození materiálu, jako jsou praskliny nebo roztavení, s následným zhoršením kvality a přesnosti celého procesu mikroobrábění. [41] [42] [43] [46] [50]



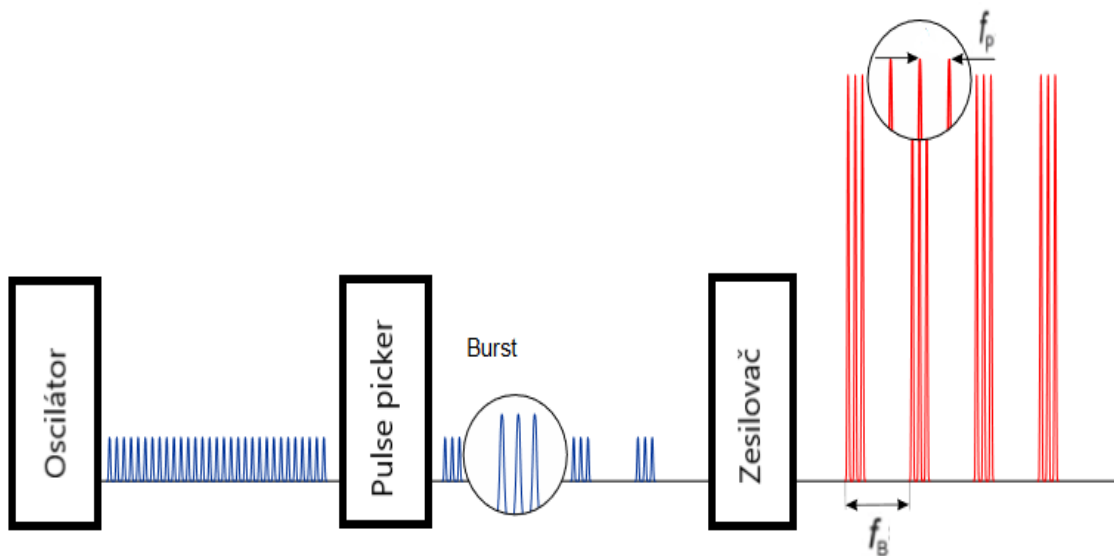
Obr. 18 Příklad burst módu obsahující čtyři pulzy v jednom burstu (upraveno) [44]

3.6.1 Metody generace burstů

Existuje několik metod generování pulsů v burst módech. V této kapitole je popsáno generování pulsů v burstu pomocí dvou základních metod tzv. pulse picking a generace pulsů v burstu rozdělováním pulsů pomocí Michelsonových interferometrů existují však i další metody generace pulsů v burstu.

Generování burstů pomocí metody pulse picking

Metoda pulse picking využívá k vytváření burstů akusticko-optického modulátoru, nebo jiného elektrooptického zařízení nazývaného pulse picker. Laserový oscilátor pracuje s opakovací frekvencí f_p v řádech od MHz až po několik GHz. Pulse picker vybere určitý počet pulsů, ze kterých utvoří burst, který je následně zesílen pomocí zesilovače. Pulse picker zároveň snižuje opakovací frekvenci f_p na opakovací frekvenci jednotlivých burstů f_b jak je vidět na Obr. 19. Pulse picker je také schopný extrahovat nejen jednotlivé pulsy, ale i bursty o N pulzech, které se poté pomocí zesilovače zesilují na požadovaný špičkový výkon. [41][42] [43]



Obr. 19 Schéma generování burstů pomocí metody pulse picking (upraveno) [42]

Perioda jednotlivých pulzů uvnitř burstu:

$$\Delta t_p = \frac{1}{f_p} \quad (8)$$

Kde:

Δt_p je perioda jednotlivých pulzů uvnitř burstu [s]

f_p je opakovací frekvence pulzů uvnitř burstu [Hz]

Perioda jednotlivých burstů je dána rovnicí:

$$\Delta t_b = \frac{1}{f_b} \quad (9)$$

Kde:

Δt_b je perioda jednotlivých burstů [s]

f_b je frekvence jednotlivých burstů [Hz]

Generování pulzů v burstu pomocí Michelsonových interferometrů

Bursty mohou být dále generovány pomocí dělení jednotlivých laserových pulzů. Jednou z meto je dělení pomocí Michelsonových interferometrů. Pulz vletí do Michelsonova interferometru, kde je rozdělen pomocí polarizační krychle na dva dílčí pulzy a vzniká burst obsahující dva pulzy. [41] [42] [43]

Zpoždění mezi těmito dvěma pulzy Δt je dáno rovnicí:

$$\Delta t_{1-2} = \frac{\Delta l}{c} \quad (10)$$

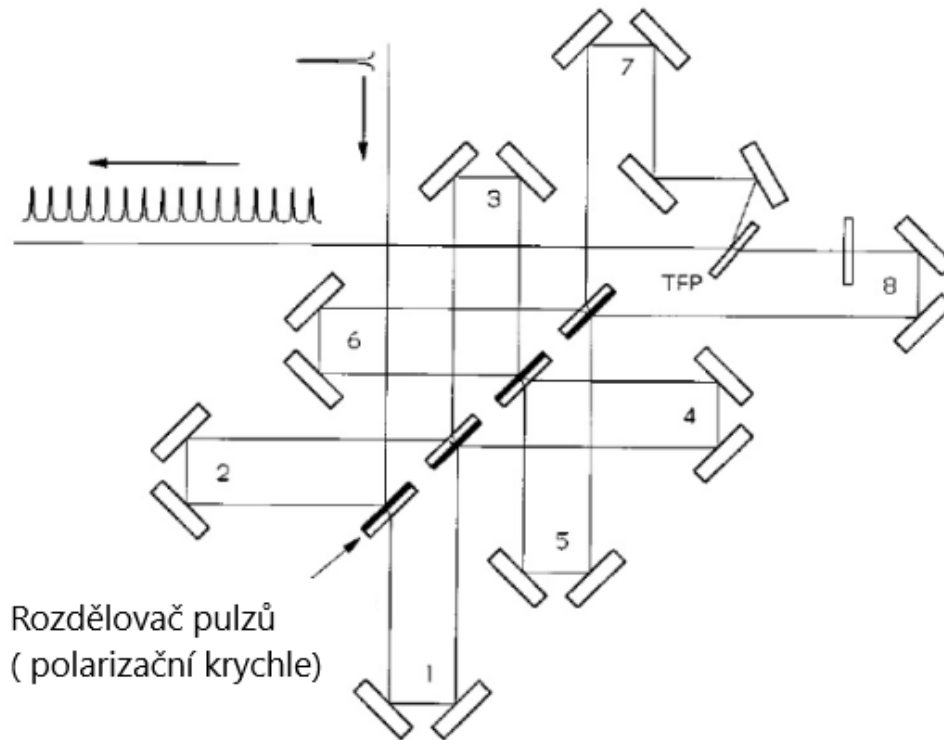
Kde:

Δt_{1-2} je zpoždění mezi dvěma pulzy [s]

Δl je rozdíl optických drah obou pulzů mezi rameny interferometru [m]

c je rychlost světla ve vakuu $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Toto zpoždění je možné odstranit pomocí změny délek ramen interferometru. Podmínkou pro rozdělení pulzu na dva energeticky totožné pulzy je nutné použít vhodně polarizované pulzy. Pokud je použito více interferometrů, je touto metodou možno generovat bursty o více pulzech viz Obr. 20.



Obr. 20 Schéma generace burstů pomocí Michelsonových interferometrů (upraveno)
[41]

Počet pulzů v jednom burstu při použití více interferometrů:

$$n = 2^m \quad (11)$$

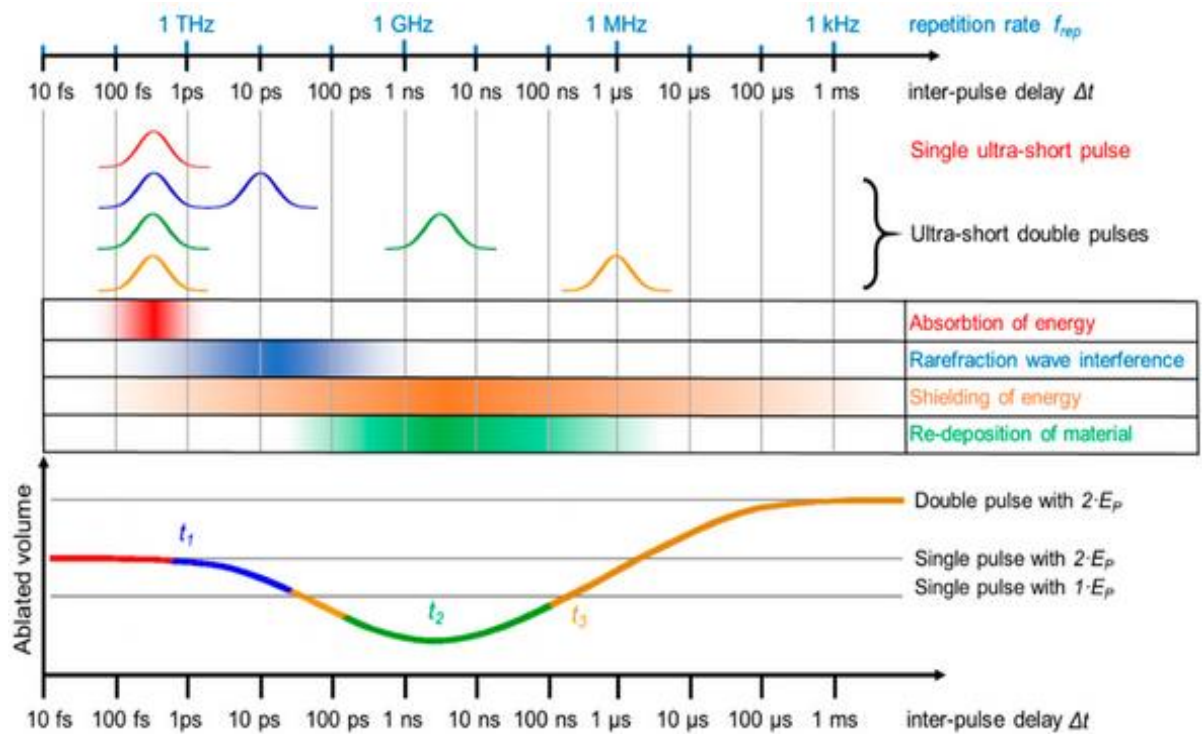
Kde:

n je počet pulzů v burstu [–]

m je počet interferometrů [–]

3.6.2 Laserová ablace při použití dvou pulzů v burstu

Při použití dvou pulzů v burstu je objem ablovaného materiálu závislý na materiálu, fluence a hlavně na časové prodlevě mezi pulzy. Pokud jsou použity bursty s časovou prodlevou mezi pulzy v rozsahu do 1 ps je objem ablovaného objemu burstem roven objemu ablovaného jedním pulzem s dvojnásobnou energií v pulzu viz Obr. 21.



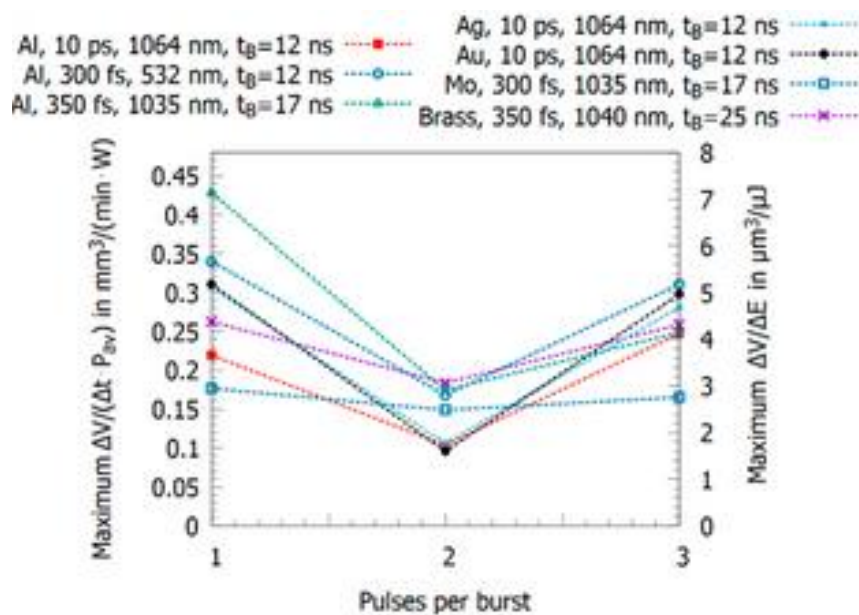
Obr. 21 Interakce materiálu s laserovým pulzem při použití jednoho pulzu a burstu obsahující dva pulzy [46]

Když se bude prodleva prodlužovat, začne docházet k několika fyzikálním jevům. Pokud je prodleva mezi pulzy v rozsahu od 10 ps do 100 ps dochází k interakci rázové vlny vytvořené prvním pulzem. Rázová vlna částečně odstíní druhý pulz a to vede ke snížení ablovaného objemu materiálu. Je-li prodleva mezi pulzy od 100 ps do 100 ns dochází k jevu nazývanému plazmatické stínění (plazma sheilding effect). Během plazmatického stínění první pulz interaguje s povrchem materiálu, odebere materiál a vytvoří oblak plazmy. Jelikož je časová prodleva mezi pulzy příliš krátká oblak plazmy se nestihne rozptýlit a druhý pulz může být buď z části, nebo úplně pohlcen oblakem plazmy, což také snižuje objem ablovaného materiálu. Pokud je prodleva mezi pulzy v rámci jednotek či desítek ns, je přidruženým jevem k plazmatickému stínění redepozice materiálu. Efekt plazmatického stínění spolu s opětovným ukládáním ablovaného materiálu se snižuje, pokud je zpoždění mezi pulzy ve stovkách nanosekund. Snížení těchto dvou jevů je

zapříčiněno zředěním oblaku plazmy, jenž byl vytvořen prvním pulzem. Při zpoždění pulzů v rádech několika desítek až stovek μs druhý pulz neinteraguje s oblakem plazmy a ablovaný objem materiálu burstem obsahující dva pulzy je roven dvojnásobku objemu ablovaného materiálu jedním pulzem viz Obr. 21. [41] [45] [46]

3.6.3 Laserová ablace při použití tří pulzů v burstu

Při použití burstu obsahujícího tři pulzy dochází po jevech pospaných v přechozí kapitole k dalším jevům. Konkrétně pak třetí pulz, který dopadá na povrch obráběného materiálu, opět navyšuje objem odebraného objemu, jak je vidět na Obr. 22, kde ablovaný objem u všech zkoumaných materiálů (krom molybdenu) opět výrazně vzrostl. Takovýto opětovný nárůst úběru materiálu lze vysvětlit tak, že druhý pulz částečně vyčistí oblak plazmy vytvořený prvním pulzem. Třetí pulz poté znovu v krátkém časovém intervalu interaguje s materiálem, který ovšem není zrelaxovaný a způsobuje tak větší úběr materiálu díky jeho zvýšené absorpci. [46]

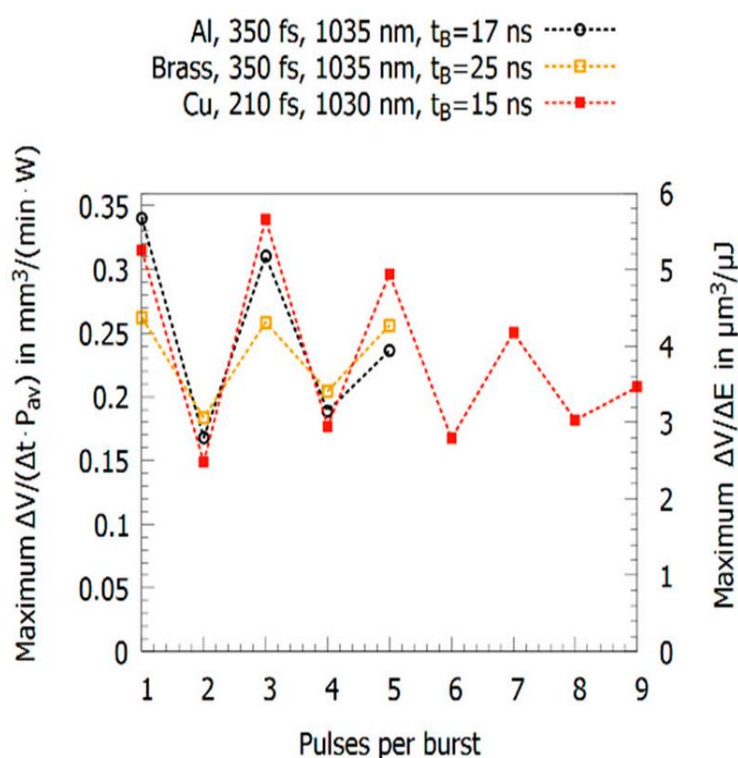


Obr. 22 Graf znázorňující objem ablovaného materiálu při použití tří pulzů v burstu u různých materiálů [46]

3.6.4 Laserová ablace při použití více pulzů v burstu

Ablovaný objem jednotlivých materiálů se při použití více než tří pulzů značně liší, jak je znázorněno na Obr. 23. Zde jsou znázorněny výsledky velikosti ablovaného objemu pro hliník, mosaz a měď, kde tyto tři materiály vykazují rozdílné chování při použití

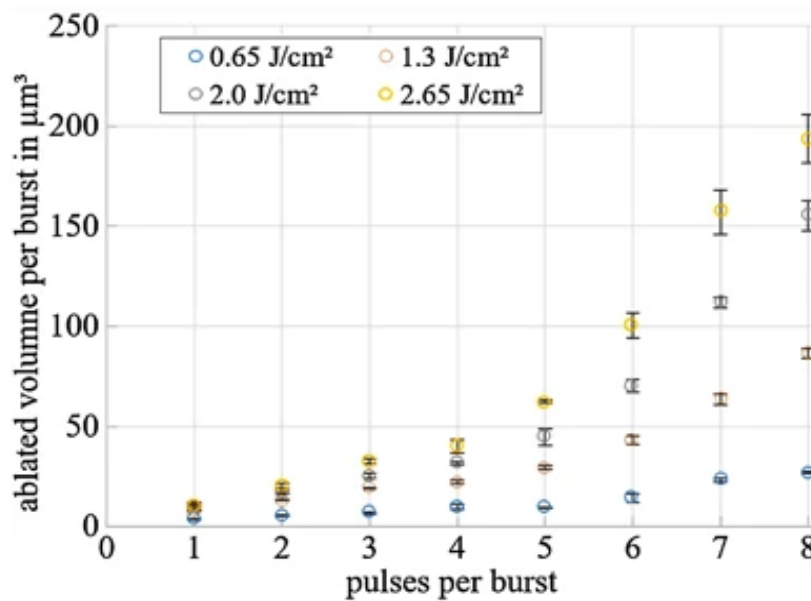
lichého a sudého počtu pulzů. Při použití lichého počtu pulzů v burstu, ablovaný objem nabývá vyšších hodnot než při použití sudého počtu pulzů v burstu, kde se rozdíly ablovaných objemů mohou lišit i o 50 %. Takto vysoké rozdíly lze vysvětlit, tak že při použití sudého počtu pulzů je druhý pulz částečně, nebo zcela odstíněn, ale zároveň vyčistí ablační oblak viz 3.6.2 a třetí pulz je poté absorbován povrchem materiálu. Třetí pulz však opět generuje ablační oblak, který znovu částečně, nebo zcela odstíní v čtvrtý pulz a pátý pulz může opět přispět k procesu ablace. Toto chování je ale také závislé na obráběném materiálu. [46]



Obr. 23 Graf znázorňující objem ablovaného materiálu při požití více pulzů v burstu různých materiálů [46]

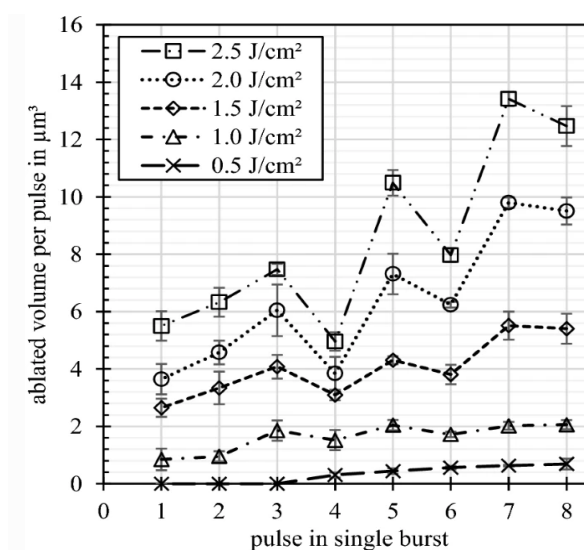
Například ocel takovéto střídavé chování nevykazuje, jak je vidět na Obr. 24, kde jsou znázorněny objemy ablovaného materiálu. Při použití burstů obsahující pulzy s délkou 10 pikosekund a časová prodleva jednotlivých pulzů byla 12,5 nanosekund. Ablovaný objem narůstá s narůstajícím počtem pulzů v burstu. Takovýto nárůst lze vysvětlit dvěma způsoby. Prvním možným efektem je akumulace tepla, protože i při použití ultrakrátkých laserových pulzů se malé množství energie ukládá ve formě tepla. Pokud je doba mezi dvěma pulzy dostatečně krátká teplo nemůže zcela opustit ovlivněnou oblast a další dopadající pulzy jsou schopny odebrat větší objem materiálu. Druhým efektem je

vytvoření plazmy. Ta sice má stínící efekt (viz kap. 3.6.2), ale také může napomáhat ablačnímu procesu, tím že pokud je použito několik pulzů v burstu je schopna přetavit povrch a tím zvýšit absorpci, což poté vede k vyššímu úběru materiálu. [52]



Obr. 24 Graf znázorňující objem ablované oceli na jeden burst při použití více pulzů v burstu [52]

Ablovaný objem slinutého karbidu wolframu při použití pulzů s délkou 10 pikosekund a prodlevou mezi jednotlivými pulzy 12,5 nano-sekund je znázorněn. Odebraný objem narůstá až do tří pulzů v burstu, jak je znázorněno na Obr. 25 jedná se tedy o podobné chování, které vykazuje ocel. [53]



Obr. 25 Graf znázorňující objem ablovaného slinutého karbidu wolframu na jeden burst při použití více pulzů v burstu [53]

Avšak poté objem ablovaného materiálu dosahuje nižších hodnot při použití burstů obsahující sudý počet pulzů oproti burstům tvořenými lichým počtem pulzů. Takovéto chování již bylo pozorováno u mědi, mosazi a hliníku viz Obr. 23. I zde při ablačním procesu dochází k plazmatickému stínění a redepozici ablovaných částic, avšak tyto dva jevy se začnou projevovat, až od čtyř pulzů v burstu. Z toho vyplývá, že před vyvoláním plazmatického stínění a redepozicí ablovaných částic je nutné dosáhnout určité hustoty plazmového nebo ablačního oblaku. [53]

3.7 Laserové mikroobrábění a gravírování

Laserové mikroobrábění a gravírování jsou procesy, které jsou si velice podobné. Během obou procesů je materiál odebírán pomocí laserového záření o vysoké intenzitě, které je fokusováno na velice malou plochu. Laserové gravírování je využíváno ke značení širokého spektra materiálů a vytváření struktur (kovy, sklo, dřevo, kůže a další). Proces laserového mikroobrábění se využívá k obrábění těžko obrobitelných kovů, keramik, skla a plastů, avšak díky nastavení laseru je možné pomocí laserového gravírování a mikroobrábění zpracovávat i další materiály. [11] [46] [51] [54]

Laserové mikroobrábění

Během laserového mikroobrábění je odebírán pouze malý objem materiálu. Stěžejními požadavky pro laserové mikroobrábění je výsledná kvalita povrchu, míra tepleného ovlivnění a objem odebraného materiálu. Všechny tyto požadavky jsou nastavovány a měněny nastavením laseru. Díky těmto výhodám se používá, tam kde konvenční metody nemohou být použity například z důvodu tvarové složitosti výrobku nebo nemožnosti dokončení jinými způsoby. [11] [46] [51] [54]

Oblasti využití laserového mikroobrábění je mnoho. Ve strojírenství se používá k výrobě velmi malých a přesných otvorů, jejichž průměr se pohybuje až v jednotkách mikrometrů. Další možností použití je během dokončovacích operací, například vytváření trojrozměrných struktur při výrobě vstřikovacích forem. Pomocí laserového mikroobrábění je také možné strukturovat povrch, který může poté být hydrofobní, nebo naopak na svém povrchu lépe drží různá maziva pomocí vytvoření malých prohlubní. Neméně důležitým využitím je poté úprava velmi tvrdých materiálů při výrobě například vyměnitelných břitových destiček, na kterých se vytváří dokončovací struktury, nebo

utvařeče třísek. Dalšími oblastmi využití je elektrotechnický průmysl a medicínský průmysl, kde se pomocí laserového mikroobrábění vyrábějí například nitrožilní stenty. [11] [46] [51] [54]

Laserové gravírování

Laserové gravírování je díky vlastnostem laseru velice efektivní, přesný a rychlý proces, využívaný pro dekorativní účely, značení a popisování výrobků, kde na rozdíl od laserového mikroobrábění je důležitý vizuální aspekt finálního výrobku. Značka nebo popisek vytvořená laserem má dlouho trvanlivost a je odolná proti opotřebení. Z těchto důvodů laserové gravírování pomalu vytlačuje dříve používané metody značení. [11] [54]

3.7.1 Použití burst módu v laserovém mikroobrábění

Burst mód se v laserovém mikroobrábění používá díky tomu, že je možné s ním dosáhnou většího objemu odebraného materiálu, jak bylo ukázáno v 3.6.4 a tedy i větší efektivity procesu. Dále je poté využíván při tvorbě velmi přesných a malých otvorů, kde oproti jedno-pulznímu režimu dosahuje lepší kvality povrchu uvnitř otvorů i na povrchu, kdy nedochází k rozstříku nataveného materiálu a zároveň s efektivnější výrobou. Povrch obráběného materiálu po použití burst módu bývá lepší než při použití jedno-pulzního režimu laseru. Hlavními důvody dosažení lepší kvality povrchu jsou akumulace tepla a redepozice materiálu. Díky těmto dvěma jevům vzniká se na povrchu ukládají ablované částice, které jsou následně akumulací tepla přeměněny na vrstvu taveniny, která po ztuhnutí vyrovná nerovnosti na povrchu. Dalším důvodem může poté být použití nízkého výstupního výkonu laseru. Energie v pulzu jednotlivých pulzů je poté příliš nízká a dochází tak pouze k odstranění nerovností na povrchu to má poté za následek celkový zlepšení kvality povrchu. [46]

4 Praktická část

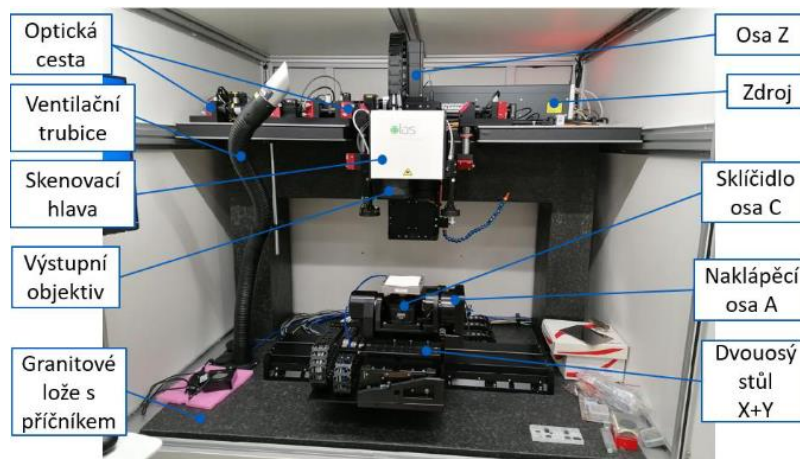
Motivace této práce spočívala ve zjištění efektivity mikroobrábění při použití burst módu, jelikož burst mód patří k novějším metodám laserového mikroobrábění a na základě poznatků v teoretické části se ukazuje jako zajímavý nástroj pro rychlejší úběr materiálu s dobrou kvalitou povrchu. Praktická část se zaměřuje na porovnání rychlosti úběru a výsledné drsnosti slinutého karbidu dosahované pomocí burst módu oproti jedno-pulznímu režimu laseru v závislosti na počtu pulzů v burstu a výstupním výkonu (fluence). Tato část bakalářské práce se skládá z návrhu experimentu, popisu testovaného materiálu, samotného provedení experimentu spolu s následným okomentováním výsledků.

4.1 Návrh experimentu

V této kapitole je uvedeno experimentální a měřicí zařízení, testovaný materiál a samostatné nastavení experimentu. Experiment byl proveden v laboratoři Českého institutu informatiky robotiky a kybernetiky (CIIRC), kde se nachází společné pracoviště Fakulty strojní ČVUT a CIIRC ČVUT.

4.1.1 Experimentální zařízení

Experiment byl proveden na stroji MASTER 1, jedná se o pětiosé laserové zařízení, které je určeno k laserovému mikroobrábění. Na Obr. 26 je vidět jeho pracovní prostor. Toto zařízení je vybaveno skenovací hlavou, jenž je umístěna na ose Z a poté jsou zde další 2 translační osy X a Y a dvě rotační osy A a C. [56]



Obr. 26 Pracovní prostor laserového zařízení MASTER 1 [56]

Zařízení MASTER 1 je vybaveno odsávacím zařízením, která odsává odebraný materiál a obsahuje také dvě kamery sloužící ke sledování pracovního prostoru a zaměření polohy obrobku. Dále využívá galvano-skenovací hlavou IntelliSCAN14 od firmy SCANLAB. Vybrané parametry jsou uvedeny v Tab. 1. [56] [58]

Tab. 1 Vybrané parametry galvo skenovací hlavy IntelliSCAN14 od firmy SCANLAB [58]

Parametr	Hodnota
Polohovací rychlost [<i>m/s</i>]	5
Rychlost značení [<i>m/s</i>]	2
Rozsah rotace [<i>rad</i>]	±0,35
Přesnost [<i>μrad</i>]	2

Toto zařízení disponuje femtosekundovým laserovým zdrojem Carbide od firmy Light Conversion. V experimentu byl použit laserový zdroj z modelové řady CB3-40 W, kde je aktivní prostředí chlazeno vodou. Vybrané parametry toho zařízení jsou v Tab. 2. [56] [57]

Tab. 2 Vybrané parametry laserového zdroje Carbide light conversion CB3-40 W [57]

Parametr	Hodnota
Vlnová délka [<i>nm</i>]	1030±10
Maximální výstupní výkon [<i>W</i>]	40
Maximální pulzní energie [<i>mJ</i>]	0,4
M^2 [–]	<1,2
Počet pulzů v burstu [–]	1-10
Délka pulsu [<i>fs – ps</i>]	250 -10
Perioda jednotlivých pulzů v burstu [<i>ns</i>]	15
Opakovací frekvence [<i>MHz</i>]	<1

4.1.2 Vyhodnocovací zařízení

Hloubka odebrané vrstvy, vzhled a kvalita povrchu po provedení experimentu byla vyhodnocena na optickém 3D mikroskopu InfiniteFocus G5 od firmy Alicona Imaging GmbH. Optický mikroskop je vidět na Obr. 27 a v Tab. 3 jsou uvedeny vybrané parametry.



Obr. 27 Optický mikroskop Alicona InfiniteFocus G5 [59]

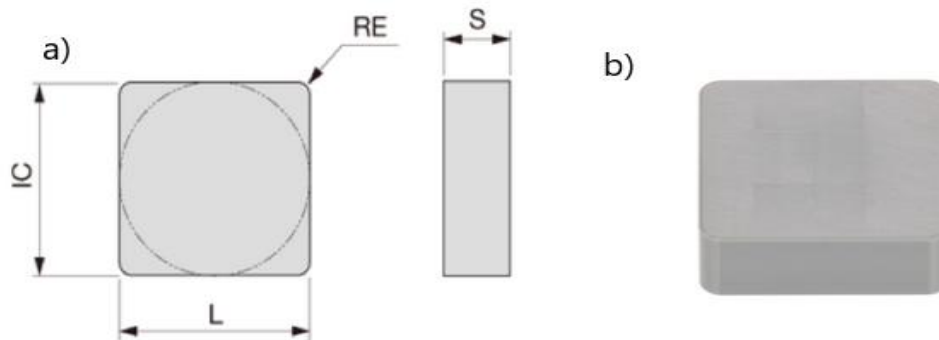
Tab. 3 Vybrané parametry optického mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5 [59]

Parametr	Hodnota
Rozsah pojezdů [mm]	100x100x100
Revolverová hlava s šesti objektivy [–]	Zvětšení: 2,5x, 5x, 10x, 20x, 50x, 100x
Maximální výška vzorku [mm]	170
Maximální hmotnost dílu [kg]	20
Maximální rozlišení ve vertikálním směru [nm]	10

Optický 3D mikroskop Alicona InfiniteFoscus G5 skenuje povrch vzorku pomocí bezkontaktní metody, kdy mikroskop snímá povrch měřené součásti pomocí snímků. Získané snímky poté slouží k vyhodnocení a zjištění parametrů povrchu vzorku. Tento mikroskop je schopen vyhodnocovat profilové parametry drsnosti (2D) a zároveň také umožňuje vyhodnocovat plošné parametry drsnosti (3D). [59]

4.2 Testovaný materiál

Experiment byl proveden na břitové destičce ze slinutého karbidu od výrobce Tunglloy Corporation s označením SNMN 120408 TH10. Označení SNMN označuje, že jde o čtvercovou vyměnitelnou břitovou destičku bez otvoru, která se řadí do třídy přesnosti M. Číslo 120408 udává celkový rozměr destičky, jak je znázorněno na Obr. 28, kde jsou zakótovány rozměry destičky. [60] [61]



Obr. 28 Vlevo Geometrie VBD s označením SNMN 120408 - TH10-Vpravo (b) VBD ze slinutého karbidu K10 [60]

Tab. 4 Rozměry VBD SNMN 120408 [60]

RE [mm]	L [mm]	IC [mm]	S [mm]
0,80	12,70	12,70	4,76

TH10 je poté označení slinutého karbidu dle německé normy, která v ISO normě nese označení K10. Vybrané vlastnosti slinutého karbidu s označením K10 jsou zobrazeny v Tab. 5. [60] [61]

Tab. 5 Chemické složení a vlastnosti slinutého karbidu s označením K10 [62]

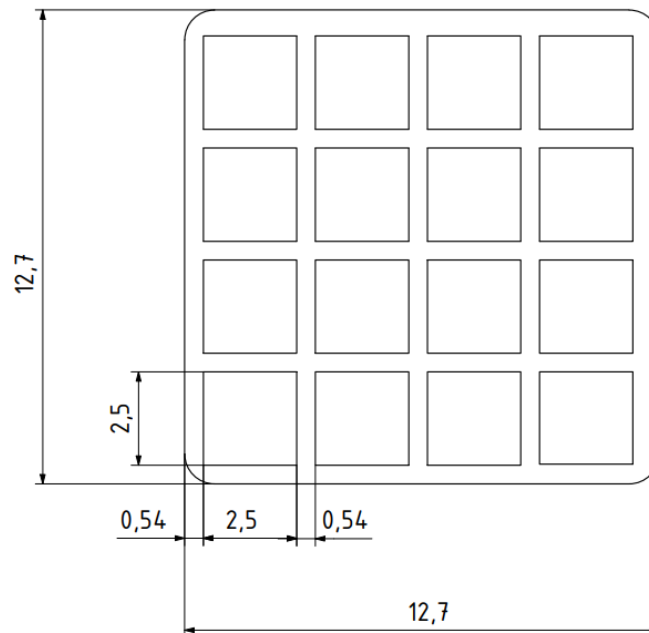
Chemické složení	
Obsah WC [hm. %]	93
Obsah Co [hm. %]	7
Vlastnosti slinutého karbidu K10	
Hustota [g/cm^3]	14,82
Tvrdość [HV]	2175
Youngův modul pružnosti v tahu [GPa]	650

4.3 Nastavení experimentu

V této části jsou definovány konstantní a proměnné parametry včetně strategie použité pro realizaci experimentů. Během celého experimentu byly určeny jako neměnné parametry:

- překrytí pulzů
- opakovací frekvence
- počet přejezdů
- skenovací rychlost
- délka pulzu
- průměr paprsku
- úhel natočení šrafování

Všechny konstantní parametry byly nastaveny na základě předchozích experimentů a jejich hodnoty jsou uvedeny v Tab. 6. Naopak parametry, které se měnily po každé obrobené ploše byl počet pulzů v burstu a po každých deseti obrobených plochách byl změněn výstupní výkon laseru (fluence). Obrobená plocha byla ve tvaru čtverce o délce strany 2,5 mm. Celkově bylo tedy umístěno na jednu VBD SNMN-120408 TH10 šestnáct vzorků viz Obr. 29.

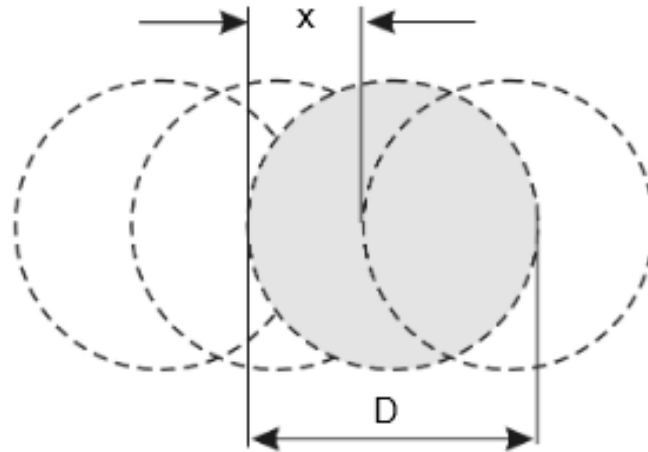


Obr. 29 Schématické rozložení obráběných čtverečků na VBD SNMN-120408 TH10

Strategie šrafování

Překrytí pulzů tzv. overlap, vyjadřuje, jak velkou částí se jednotlivé pulzy překrývají, jak je znázorněno na Obr. 30. Udává se v procentech a vychází z rovnice

(12). Celý experiment byl proveden s procentuální hodnotou překryvu 80 %. [63]



Obr. 30 Schématické znázornění překrytí pulzů [63]

$$S_x = \left(1 - \frac{v}{D \cdot f}\right) \cdot 100 \quad (12)$$

Kde:

S_x je překryv [%]

D je průměr pulzu [mm]

f je opakovací frekvence [Hz]

v je skenovací rychlost [mm/s]

Natočení šrafovaní bylo nastaveno na 17° vůči předešlé vrstvě. Důvodem pro použití natočení šrafovaní je postupné pokrytí plochy celého obráběného povrchu dráhami laserového paprsku. Natočení po jednotlivých přejezdech je znázorněno na Obr. 31.



Obr. 31 Zvolená strategie šrafovaní: vlevo – natočení šrafovaní pro první přejezd; vpravo – natočení šrafovaní pro druhý přejezd

Tab. 6 Konstantní parametry během experimentu

Parametr	Hodnota
Překrytí pulzů [%]	80
Natočení šrafovaní [°]	17°
Délka pulzu [fs]	270
Perioda mezi jednotlivými bursty [ns]	15
Opakovací frekvence burstů [kHz]	200
Skenovací rychlost [mm/s]	1200
Rozteč mezi drahami laseru [mm]	0,006
Počet přejezdů [–]	50
Rozměr obráběné plochy [mm]	2,5 x 2,5

Proměnné parametry byly počet pulzů v bursu a výstupní výkon laseru (fluence). Výpočet fluence je uveden v rovnici (13). Rozsahy těchto parametrů jsou uvedeny v Tab. 7.

$$F = \frac{2 \cdot E_p}{\pi \cdot D^2 \cdot 4 \cdot 100} \quad (13)$$

F je fluence [J/cm]

E_p je energie v pulzu [J]

D je průměr laserového paprsku [mm]

π je Ludolfovo číslo [–]

Tab. 7 Proměnné parametry během experimentu

Parametr	Hodnota
Počet pulzů v bursu [–]	1-10
Výstupní výkon laseru [W]	1,5; 5; 10
Fluence [J/cm^2]	2,12; 7,07; 14,15

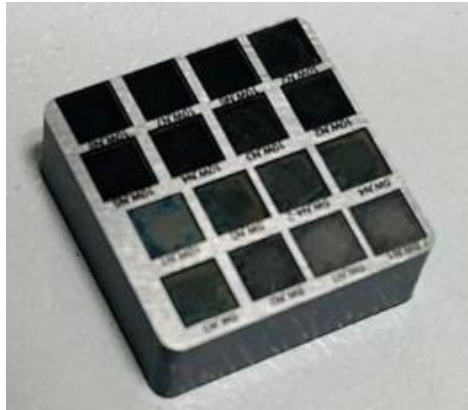
4.4 Realizace experimentu

Experiment byl realizován na laserovém zařízení MASTER 1, na kterém bylo obrobena třicet ploch ve tvaru čtverce. Poté následovala analýza obrobených ploch na optickém mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5, na němž byla měřena dosažená hloubka a parametr S_a . Parametr S_a je průměrná aritmetická výška posuzované plochy mikrometry [65] dle normy ČSN EN ISO 25178-2. Po naměření potřebných dat bylo provedeno vyhodnocení experimentu.

Obrábění jednotlivých čtverců

První část spočívala v obrobení celkem třiceti čtverců délce strany 2,5 mm do destičky slinutého karbidu K10 na laserovém zařízení MASTER 1, kdy obrobení jednoho čtverce vždy trvalo 68 sekund díky použité konstantní rychlosti skenování. Před samotným započítím experimentu byly nastaveny konstantní parametry, které jsou Tab. 6. Pro každých deset čtverců byl poté nastavena jedna hodnota fluence (2,12; 7,07; 14,15 J/cm^2),

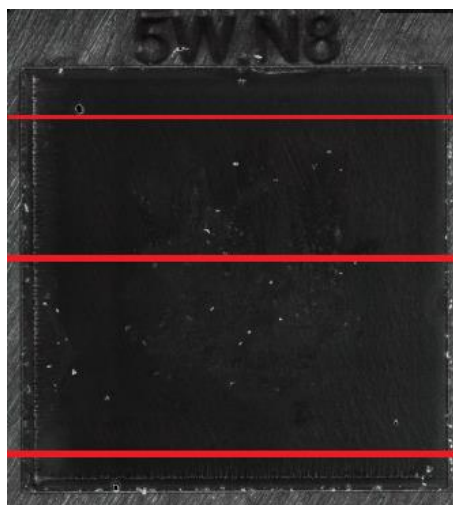
kdy hodnota ablačního prahu pro tyto konstantní parametry byla změřena z přechozích experimentů na $0,13 \text{ J/cm}^2$. Každý čtverec byl poté obroben jiným počtem pulzů v burstu v rozmezí od 1 do 10 pulzů. Výkon laseru byl před obrobením každých deseti čtverců podroben měření reálného výkonu. Podoba vytvořené matice čtverečků na vzorku je na Obr. 32.



Obr. 32 Pohled na jednu stranu VBD ze slinutého karbidu po obrobení šestnácti čtverců

4.5 Měření hloubky a průměrné výšky obrobených oblastí (Sa)

Po obrobení ploch byla provedena jejich analýza. Analýza se dělila po nasnímaní všech třiceti oblastí na dvě části. První část spočívala ve změření hloubky obrobených oblastí a druhá část se týkala vyhodnocení kvality obrobených čtverců pomocí parametru Sa. Měření hloubky bylo provedeno pomocí softwaru na třech různých místech u všech obrobených oblastí, jak je vidět na Obr. 33. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Příloha 1.



Obr. 33 Ilustrace úseků, v nichž bylo provedeno měření hloubky obrobených ploch

Po zjištění hloubek obrobených ploch byly vypočítány rychlosti úběru materiálu za jednu minutu pro každé nastavení burst módu dle rovnice (14). Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v Příloha 1.

$$U = \frac{a^2 \cdot H \cdot 10^{-3}}{\sigma} \quad (14)$$

Kde:

U je rychlost úběru [mm^3/min]

a je délka strany vypalovaného čtverce [mm]

H je průměrná hloubka obrobeného čtverce [μm]

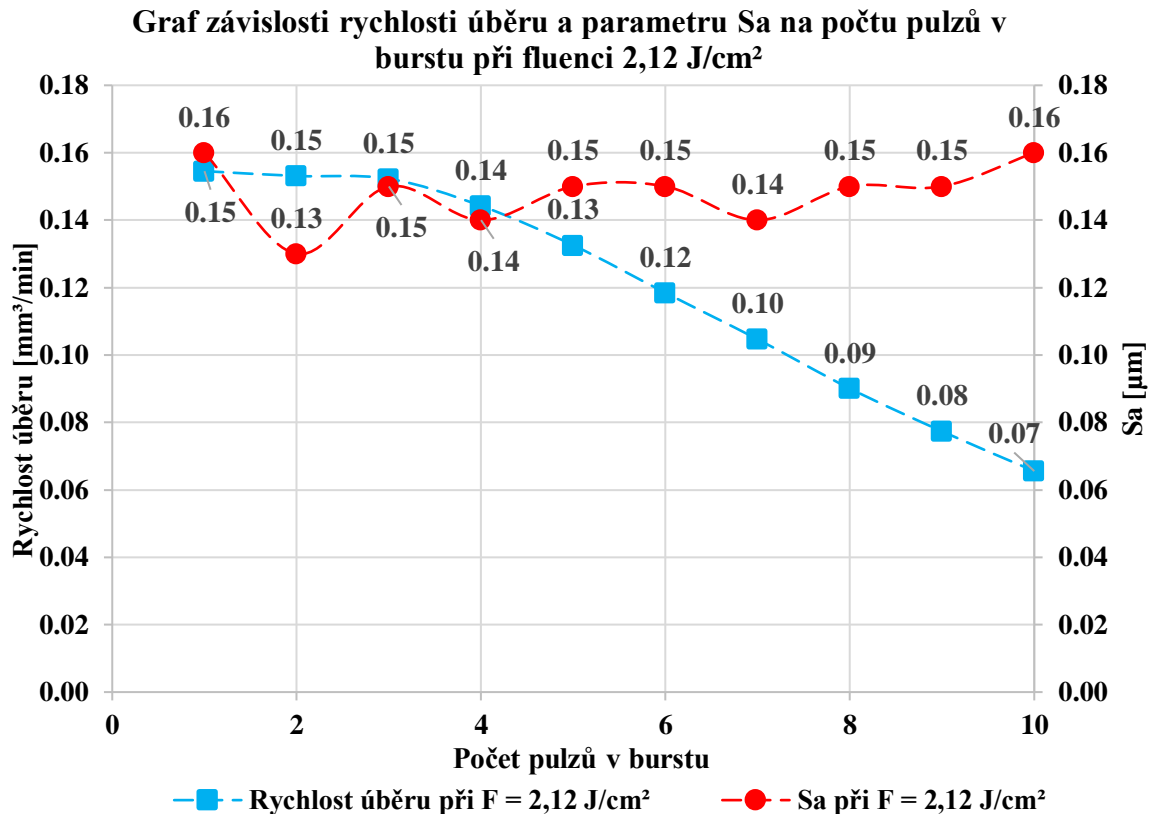
σ je doba trvání výpalu jedné plochy $\sigma = 1,13 \text{ min}$

Měření parametru S_a bylo rovněž provedeno pomocí softwaru, kde byl nejdříve vyrovnán povrch pro korekci vlnitosti a následně bylo provedeno měření průměrné výšky povrchu. Naměřené hodnoty jsou v tabulce v Příloha 1.

4.6 Vyhodnocení experimentu

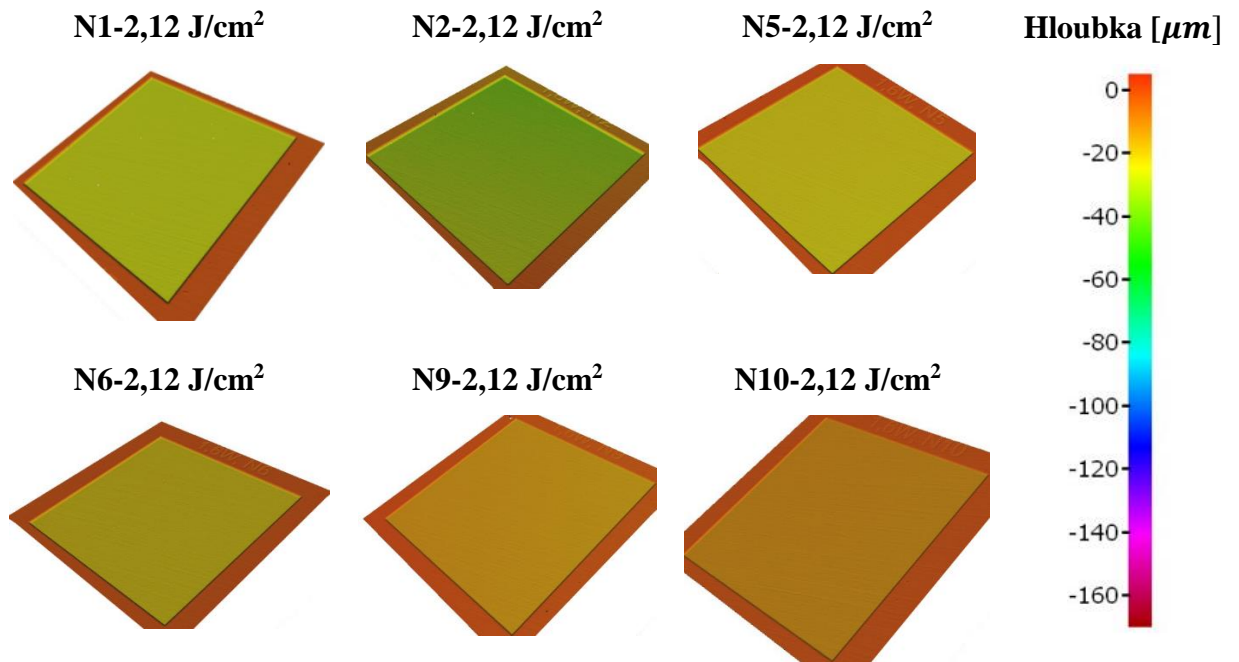
Vyhodnocení rychlosti úběru a drsnosti povrchu pro $F = 2,12 \text{ J/cm}^2$

Pro nastavení fluence na $2,21 \text{ J/cm}^2$ bylo dosaženo největší rychlosti úběru při použití jedno-pulzního režimu, kdy maximální rychlost úběru byla $0,15 \text{ mm}^3/\text{min}$. Poté se rychlost úběru postupně snižovala a to, až téměř o 55 % na hodnotu $0,07 \text{ mm}^3/\text{min}$ při použití deseti pulzů v burstu viz Obr. 34.



Obr. 34 Graf závislosti rychlosti úběru a parametru Sa na počtu pulzů v burstu při $F = 2,12 \text{ J/cm}^2$

Důvodem, proč nedošlo k navýšení rychlosti úběru byla s největší pravděpodobností nízká fluence. Pokud je fluence příliš nízká, pulzy mají nízkou energii v pulzu a nedokážou zcela vyčistit oblak plazmy vzniklý předchozím pulzem. Nad obráběnou plochou tedy zůstane část plazmatického oblaku, který částečně odstíní následující pulz. Zároveň následující pulzy interferují s rázovými vlnami vytvořených předešlými pulzy a ty také částečně odstíní následující pulzy. To poté vedlo ke snižování rychlosti úběru. Změny v dosažených hloubkách obrobených oblastí na VBD ze slinutého karbidu při fluenci $2,12 \text{ J/cm}^2$ jsou graficky znázorněny na Obr. 35. Kde je vidět postupné snižování hodnoty odebraného objemu.

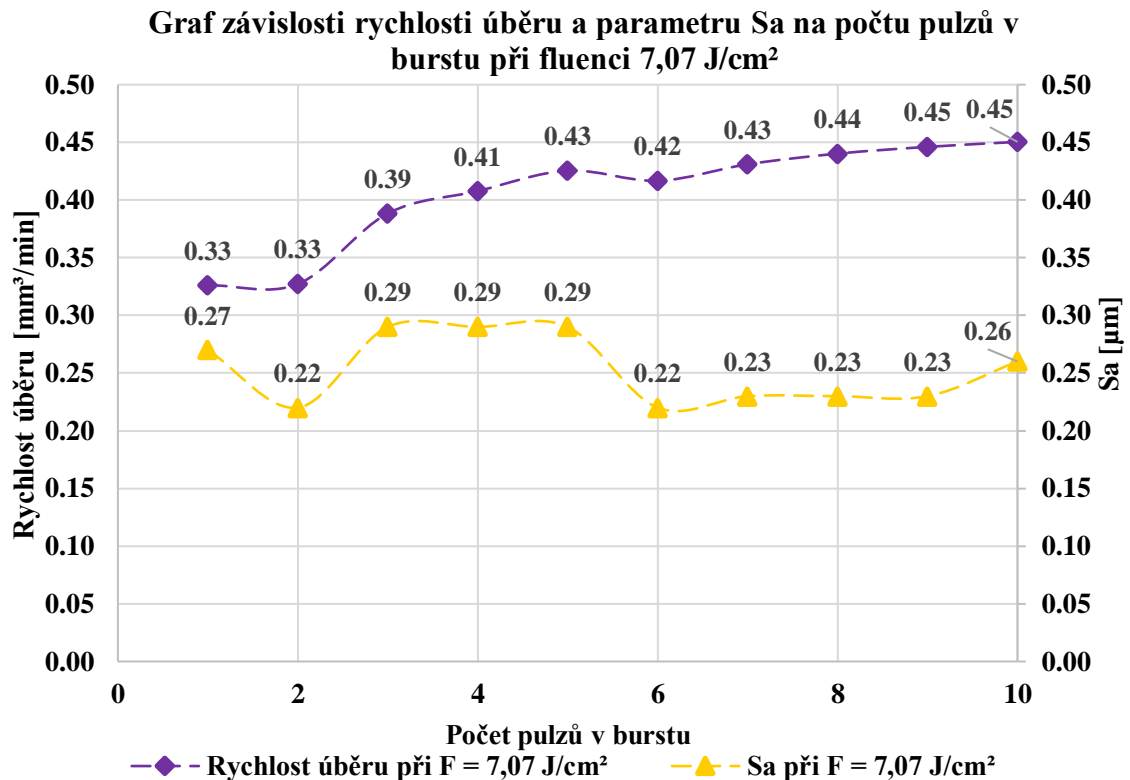


Obr. 35 Grafické znázornění odebraného objemu slinutého karbidu při $F = 2,12 \text{ J/cm}^2$

Kvalita povrchu daná parametrem S_a se pro fluence $2,12 \text{ J/cm}^2$ pohybovala okolo $0,15 \mu\text{m}$. Nejnižší hodnoty bylo dosaženo při použití dvou pulzů v burstě, kdy hodnota S_a byla $0,13 \mu\text{m}$ a nejvyšší $0,16 \mu\text{m}$ viz Obr. 34, které bylo dosaženo při deseti pulzech v burstě a při použití pouze jednoho pulzu. Příčinou nízké hodnoty parametru S_a byla opět nízká fluence. Jelikož při nízké fluence spolu s jevem plazmatického stínění došlo pravděpodobně pouze k odstranění nerovností na povrchu obrobku což vedlo k poklesu parametru S_a .

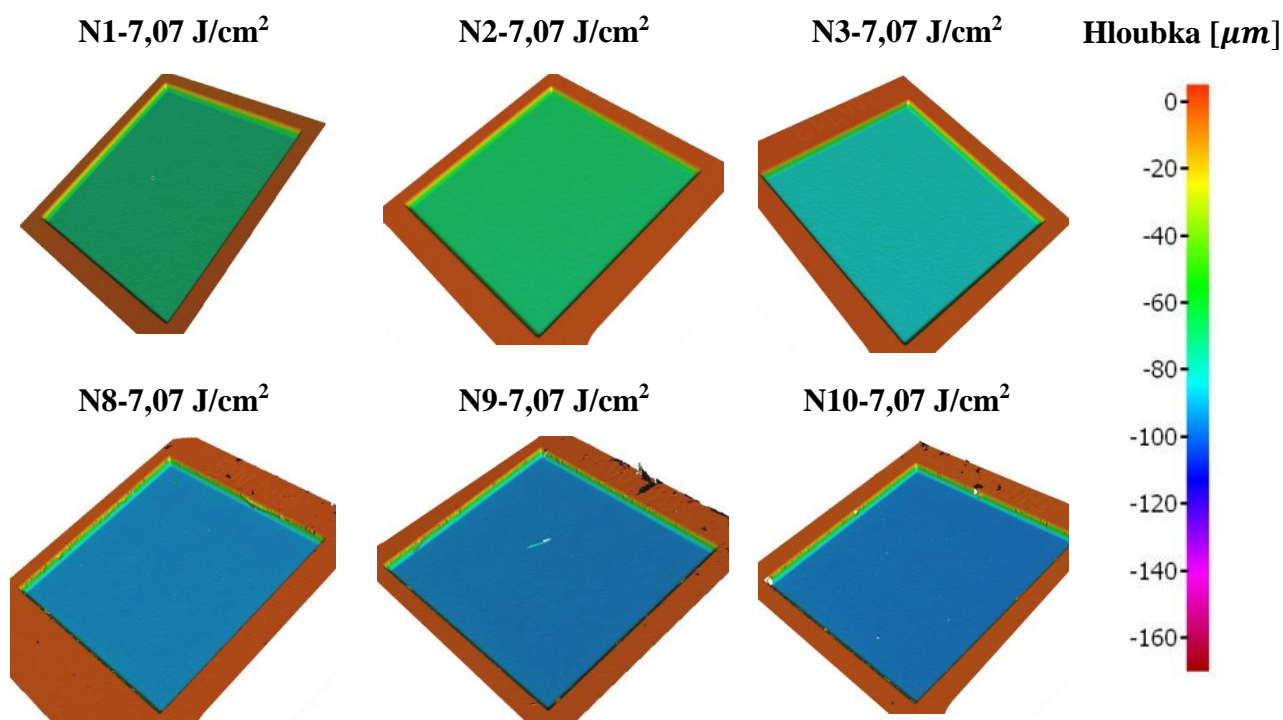
Vyhodnocení rychlosti úběru a drsnosti povrchu pro $F = 7,07 \text{ J/cm}^2$

Při použití fluence $7,07 \text{ J/cm}^2$ se rychlost úběru zvyšovala s počtem pulzů v burstu, jak je vidět na Obr. 36. I zde se pravděpodobně objevily jevy plazmatického stínění a interference rázových vln s pulzy popsané v kapitole 3.6.2.



Obr. 36 Graf závislosti rychlosti úběru a parametru Sa na počtu pulzů v burstu při $F = 7,07 \text{ J/cm}^2$

Avšak tyto jevy zde neměly skoro žádný vliv na rychlost úběru, jelikož jednotlivé pulzy v burstu měly dostatečnou energii v pulzu k vyčištění oblaku plazmy nad obráběnou plochou a zároveň překonaly i rázovou vlnu. Výjimkou bylo pouze nastavení se šesti pulzy v burstu, kdy rychlost úběru mírně poklesla na hodnotu $0,42 \text{ mm}^3/\text{min}$, ale při použití sedmi pulzů v burstu rychlost úběru opět narostla. Nejnižší rychlosti úběru bylo dosaženo při použití jedno-pulzního režimu a dvou pulzů v burstu, kde hodnota rychlosti úběru byla $0,33 \text{ mm}^3/\text{min}$ a nejvyšší hodnoty $0,45 \text{ mm}^3/\text{min}$ poté bylo dosaženo při burstu obsahující deset pulzů viz Obr. 36. Rychlost úběru materiálu při použití burstu s deseti pulzy byla o 36 % vyšší než při použití jednoho pulzu. Grafické znázornění odebraného objemu při použití jednotlivých nastavení počtů pulzů v burstu je poté vidět na Obr. 37.

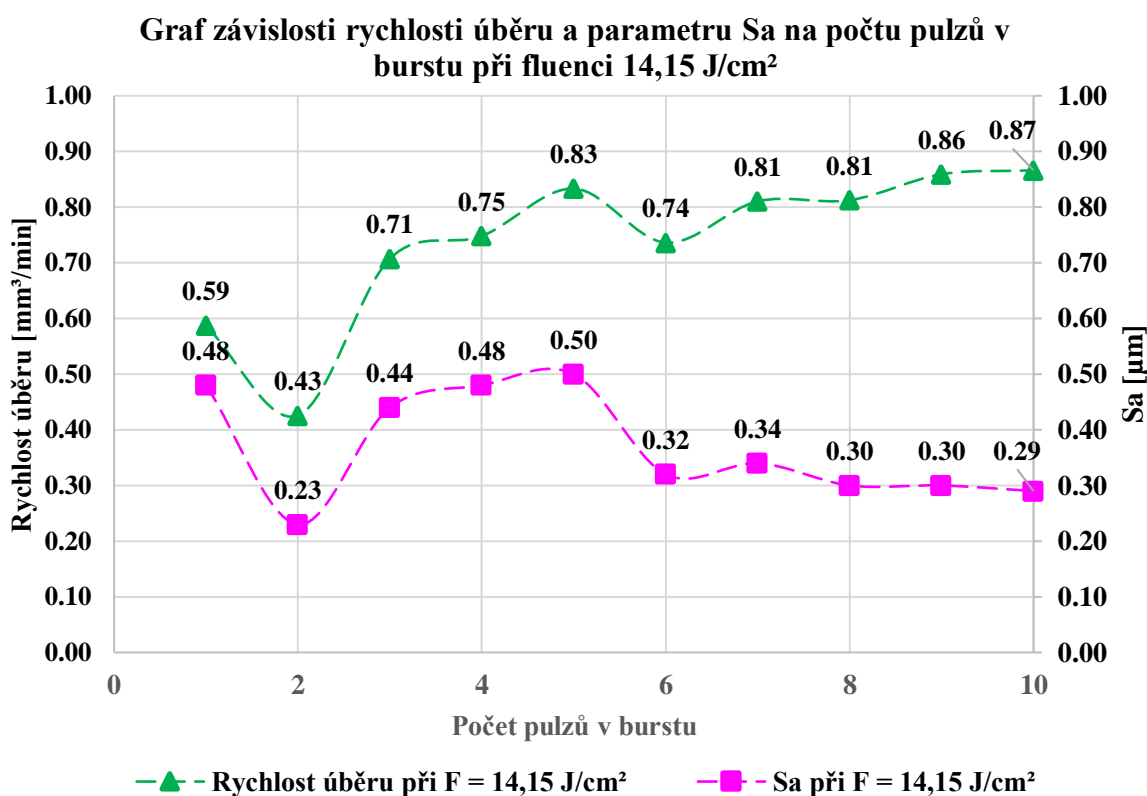


Obr. 37 Grafické znázornění odebraného objemu slinutého karbidu při $F = 7,07 \text{ J/cm}^2$

Dosahovaný parametr Sa pro fluence $7,07 \text{ J/cm}^2$ se pohyboval okolo hodnoty $0,25 \mu\text{m}$ viz Obr. 36. Příčinou zvýšení parametru Sa oproti nastavení s fluence $F = 2,12 \text{ J/cm}^2$ zapříčinilo nejspíše navýšení fluence a rozdílné teploty tání wolfram karbidu a kobaltu. Jelikož je teplota tání wolfram karbidu téměř dvakrát vyšší než teplota tání kobaltu, tak při posledním přejezdu nejspíše došlo hlavně odstranění kobaltu a menšímu úběru wolfram karbidu. Pravděpodobným odebráním hlavně kobaltu vznikly na povrchu nerovnosti, které poté zapříčinily nárůst parametru Sa. Nejnižší hodnoty poté bylo dosaženo při použití dvou a šesti pulzů v burstu, kdy Sa bylo $0,22 \mu\text{m}$, naopak nejvyšší hodnoty $\text{Sa}=0,29 \mu\text{m}$ bylo dosaženo při nastavení burstu obsahujícího tři, čtyři a pět pulzů viz Obr. 36.

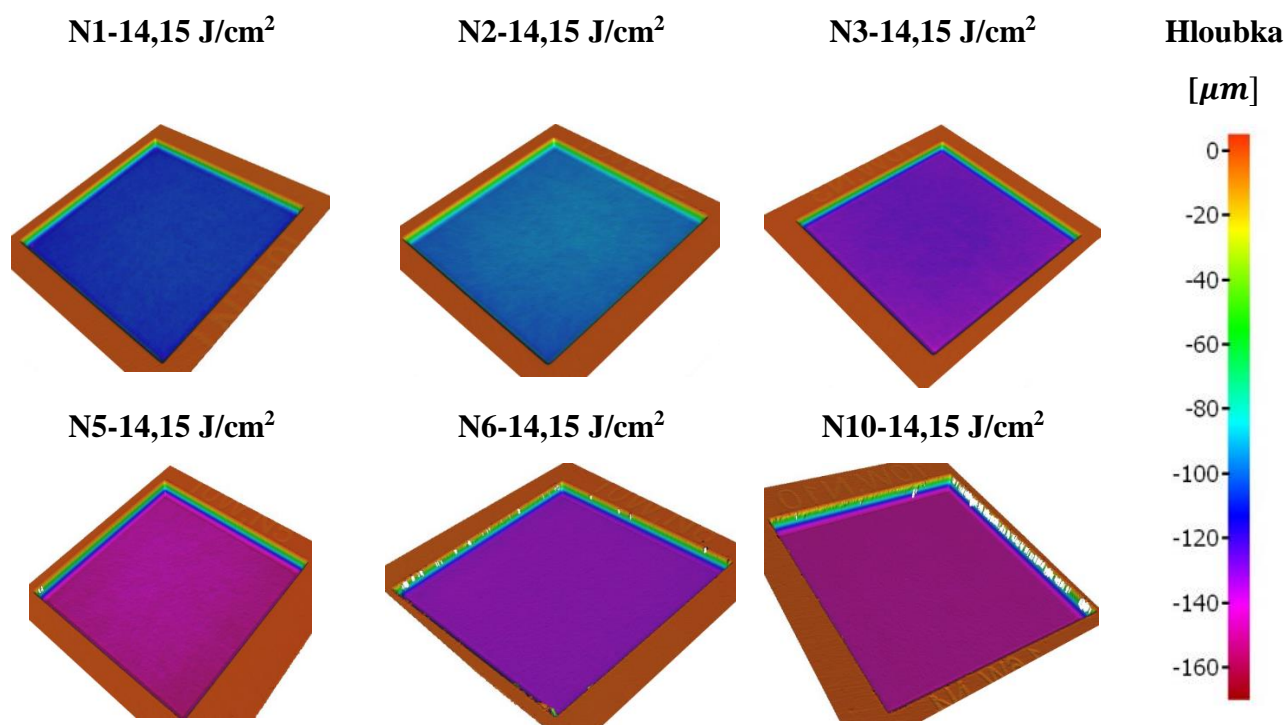
Vyhodnocení rychlosti úběru a drsnosti povrchu pro $F = 14,15 \text{ J/cm}^2$

Při zvýšení fluence na hodnotu $14,15 \text{ J/cm}^2$ se rychlost úběru opět zvýšila. Právě při tomto nastavení fluence byl nejvíce vidět jev plazmatického stínění spolu a interference rázových vln, které již byly popsány v kapitole 3.6.2. Kdy při dvou pulzech v burstu klesla rychlost úběru z $0,59 \text{ mm}^3/\text{min}$ dosažení jedno-pulzním režimem na hodnotu $0,43 \text{ mm}^3/\text{min}$, tento pokles je vidět na Obr. 39. Poté hodnota rychlosti úběru opět narostla na hodnotu $0,71 \text{ mm}^3/\text{min}$ viz Obr. 38.



Obr. 38 Graf závislosti rychlosti úběru a parametru Sa na počtu pulzů v burstu při $F = 14,15 \text{ J/cm}^2$

Poté rychlost úběru dále stoupala, až na hodnotu $0,83 \text{ mm}^3/\text{min}$ při pěti pulzech v burstu, ze které opět klesla na hodnotu $0,74 \text{ mm}^3/\text{min}$, které bylo dosaženo šesti pulzy v burstu. Dále pak rychlost úběru stoupala s rostoucím počtem pulzů až na nejvyšší hodnotu $0,87 \text{ mm}^3/\text{min}$ dosažené deseti pulzy v burstu. Nárůst rychlosti úběru při použití deseti pulzů v burstu oproti jedno-pulznímu režimu je téměř 47 %. Nárůst odebraného objemu slinutého karbidu lze poté pozorovat na Obr. 39.



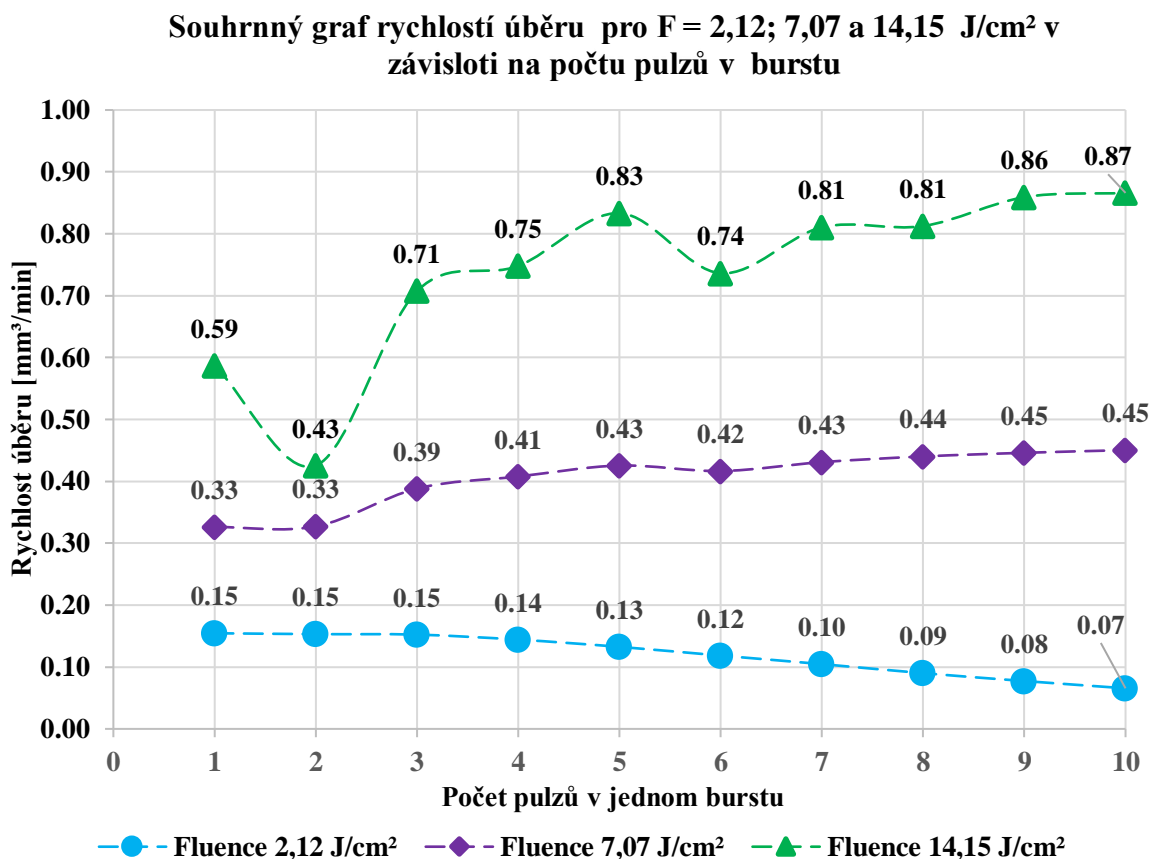
Obr. 39 Grafické znázornění odebraného objemu slinutého karbidu při $F = 14,15 \text{ J/cm}^2$

Při zvýšení fluence na $14,15 \text{ J/cm}^2$ byl parametr Sa naměřen vyšší než u předchozích dvou fluence pro každé nastavení počtu pulzů v burstu. Navýšení parametru Sa způsobila pravděpodobně redepozice materiálu, jelikož jednotlivé pulzy měly vysokou energii v pulzu, což způsobilo přenos části energie pulzu do tepla. Naakumulované teplo poté vytvořilo taveninu, kterou dopadající pulzy rozstříkly do okolí, tavenina však nevyrovnala povrch, ale po její ztuhnutí vytvořila nerovnosti. Takto vzniklé nerovnosti zapříčinily zvýšení parametru Sa. Nejnižší hodnota Sa byla naměřena $0,23 \text{ μm}$ při použití dvou pulzů v burstu, naopak nejvyšší hodnota $0,5 \text{ μm}$ byla naměřena při pěti pulzech burstu viz Obr. 38.

4.7 Shrnutí výsledků experimentu

V rámci experimentu bylo realizováno celkem obrobena třicet ploch, pro tři nastavené fluence 2,12; 7,07; 14,15 J/cm², kde pro každé nastavení fluence bylo použito od 1 do 10 pulzů v burst módu. Tato kapitola obsahuje souhrnné grafy na Obr. 40 a Obr. 41, na kterých budou shrnuty výsledky experimentu.

Jak je vidět na Obr. 40, rychlost úběru se za použití burst módu zvyšovala s narůstající fluence (výkonem). S použitím sudého počtu pulzů v burstu byl zaznamenán pokles nebo jen mírný nárůst rychlosti úběru, naopak při použití lichých pulzů v burstu byl pozorován opětovný nárůst rychlosti úběru u fluence 14,15 J/cm². Tato zjištění korespondují s teoretickými zjištěními uvedenými v kapitolách 3.6.2, 3.6.3 a 3.6.4. Pro ostatní fluence s toto chování nepotvrdilo. Při fluence 7,07 J/cm² šlo spíše o přechodné chování a při 2,12 J/cm² bylo chování v rozporu s informacemi obsaženými v teoretické části.



Obr. 40 Souhrnný graf rychlostí úběru v závislosti na počtu pulzů v burstu a fluenci

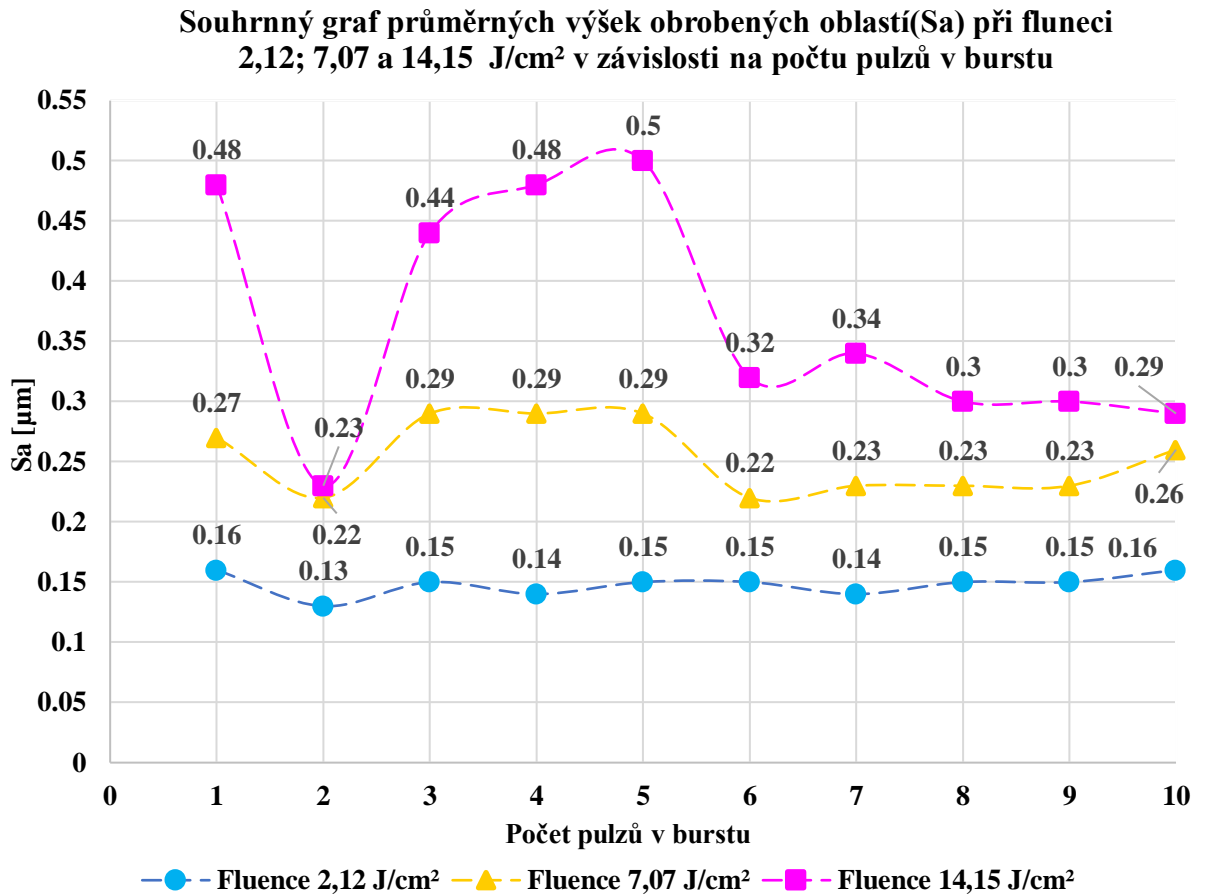
Nejnižší rychlost úběru bylo dosaženo při fluence 2,12 J/cm². Zároveň bylo zjištěno, že rychlost úběru se snižovala s rostoucím počtem pulzů v burstu. Pokles rychlosti úběru byl očekávaný při použití dvou pulzů v burstu a poté při každém dalším burstu obsahující

sudý počet pulzů, jelikož při použití dvou pulzů v burstu dochází k plazmatickému stínění a zároveň k interferenci rázové vlny s následujícím pulzem. Oba tyto jevy byly popsány v kapitole 3.6.2. Rychlost úběru by se měla pak opět navýšit při použití tří pulzů v burstu a následně pokaždé, když burst bude obsahovat lichý počet pulzů, avšak rychlost úběru dále klesala bez ohledu na lichém, či sudém počtu pulzů v burstu. Rychlost úběru klesla z hodnoty $0,15 \text{ mm}^3/\text{min}$ dosažené jedno-pulzním režimem na hodnotu $0,07 \text{ mm}^3/\text{min}$, která byla naměřena po použití deseti pulzů v burstu, což je pokles téměř o 55 %. Z tohoto výsledku lze vyvodit závěr, že použití burst módu není vhodné pro nízké fluence.

Opačné chování rychlosti úběru bylo naměřeno během použití fluence $7,07 \text{ J/cm}^2$, kdy rychlost úběru naopak rostla téměř lineárně se zvyšujícím počtem pulzů. Pouze při nastavení šesti pulzů v burstu, hodnota rychlosti úběru klesla z $0,43 \text{ mm}^3/\text{min}$ na $0,42 \text{ mm}^3/\text{min}$, poté však opět narůstala. Nejvyšší hodnoty rychlosti úběru $0,45 \text{ mm}^3/\text{min}$ bylo dosaženo deseti pulzy v burstu. Rychlost úběru pro fluence $7,07 \text{ J/cm}^2$ při použití burst módu narostla o 36 % oproti nastavení laseru využívající jedno-pulzní režim.

Při nejvyšší použité fluence $14,15 \text{ J/cm}^2$ byla rychlost úběru nejvyšší v porovnání s ostatními fluence. I zde se rychlost úběru zvyšovala s počtem pulzů v burstu až na dvě výjimky. Při použití dvou a šesti pulzů v burstu, kdy hodnoty rychlosti úběru klesly oproti předchozímu nastavení počtu pulzů. Právě během použití dvou pulzů v burstu byla naměřena nejnižší hodnota $0,43 \text{ mm}^3/\text{min}$. Rychlost úběru nabývala nejvyšší hodnoty $0,87 \text{ mm}^3/\text{min}$ při deseti pulzech v burstu. Při této fluence se ukázalo použití burst módu nejefektivnější z hlediska rychlosti úběru, jelikož hodnota dosažena deseti pulzy v burstu byla o 47 % vyšší než hodnota, které bylo dosaženo bez použití burst módu.

Na Obr. 41, lze vidět, že parametr Sa měl pro fluence 2,12 a 7,07 J/cm² téměř konstantní průběh, naopak více nepravidelný průběh parametru Sa byl naměřen při použití fluence 14,15 J/cm² jak je vidět na Obr. 41.



Obr. 41 Souhrnný graf průměrné výšky obrobených oblastí (Sa) v závislosti na počtu pulzů v burstu a fluence

Při použití fluence 2,12 J/cm² byla kvalita povrchu daná parametrem Sa nejlepší v porovnání s ostatními fluence. Odchytky mezi jednotlivými nastaveními počtu pulzů a parametrem Sa nabývaly hodnot v setinách mikrometru. Nejnížší hodnota parametru Sa 0,13 μm byla dosažena při dvou pulzech v burstu a nejvyšší hodnota 0,16 μm byla naměřena bez použití jedno-pulzním režimem a pro burst obsahující deset pulzů.

Při zvýšení fluence na 7,07 J/cm² také zvýšila hodnota parametru Sa oproti předchozímu nastavení fluence. Nejnížší hodnota 0,22 μm byla naměřena po obrobení oblasti dvěma a šesti pulzy v burstu, nejvyšší hodnoty 0,29 μm dosahoval povrch po použití třech; čtyř a pěti pulzů v burstu, kde byl pozorován až dvojnásobný nárůst Sa parametru oproti předchozímu nastavení fluence.

Po použití fluence $14,15 \text{ J/cm}^2$ byl naměřen parametr S_a vyšší než u přechozích dvou fluence. Naměřená hodnota byla až $0,5 \text{ } \mu\text{m}$ po obrobení oblasti pěti pulzy v burstu. Nejnižší hodnoty $0,23 \text{ } \mu\text{m}$ bylo poté dosaženo po použití dvou pulzů v burstu.

Z dosažených výsledků je patrné, že rychlost úběru materiálu se zvyšovala s rostoucí fluence a použití burst módu mělo pozitivní vliv na rychlost úběru jen u fluence $7,07$ a $14,15 \text{ J/cm}^2$. Při fluenci $2,12 \text{ J/cm}^2$ se použití burst módu ukázalo jako nevhodné, protože rychlost úběru klesala s rostoucím počtem pulzů v burstu viz Obr. 40. Co se týče naměřených hodnot parametru S_a je vidět, že nejvyšší a hodnoty parametru S_a bylo dosaženo dvěma pulzy v burstu při fluenci $2,12 \text{ J/cm}^2$. Zároveň po použití fluence $2,12 \text{ J/cm}^2$ byly hodnoty parametru S_a nejvyšší. Poté při každém zvýšení fluence se zvýšil i parametr S_a viz Obr. 41. Z toho vyplývá, že pro dosažení, co nejlepší kvality povrchu je vhodné použití burst mód při nízké fluenci. Avšak při nastavení burstu s deseti pulzy při fluence $14,15 \text{ J/cm}^2$ bylo možné zvýšit rychlost úběru až dvanáctkrát pouze s dvojnásobným zvýšení parametru S_a oproti fluence $2,12 \text{ J/cm}^2$ při použití burstu obsahující deset pulzů viz Obr. 40 a Obr. 41.

5 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá efektivitou procesu mikroobrábění slinutého karbidu s použitím burst módu oproti jedno-pulznímu režimu laseru.

V teoretické části byly popsána problematika týkající laserové technologie, fyzikální princip laseru spolu s vlastnostmi laserového záření a parametry laserového paprsku. Dále zde jsou popsány jednotlivé pracovní režimy laseru a interakce laserového paprsku s materiálem. Poté zde byl vysvětlen samotný burst mód, možnosti generace pulzů v burst-módu a způsoby interakce obráběného materiálu s laserem při použití různého počtu pulzů v burstu. Všechny tyto informace byly následně použity k návrhu experimentu.

Experimentální část spočívala v návrhu experimentu a jeho provedení s následným vyhodnocením výsledků. Celý experiment byl rozdělen na dvě části. První část byla realizace vzorků na pětiosém zařízení MASTER 1. Bylo vytvořeno celkem třicet ablovaných ploch (jeden až deset pulzů v módu pro každou ze tří fluence). V druhé části experimentu byla provedena analýza hloubky a kvality obrobených ploch vzorků, a to optickým mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5. Na základě nashromážděných dat z měření byly pak vypočteny rychlosti úběru. Následně byla rychlost úběru spolu s kvalitou povrchu pro jednotlivá nastavení burst módu převedena do grafů a byla provedena diskuze dosažených výsledků.

Z dosažených výsledků je závěr této bakalářské práce takový, že pro zvýšení rychlosti úběru při mikroobrábění slinutého karbidu je burst mód vhodný při vyšších hodnotách fluence. Použitím nejvyšší fluence byl zjištěn až dvanásobný nárůst rychlosti úběru při dvojnásobném zvýšení drsnosti v případě burstu s deseti pulzy oproti nejnižší fluence. Naopak pro zvýšení kvality povrchu je lepší použití burst módu s nižší fluence oproti pulznímu režimu laseru. Jelikož efektivita burst módu je závislá na mnoha parametrech, tak další výzkum týkající se této problematiky by se mohl zabývat optimalizováním těchto parametrů za účelem dalšího zvýšení efektivity mikroobrábění.

6 Reference

1. Laser - od objevu k průmyslovým aplikacím. Elektro [online]. 2005, č. 4 [cit. 2021-11-13].
Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26271
2. KOŘÁN, Ing. Pavel. *Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení* [online]. 2013,[cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
3. ŘASA, CSC., Ing. Jaroslav a Ing. Zuzana KEREČANINOVÁ, PH.D. *Nekonvenční metody obrábění – 4. díl* [online]. 19. 03. 2008 [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil>
4. *Obrábění laserem* [online]. [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1423>
5. TOWNSEND, Hortense. *Bohr Atom The Planetary Model of the Atom* [online]. 2018 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/13850311/>
6. HALEY, Daniel a Oliver PRATT. *Basic principles of lasers* [online]. 2017, 15. 11. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1472029917302424>
7. CZECHLASERS.CZ. *Laser* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://czechlasers.cz/studovna/laser-2/>
8. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Emise a absorpce světla* [online]. 2008, 11. 2. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla>
9. VOJTA, Filip. *PRINCIP LASERU* [online]. JCU [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>

10. , Narendra B. Dahotre a Sandip P. Harimkar. *Laser Fabrication and Machining of Materials* [online]. Springer Science, 2008, , 555 [cit. 2021-11-20]. ISBN 978-0-387-72343-3. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-72344-0>
11. LÁZNIČKA, Pavel. *Laserové mikroobrábění* [online]. BRNO, 2014 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85839. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.
12. LAPLŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. 2020 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/2785566-Laserove-technologie-v-praxi.html>
13. ELITEMODULE. *Co tím myslíš divergence laserového paprsku?* [online]. 2020 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <http://cz.elitemodule.com/info/what-do-you-mean-the-laser-beam-divergence-49491967.html>
14. DR. PASCHOTTA. *Polarization of Light* [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/polarization_of_light.html
15. SOCHOR, Václav. *Lasery a koherentní svazky* [online]. Praha: Academia, 1990 [cit. 2021-11-21]. ISBN 80-200-0354-1. Dostupné z: <https://doczz.cz/doc/58950/lasery-a-koherentn%C3%AD-svazky>
16. Adam Marchewka a osé Enrique Muñoz-Expósito. *Computer-Aided Laser-Fiber Output Beam 3D Spatial and Angular Design* [online]. 2020 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-8994/12/1/83/htm>
17. , Dr. Rüdiger Paschotta a . *Hermite–Gaussian Modes* [online]. [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/hermite_gaussian_modes.html
18. Dr. Rüdiger Paschotta a . *Beam Parameter Product* [online]. [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/beam_parameter_product.html

19. Girish Kelkar. *Laser Basics: Interactions with Materials* [online]. 2007 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.mddionline.com/news/laser-basics-interactions-materials>
20. Evangelina Tlamka. *Overview of Pulse power* [online]. 2020 [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <http://www.mibeercans.com/overview-of-pulse-power/>
21. RÜDIGER, Paschotta. Four-level and Three-level Gain Media. RP Photonics Encyclopedia [online]. b.r. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/four_level_and_three_level_gain_media.htm
22. BATYSTA, František. *Tajemství ELI - nejintenzivnějšího laseru světa* [online]. 2013 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <http://fyzu3v.fjfi.cvut.cz/current/web/prednasky/ELI.pdf>
23. BRABEC, Petr a Filip BARTŮŇEK. *Laser* [online]. 2013 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/fyzika-mikrosвета/laser>
24. BRABEC, Petr a Filip BARTŮŇEK. *Modely atomů* [online]. 2013 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/fyzika-mikrosвета/modely-atomua>
25. LUKÁŠ, Kachtík. *Lasery*. Lasery. [online]. 26.3.2013 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/>.
26. GREITEMANN, Jonas. Population Inversion can be Achieved in a Three-Level System. Chemistry libretexts [online]. California, b.r. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://chem.libretexts.org/Courses/Pacific_Union_College/Quantum_Chemistry/15%3A_Lasers%2C_Laser_Spectroscopy%2C_and_Photochemistry/15.04%3A_Population_Inversion_can_be_Achieved_in_a_Three-Level_System

27. DURDA, Tomáš. *Lasery a jejich využití v civilním/vojenském letectví* [online]. Brno: Bakalářská práce, 2016 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=127650
28. RÜTERING, Marus. *Lasery a jejich využití v civilním/vojenském letectví* [online]. 2011 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru>
29. ČERMÁK, Adam. *LASER v procesech mikroobrábění monolitních řezných nástrojů* [online]. 2017 [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/28413> . Dizertační práce. ZČU.
30. ŠPLÍCHAL, Ing. Jan. *Dělení materiálů laserovým paprskem je stále na vzestupu zájmu* [online]. 2020 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/svarovani-a-deleni-materialu/deleni-materialu-laserovym-paprskem-je-stale-na-vzestupu-zajmu-591>
31. VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. Úvod do laserové techniky. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1108-9.
32. RÜDIGER, Paschotta. *Pulsed Lasers* [online]. 2020 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/pulsed_lasers.html
33. RÜDIGER, Paschotta. *Q switching* [online]. 2020 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/q_switching.html
34. RÜDIGER, Paschotta. *Q switches* [online]. 2020 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/q_switching.html
35. RÜDIGER, Paschotta. *Ultrashort Pulses* [online]. [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/ultrashort_pulses.html

36. RÜDIGER, Paschotta. *Mode locking* [online]. [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/mode_locking.html
37. KRUEGER, Arnd a Philippe FÉRU. *Getting practical* [online]. [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://spie.org/news/getting-practical>
38. RÜDIGER, Paschotta. *Laser Ablation* [online]. 2020 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/laser_ablation.html
39. ZHANG, D. a L. GUAN. *Comprehensive Materials Processing* [online]. Elsevier, 2014 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080965321004064>
40. THORLABS. *Pulsed laser or CW laser, does it make a difference?* [online]. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/images/tabimages/Laser_Pulses_Power_Energy_Equations.pdf
41. GIANNUZZI, Giuseppe. *Laser micromachining with bursts of ultrashort pulses* [online]. 2018 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BARI ALDO MORO. <https://dottorato.fisica.uniba.it/wp-content/uploads/2018/11/GIANUZZIi.pdf>. Vedoucí práce Dott. Antonio Ancona, Prof. Vincenzo Spagnolo.
42. KRAMER, Thorsten, Zhang YIGMIN, Stefan REMUND, Beat JAEGGI, Andreas MICHALOWSKI, Lisa GRAD a Beat NEUENSCHWANDER. Increasing the Specific Removal Rate for Ultra Short Pulsed Laser-Micromachining by Using Pulse Bursts. *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering* [online]. 2017 [cit. 2022-02-04]. ISSN 10.2961/jlmn.2017.02.0011. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/320002262_Increasing_the_Specific_Removal_Rate_for_Ultra_Short_Pulsed_Laser-Micromachining_by_Using_Pulse_Bursts

43. RÜDIGER, Paschotta. *Burst mode lasers* [online]. 2020 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/burst_mode_lasers.html
44. ŽEMAITIS, Andrius, Paulis GEČYS, Martynas BARKAUSES, Gediminas RAČIUKAITS a Mindaugas GEDVILAS. *Highly-efficient laser ablation of copper by bursts of ultrashort tuneable (fs-ps) pulses* [online]. 2019 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48779-w>
45. Förster, Daniel & Faas, Sebastian & Gröninger, Stefan & Bauer, Franziska & Michalowski, Andreas & Weber, Rudolf & Graf, Thomas. (2018). Shielding effects and re-deposition of material during processing of metals with bursts of ultra-short laser pulses. *Applied Surface Science*. 440. 10.1016/j.apsusc.2018.01.297
46. FÖRSTER, Daniel J., Beat JÄGGI, Andreas MICHALOWSKI a Beat NEUENSCHWANDER. *Review on Experimental and Theoretical Investigations of Ultra-Short Pulsed Laser Ablation of Metals with Burst Pulses* [online]. Basel, Switzerland, 2021 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: doi: 10.3390/ma14123331
47. Metzner, D., Lickschat, P. & Weißmantel, S. Surface treatment on cobalt and titanium alloys using picosecond laser pulses in burst mode. *Appl. Phys. A* **127**, 8 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04179-w>
48. PAULI, Anton. Faster and Smoother Thanks to Laser Polishin: Ultra-short pulse lasers allow for improved surface finishing capabilities. *Laser Technik Journal* [online]. Weinheim, 2014 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: doi:10.1002/latj.20140004

49. GABE GUSS, Nah SHEN, Jeff D. BUDE, Snny Ly, WESLEY J. KELLER, Alexander M. RUBENCHIK, RALUCA NEGRES. Enhancement of laser material drilling using high-impulse multi-laser melt ejection. *Laser Technik Journal* [online]. Livermore, 2019 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: https://opg.optica.org/DirectPDFAccess/89AEE5D4-3E1C-4E95-BC135FDC0ABCF336_414992/oe-27-14-19864.pdf?da=1&id=414992&seq=0&mobile=no
50. BUTKUS, Simas, Vytautas JUKNA, Domas PAIPULAS, Martynas BARKAUSKAS a Valdas SIRUTKAITIS. Micromachining of Invar Foils with GHz, MHz and kHz Femtosecond Burst Modes. *Laser Technik Journal* [online]. Lithuania, 2020 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.3390/mi11080733>
51. Mikroobrábění. 20.1.2020 [online]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/mikroobrabeni/> "
52. LICKSCHAT, P., A. DEMBA a S. WEISSMANTEL,. *Ablation of steel using picosecond laser pulses in burst mode* [online]. 2017 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0743-y>
53. LICKSCHAT, Peter, WEISSMANTEL Steffen a METZNER Daniel. Laser micromachining of silicon and cemented tungsten carbide using picosecond laser pulses in burst mode: ablation mechanisms and heat accumulation. *Applied Physics A* [online]. 2019 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s00339-019-2755-x>
54. PROKEŠOVÁ, Bc. Lucie. *Vliv tepelné akumulace na laserové mikroobrábění* [online]. Plzeň, 2020 [cit. 2022-06-04]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/41585/1/DP_Prokesova.pdf. Diplomová. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Martan, Ph.D.

55. RÜDIGER, Paschotta. *Burst Mode Lasers* [online]. 2020 [cit. 2022-04-18].
Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/burst_mode_lasers.html
56. HLAVINKA, Bc. Josef. *Využití pokročilých funkcí laserového zařízení pro odstraňování povlaku* [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z:
https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/96770/F2-DP-2021-Hlavinka-Josef-DP_hlavinka_1794.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Zeman, PhD.
57. *Light conversion: Carbide - Unibody-Design Femtosecond Lasers for Industry and Science* [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z:
<https://lightcon.com/product/carbide-femtosecond-lasers/>
58. IntelliSCAN 14. *SCANLAB* [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z:
<https://www.scanlab.de/en/products/scan-systems/intelliscan/standard-series/intelliscan-14>
59. *InfiniteFocus G5* [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z:
https://www.uphf.fr/LAMIH/sites/fr.LAMIH/files/images/Platforms/Morphomeca/FR/FICHES/Alicona_IF_G5.pdf
60. E-Catalog: SNMN120408. *Tungaloy Corporation* [online]. [cit. 2022-04-22].
Dostupné
z: <https://catalog.tungaloy.com/Item.aspx?cat=6806969&fnum=1067&mapp=IS&GFSTYP=M&srch=1>
61. E-Catalog: TH 10 grade. *Tungaloy Corporation* [online]. [cit. 2022-04-22].
Dostupné z: <http://www.imc-companies.com/Tungaloy/TungaloyCatalog/Grade.aspx?grade=TH10&item=6816156&fnum=798&mapp=TH>

62. TUNGSTEN CARBIDE (WC) TC K10 Co BINDER ALLOY BALLS: TH 10 grade. *RGP BALLS* [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.rgpballs.com/en/tungsten-carbide-wc-tc-k10-co-binder-alloy-balls/>
63. MARCZAK, Jan, Jan KUSINSKI, Roman MAJOR, Antoni RYCYK, Antoni SARZYNSKI, Marek STRZELEC a Krzysztof CZYŻ. *Laser interference patterning of diamond-like carbon layers for directed migration and growth of smooth muscle cell depositions* [online]. 2014 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: doi:10.5277/oa140408
64. HENRY ROBINSON, Joseph, Ian ROBERT THOMAS ASHTON, Eric JONES, Peter FOX a Chris SUTCLIFFE. *The effect of hatch angle rotation on parts manufactured using selective laser melting* [online]. School of Engineering of Liverpool, 2019 [cit. 2022-04-23]. ISSN : 1355-2546. Dostupné z: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-06-2017-0111/full/pdf?title=the-effect-of-hatch-angle-rotation-on-parts-manufactured-using-selective-laser-melting>
65. DOC. ING. RÓBERT JANKOVÝCH, CSC., Doc. Ing. Róbert a Prof. Ing. Bohumil BUMBÁLEK, CSC. Výškové parametry textury povrchu. *MMSpektrum* [online]. 2014 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyskove-parametry-textury-povrchu>

7 Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 Základní části optického rezonátoru [3]	12
Obr. 2 Bohrov model atomu [24].....	14
Obr. 3 Schéma průběhu absorpce [23]	16
Obr. 4 Schéma průběhu spontánní emise [23].....	16
Obr. 5 Schéma průběhu stimulované emise [23]	17
Obr. 6 Schéma tří hladinového systému [22]	17
Obr. 7 Fáze vzniku laserového záření v optickém rezonátoru [2]	18
Obr. 8 Porovnání vlnových délek laserového záření, záření emitovaného žárovkou a xenonovou výbojkou [11].....	19
Obr. 9 Nekoherentní záření (a) a koherentní záření (b) [8]	20
Obr. 10 Schéma poloměru paprsku s úhlem divergence a dalšími parametry (upraveno) [12]	20
Obr. 11 Druhy lineární polarizace (vlevo) a druhy kruhové polarizace (vpravo) (upraveno) [14]	21
Obr. 12 Zobrazení základního modu TEM ₀₀ ve 3D [16].....	22
Obr. 13 Rozložení intenzity a tvaru záření pro Gaussovské paprsky [17]	23
Obr. 14 Parametry laserového paprsku v pulzním režimu [40]	25
Obr. 15 Tvorba ultrakrátkých pulzů pomocí metody mode-locking [37]	27
Obr. 16 Absorpce jednotlivých materiálů [30]	28
Obr. 17 Rozložení energie v pulzu u krátkých a ultrakrátkých pulzů [29]	29
Obr. 18 Příklad burst módu obsahující čtyři pulzy v jednom burstu (upraveno) [44]	30
Obr. 19 Schéma generování burstů pomocí metody pulse picking (upraveno) [42]	31
Obr. 20 Schéma generace burstů pomocí Michelsonových interferometrů (upraveno) [41]	33
Obr. 21 Interakce materiálu s laserovým pulzem při použití jednoho pulzu a burstu obsahující dva pulzy [46]	34
Obr. 22 Graf znázorňující objem ablovaného materiálu při požití tří pulzů v burstu u různých materiálů [46]	35
Obr. 23 Graf znázorňující objem ablovaného materiálu při požití více pulzů v burstu různých materiálů [46]	36

Obr. 24 Graf znázorňující objem ablované oceli na jeden burst při použití více pulzů v burstu [52].....	37
Obr. 25 Graf znázorňující objem ablovaného slinutého karbidu wolframu na jeden burst při použití více pulzů v burstu [53]	37
Obr. 26 Pracovní prostor laserového zařízení MASTER 1 [56].....	40
Obr. 27 Optický mikroskop Alicona InfiniteFocus G5 [59].....	42
Obr. 28 Vlevo Geometrie VBD s označením SNMN 120408 - TH10-Vpravo (b) VBD ze slinutého karbidu K10 [60].....	43
Obr. 29 Schématické rozložení obráběných čtverečků na VBD SNMN -120408 TH1044	
Obr. 30 Schématické znázornění překrytí pulzů [63]	45
Obr. 31 Zvolená strategie šrafování: vlevo – natočení šrafování pro první přejezd; vpravo–natočení šrafování pro druhý přejezd	46
Obr. 32 Pohled na jednu stranu VBD ze slinutého karbidu po obrobení šestnácti čtverců	48
Obr. 33 Ilustrace úseků, v nichž bylo provedeno měření hloubky obrobených ploch	48
Obr. 34 Graf závislosti rychlosti úběru a parametru Sa na počtu pulzů v burstu při $F = 2,12 \text{ J/cm}^2$	50
Obr. 35 Grafické znázornění odebraného objemu slinutého karbidu při $F = 2,12 \text{ J/cm}^2$	51
Obr. 36 Graf závislosti rychlosti úběru a parametru Sa na počtu pulzů v burstu při $F = 7,07 \text{ J/cm}^2$	52
Obr. 37 Grafické znázornění odebraného objemu slinutého karbidu při $F = 7,07 \text{ J/cm}^2$	53
Obr. 38 Graf závislosti rychlosti úběru a parametru Sa na počtu pulzů v burstu při $F = 14,15 \text{ J/cm}^2$	54
Obr. 39 Grafické znázornění odebraného objemu slinutého karbidu při $F = 14,15 \text{ J/cm}^2$	55
Obr. 40 Souhrnný graf rychlostí úběru v závislosti na počtu pulzů v burstu a fluenci ...	56
Obr. 41 Souhrnný graf průměrné výšky obrobených oblastí (Sa) v závislosti na počtu pulzů v burstu a fluence.....	58
Tab. 1 Vybrané parametry galvo skenovací hlavy IntelliSCAN14 od firmy SCANLAB [58]	41
Tab. 2 Vybrané parametry laserového zdroje Carbide light conversion CB3-40 W [57]	41

Tab. 3 Vybrané parametry optického mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5 [59]	42
Tab. 4 Rozměry VBD SNMN 120408 [60].....	43
Tab. 5 Chemické složení a vlastnosti slinutého karbidu s označením K10 [62]	43
Tab. 6 Konstantní parametry během experimentu	46
Tab. 7 Proměnné parametry během experimentu	47
Tab. 8 Naměřené hloubky obroběných oblastí pro $F = 2,12 \text{ J/cm}^2$	73
Tab. 9 Naměřené hloubky obroběných oblastí pro $F = 7,07 \text{ J/cm}^2$	73
Tab. 10 Naměřené hloubky obroběných oblastí pro $F = 14,15 \text{ J/cm}^2$	74
Tab. 11 Naměřené hodnoty S_a pro $F = 2,12; 7,07$ a $14,15 \text{ J/cm}^2$	74
Tab. 12 Vypočítané rychlosti úběru pro $F = 2,12; 7,07$ a $14,15 \text{ J/cm}^2$	75

Příloha 1

Tab. 8 Naměřené hloubky obrobených oblastí pro $F = 2,12 \text{ J/cm}^2$

Fluence 2,12 J/cm ² (1,5 W)				
Počet pulzů /měření	1	2	3	Průměrná hloubka [μm]
N1	28,57	27,97	27,53	28,02
N2	27,88	27,8	27,61	27,76
N3	27,62	27,72	27,5	27,61
N4	26,19	26,26	26,01	26,15
N5	24,1	24,18	23,82	24,03
N6	21,58	21,41	21,44	21,48
N7	18,84	19,07	19,02	18,98
N8	16,32	16,13	16,54	16,33
N9	14,04	14	14,03	14,02
N10	11,9	11,87	11,89	11,89

Tab. 9 Naměřené hloubky obrobených oblastí pro $F = 7,07 \text{ J/cm}^2$

Fluence 7,07 J/cm ² (5 W)				
Počet pulzů /měření	1	2	3	Průměrná hloubka [μm]
N1	69,42	69,5	69,83	69,58
N2	69,97	69,27	70,18	69,81
N3	82,81	82,731	83,02	82,85
N4	87,08	86,97	86,92	86,99
N5	91,04	90,87	90,4	90,77
N6	88,9	89,12	88,64	88,89
N7	92,26	92,11	91,47	91,95
N8	94,1	93,8	93,84	93,91
N9	95,51	95,09	94,9	95,17
N10	96,43	95,93	95,9	96,09

Tab. 10 Naměřené hloubky obrobených oblastí pro $F = 14,15 \text{ J/cm}^2$

Fluence 14,15 J/cm ² (10 W)				
Počet pulzů /měření	1	2	3	Průměrná hloubka [μm]
N1	106,21	105,88	107,26	106,45
N2	96,273	96,23	97,50	96,67
N3	128,99	127,65	128,21	128,28
N4	135,92	134,43	136,64	135,66
N5	150,93	150,54	151,84	151,10
N6	133,95	133,55	133,02	133,51
N7	147,24	146,9	146,74	146,96
N8	147,84	147,1	147,04	147,33
N9	155,90	155,93	155,65	155,79
N10	157,46	157,05	156,6	157,04

Tab. 11 Naměřené hodnoty S_a pro $F = 2,12; 7,07$ a $14,15 \text{ J/cm}^2$

	Fluence 2,12 J/cm ²	Fluence 7,07 J/cm ²	Fluence 14,15 J/cm ²
Počet pulzů	S_a [μm]		
N1	0,16	0,27	0,48
N2	0,13	0,22	0,23
N3	0,15	0,29	0,44
N4	0,14	0,29	0,48
N5	0,15	0,29	0,50
N6	0,15	0,22	0,32
N7	0,14	0,23	0,34
N8	0,15	0,23	0,30
N9	0,15	0,23	0,30
N10	0,16	0,26	0,29

Tab. 12 Vypočítané rychlosti úběru pro $F = 2,12; 7,07$ a $14,15 \text{ J/cm}^2$

Rychlost odebíraného materiálu [mm^3/min]			
Počet pulzů	Fluence 2,12 J/cm^2	Fluence 7,07 J/cm^2	Fluence 14,15 J/cm^2
N1	0,155	0,326	0,587
N2	0,153	0,327	0,426
N3	0,152	0,388	0,707
N4	0,144	0,408	0,748
N5	0,133	0,425	0,833
N6	0,118	0,417	0,736
N7	0,104	0,431	0,810
N8	0,091	0,440	0,812
N9	0,077	0,446	0,859
N10	0,0656	0,450	0,866