

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



DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MIKROOBRÁBĚNÍ LASEREM TANGENCIÁLNÍM PŘÍSTUPEM  
LASER MICROMACHINING BY THE TANGENTIAL APPROACH

AUTOR:	Bc. Matěj Hála
STUDIJNÍ PROGRAM:	Výrobní inženýrství
VEDOUCÍ PRÁCE:	doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
KONZULTANT:	Ing. Adam Čermák, Ph.D.

PRAHA 2024

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hála** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **491752**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Mikroobrábění laserem tangenciálním přístupem**

Název diplomové práce anglicky:

**Laser micromachining by the tangential approach**

Pokyny pro vypracování:

1. Princip technologie mikroobrábění laserem
2. Interakce paprsku s materiálem jeho ablace
3. Popis tangenciálního přístupu mikroobrábění
4. Vlastní experiment vlivu nastavení tangenciálního přístupu na efektivitu ablace
5. Zhodnocení přínosů

Seznam doporučené literatury:

- [1] CHENG, Jian, Chang-sheng LIU, Shuo SHANG, Dun LIU, Walter PERRIE, Geoff DEARDEN a Ken WATKINS. A review of ultrafast laser materials micromachining. 2013, 46, 88-102. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2012.06.037
- [2] Ganeev, Rashid. (2013). Laser - Surface Interactions. 10.1007/978-94-007-7341-7.
- [3] DAHOTRE, Narendra B. a Sandip P. HARIMKAR. Laser fabrication and machining of materials. New York, N.Y.: Springer, c2008. ISBN 9780387723440.
- [4] Advances in Laser Materials Processin - Woodhead Publishing (2017). ISBN 9780081012529, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101252-9.09990-8>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081012529099908>)

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

**Ing. Adam Čermák, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS**

Datum zadání diplomové práce: **03.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2024**

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

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

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

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou 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:	Bc. Matěj Hála
Název práce:	Mikroobrábění laserem tangenciálním přístupem
Rozsah práce:	111 stránek, 81 obrázků, 20 tabulek, 13 grafů
Akademický rok:	2023/2024
Univerzita:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Vedoucí práce:	doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Adam Čermák, Ph.D.
Klíčová slova:	laser, mikroobrábění, tangenciální mikroobrábění, ultra krátké pulzy, burst mód, ablace, soustružení, slinutý karbid
Anotace:	<p>Cílem diplomové práce je vyšetření celkem tří přístupů s různým nastavením laserových zdrojů k tangenciálnímu laserovému soustružení a zhodnocení, který z těchto přístupů by byl nejvíce efektivní pro hrubovací operace při laserovém soustružení. Jako experimentální materiál byl použit slinutý karbid od výrobce Ceratizit. Pro obrobění jednotlivých vzorků bylo použito laserové zařízení MASTER 1 s nanosekundovým a femtosekundovým laserovým zdrojem. K vyhodnocení výsledků byl použit optický 3D mikroskop InfiniteFocus G5, kterým byl změněn dosažený průměr a drsnost povrchu jednotlivých vzorků po obrobění a laserový konfokální mikroskop Keyence VK-X 3000, kterým byla změřena velikost tepelně ovlivněných oblastí. Bylo zjištěno, že každý z přístupů je vhodnější pro jiné účely, avšak pro potřeby hrubovacích operací se ukázala jako nejefektivnější varianta kombinující přístup konvekčního soustružení s quasi-tangenciální polohou laserového paprsku vůči obrobku.</p>

# **Annotation**

Author's name:	Matěj Hála
Subject:	Laser micromachining by the tangential approach
Range of work:	111 p., 81 fig., tab. 20, graph 13
Academic year:	2023/2024
University:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Supervisor:	doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Consultant:	Ing. Adam Čermák, Ph.D.
Key words:	laser, micromachining, tangential micromachining, ultra short pulses, burst-mode, ablation, turning, sintered carbide
Annotation:	<p>The aim of the thesis is to investigate a total of three approaches with different laser source settings for tangential laser turning and to evaluate which of these approaches would be most effective for roughing operations in laser turning. Sintered carbide from the manufacturer Ceratizit was used as the experimental material. A MASTER 1 laser machine with a nanosecond and femtosecond laser source was used to machine each sample. To evaluate the results, an InfiniteFocus G5 3D optical microscope was used to change the achieved diameter and surface roughness of the individual samples after machining and a Keyence VK-X 3000 laser confocal microscope was used to measure the size of the thermally affected areas. Each approach was found to be suitable for different purposes, but for the purposes of roughing operations, the option combining the convection turning approach with a quasi-tangential position of the laser beam relative to the workpiece was found to be the most effective.</p>

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Adamovi Čermákovi, Ph.D. za odborné konzultace, věcné podněty a pomoc při realizaci a vyhodnocení experimentu. Dále bych také chtěl rád poděkovat svým rodičům a bratrovi, za jejich podporu během celého studia.

# Obsah

1	Úvod.....	11
2	Teoretický rozbor problematiky .....	12
2.1	Princip laseru .....	12
2.2	Vlastnosti laserového paprsku .....	13
2.3	Charakteristika laserového paprsku .....	15
2.4	Interakce laserového paprsku s materiálem .....	18
2.4.1	Absorptivita .....	19
2.5	Laserová ablace.....	20
2.5.1	Termální ablace.....	20
2.5.2	Atermální ablace .....	21
2.5.3	Optimální délka pulzu.....	22
2.5.4	Popis procesu ablace .....	23
2.5.5	Ablační práh.....	25
2.5.6	Hloubka ablace .....	25
2.6	Pulzní lasery v mikroobrábění .....	26
2.6.1	Pulzní lasery generující krátké pulzy .....	26
2.6.2	Pulzní lasery generující ultrakrátké pulzy .....	27
2.6.3	Pulzní lasery s burst módem .....	28
2.7	Způsoby laserového mikroobrábění.....	29
2.7.1	Radiální laserové mikroobrábění .....	30
2.7.2	Tangenciální laserové mikroobrábění.....	34
2.8	Laserové soustružení.....	36
2.8.1	Možnosti nastavení procesu tangenciálního laserového soustružení.....	37
2.9	Vliv parametrů na proces tangenciálního soustružení .....	39
2.9.1	Rozložení energie v pulzu.....	39
2.9.2	Velikost laserového paprsku .....	40
2.9.3	Poloha laserového paprsku .....	41
2.9.4	Procesní limitace tangenciálního soustružení .....	44
2.9.5	Geometrická limitace tangenciálního soustružení .....	45
2.9.6	Shrnutí současného stavu.....	45
3	Cíle práce .....	47
4	Vlastní experiment.....	48
4.1	Popis experimentu.....	48
4.2	Popis zařízení použitých při experimentu.....	48

4.2.1	Obráběcí laserová mikro stanice MASTER 1 PSGFRT .....	49
4.2.2	Vyhodnocovací zařízení .....	51
4.2.3	Pomocná zařízení .....	53
4.3	Testovaný materiál.....	54
4.4	Nastavení experimentu z pohledu procesních parametrů laseru.....	54
4.5	Realizace experimentu .....	55
4.5.1	Nastavení experimentu – tangenciální laserové soustružení – varianta A .....	55
4.5.2	Nastavení experimentu–tangenciální laserové soustružení – varianta B	57
4.5.3	Nastavení experimentu – vlastní přístup tangenciálního laserového soustružení – varianta C.....	58
4.6	Měření dosažených průměrů a drsnosti povrchů obroběných vzorků .....	59
4.7	Vyhodnocení experimentu .....	61
4.7.1	Vyhodnocení přístupu tangenciálního laserového soustružení dle varianty A .....	61
4.7.2	Vyhodnocení přístupu quasi-tangenciálního laserového soustružení- varianty B.....	65
4.8	Vyhodnocení tangenciálního laserového soustružení-varianta C-vlastní řešení .....	70
4.9	Shrnutí experimentu.....	74
5	Závěr .....	82
6	Reference .....	83
7	Seznam obrázků a tabulek .....	91
Příloha 1	.....	96
Příloha 2	.....	99
Příloha 3	.....	101



## Seznam použitých zkratek a symbolů

$A$	Absorptivita	$[-]$
$a_p$	Hloubka řezu	$[mm]$
$\vec{B}$	Vektor magnetické indukce	$[T]$
$D$	Průměr ablovaného bodu	$[mm]$
$D_0$	Počáteční průměr	$[mm]$
$D_1$	Dosažený průměr	$[mm]$
$D_p$	Požadovaný průměr	$[mm]$
$D_s$	Průměr laserového spotu	$[mm]$
$d_0$	Průměr laserového paprsku	$[mm]$
$E$	Energie	$[J]$
$\vec{E}$	Vektor elektrické indukce	$[V/m]$
$E_1$	Energie základního stavu	$[J]$
$E_2$	Energie metastabilního stavu	$[J]$
$E_3$	Energie excitovaného stavu	$[J]$
$E_p$	Energie v pulzu	$[J]$
$F$	Fluence	$[J/cm^2]$
$F_{th}$	Ablační práh	$[J/cm^2]$
$f_{rep}$	Opakovací frekvence	$[Hz]$
$f_b$	Frekvence jednotlivých burstů	$[Hz]$
$f_p$	opakovací frekvence pulzů uvnitř burstu	$[Hz]$
$f_{ot}$	Otáčkový posuv	$[mm/ot]$
$f_o$	Ohnisková vzdálenost	$[mm]$
$I_p$	Intenzita energie pulzu	$[W/cm^2]$
$L_0$	Délka obrobeného segmentu	$[mm]$
$M^2$	Parametr charakterizující kvalitu laserového paprsku	$[-]$
$m$	Počet interferometrů	$[-]$
$n$	Počet pulzů v burstu	$[-]$
$Offset$	Odsazení od kontury	$[mm]$
$n_p$	Počet přejezdů	$[-]$
$P_{avg}$	Průměrný výkon	$[W]$

$P_{peak}$	Špičkový výkon	[W]
R	Reflektivita	[–]
$R_O$	Rychlost otáčení	[ot/min]
$S_p$	Parametr překrytí pulzů	[%]
T	Transmisivita	[–]
$\Delta t$	Perioda	[s]
$t_o$	Doba trvání procesu	[s]
U	Minutový úběr	[mm <sup>3</sup> /min]
$v_c$	Řezná rychlost	[m/min]
$v_f$	Skenovací rychlost	[mm/s]
$\dot{y}_{crit}$	Kritická rychlost posuvu	[mm/s]
Z	Hloubka ostrosti	[mm]
$z_{abl}$	Hloubka ablace	[μm]
$w_0$	Poloměr laserového paprsku v ohnisku	[mm]
$\theta$	Polovina úhlu divergence	[mrad]
$\pi$	Ludolfovo číslo	[–]
$\delta$	Hloubka penetrace	[nm]
$\lambda$	Vlnová délka	[m]
$\tau_p$	Délka pulzu	[s]

# 1 Úvod

Miniaturizace je v dnešní době klíčovým prvkem technologického pokroku a je nezbytná pro zvýšení funkčnosti a zároveň pro úsporu prostoru nebo hmotnosti. A to v případě polovodičového průmyslu [1], biomedicínských aplikací [2], optického průmyslu [3] nebo strojírenství [3]. V těchto odvětvích je vyvíjen neustálý tlak na zmenšování rozměrů dílu, a to je výzvou jak pro výrobní metody, tak nástroje, aby došlo ke splnění požadované kvality a přesnosti finální součásti.

Konvenční mikroobrábění má v oblasti miniaturizace oproti laserovému mikroobrábění několik nevýhod. Při konvekčním mikroobrábění je úběr materiálu realizován stykem nástroje s obráběným materiálem, a tudíž vznikají během procesu mikroobrábění řezné síly, které mohou ovlivnit výslednou geometrii nebo jejich důsledkem může dojít k nevratnému poškození obrobku. Dalšími nevýhodami jsou poté opotřebení nástrojů a nemožnost obrábění křehkých materiálů.

Laserové mikroobrábění je nekonvenční metoda obrábění, která v dnešní době nahrazuje konvenční mikroobrábění v oblasti miniaturizace dílů, jelikož spojuje rychlost procesu s výbornou kvalitou povrchu a přesností finální součásti. Laserový paprsek je bezkontaktní univerzální nástroj, kterým lze obrábět široké spektrum materiálů, a to i ty materiály (keramika, sklo, diamant nebo polymery), které jsou konvenčními metodami těžko obrobitelné, jelikož pro laserový paprsek nejsou podstatné mechanické vlastnosti obráběného materiálu, ale jsou pro něj důležité fyzikální vlastnosti. Zároveň díky použití ultrakrátkých pulzních zdrojů lze miniaturní díly vyrobit s minimálními tepelnými účinky.

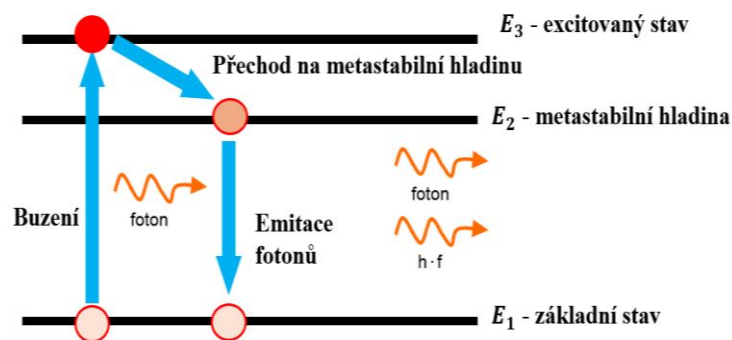
Laserové mikroobrábění rotačních dílů je však i v dnešní době poměrně obtížné, jelikož u běžného radiálního mikroobrábění je hloubka ablace jen těžko kontrolovatelná. Tento fakt následně ovlivňuje výslednou přesnost a kvalitu finálního dílu. Problém radiálního mikroobrábění řeší metoda laserového mikroobrábění, kdy laserový paprsek nedopadá kolmo na rotační součást, ale je veden tangenciálně (tečně) k ose rotace obrobku tzv. tangenciální laserové mikroobrábění, kterým se tato diplomová práce zabývá.

## 2 Teoretický rozbor problematiky

V teoretické části této diplomové práce je zpracována rešerše týkající se mikroobrábění laserem, a to hlavně z pohledu laserové technologie, interakce laserového paprsku s materiálem, procesu ablace. Dále jsou zde popsány jednotlivé druhy pulzních laserů využívající se v procesu mikroobrábění spolu se strategiemi rozmítání laserového paprsku. Stěžejní kapitolou teoretické části je poté samotná metoda tangenciálního laserového mikroobrábění s hodnocením současného stavu věnující se této metodě.

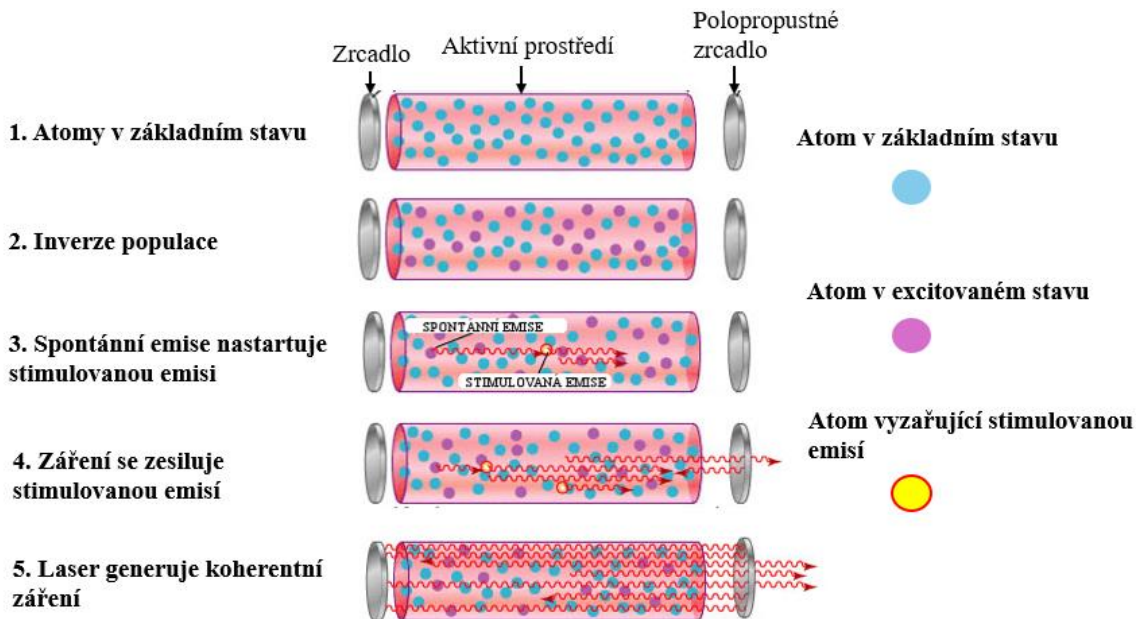
### 2.1 Princip laseru

Laser je zkratka anglického slovního spojení Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu z anglického jazyka znamená: zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laserové záření je elektromagnetické záření, jenž má specifické vlastnosti, mezi které patří koherentnost, monochromaticnost a malá divergence. Princip vzniku laserového záření je založen na přechodu atomů aktivního prostředí v optickém rezonátoru mezi třemi energetickými hladinami viz Obr. 1. [4][5][6][7][8][9][10][11][12]



Obr. 1 Schéma přechodu atomu mezi třemi energetickými hladinami (upraveno) [5]

Celý proces vzniku laserového záření je iniciován budícím zařízením (dioda, výbojka), které dodá atomům aktivního prostředí energii, a tím je uvede do excitovaného stavu ( $E_3$ ). Atomy po krátkém setrvání v excitovaném stavu přechází do metastabilní hladiny ( $E_2$ ), kde roste pravděpodobnost interakce atomů s dalšími fotony, které vznikly spontánní emisí, viz Obr. 2. [4][5][6][7][8][9][10][11][12]



Obr. 2 Proces generace laserového záření v optickém rezonátoru (upraveno) [5]

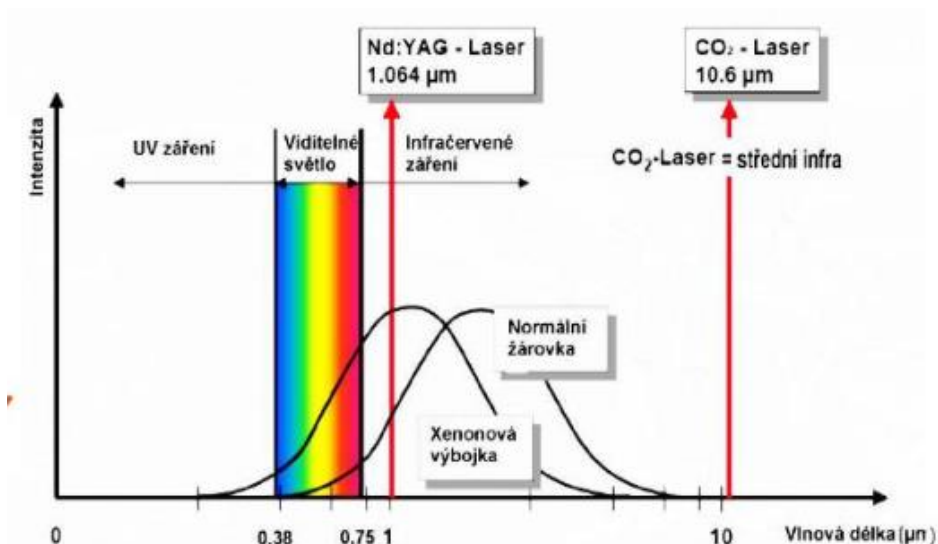
Pro generaci laserového záření je dále důležitá inverze populace, což lze popsat jako stav, při kterém se nachází více atomů v metastabilním stavu ( $E_2$ ) než v základním stavu ( $E_1$ ). Po nastolení inverze populace se při další excitaci atomů spustí lavinový efekt, při němž se atomy začnou vracet do základního stavu ( $E_1$ ) za pomoci emitace fotonů. Emitované fotony poté stimulují ostatní atomy v metastabilní hladině ( $E_2$ ), jenž opět emitují fotony což vede k zesilování záření. V optickém rezonátoru poté dochází k usměrnění fotonů mezi dvěma zrcadly, z nichž jedno je úplně odrazivé a druhé je polopropustné, tzn., že zanikají všechny fotony, jejichž směr šíření není rovnoběžný s osou optického rezonátoru viz Obr. 2. Dochází tak k vytvoření koherentního záření, které při překročení stanovené mezní hodnoty energie polopropustného zrcadla je vyzářeno ven do optické cesty. Ta se nejčastěji skládá ze soustavy povlakovaných zrcadel do galvo-skeneru, kde se nacházejí další dvě zrcadla, kterými lze laserový paprsek rozmítat v ose X a Y. Laserový paprsek poté opouští galvo-skener přes soustavu fokusačních čoček (F-theta čočka), která slouží k fokusaci laserového paprsku do pracovní roviny. [4][5][6][7][8][9][10][11][12]

## 2.2 Vlastnosti laserového paprsku

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, laserové záření je elektromagnetické záření se specifickou monochromatickostí, koherentností, malou divergencí a polarizací. Tyto vlastnosti odlišují od ostatních druhů záření.

### Monochromatickost

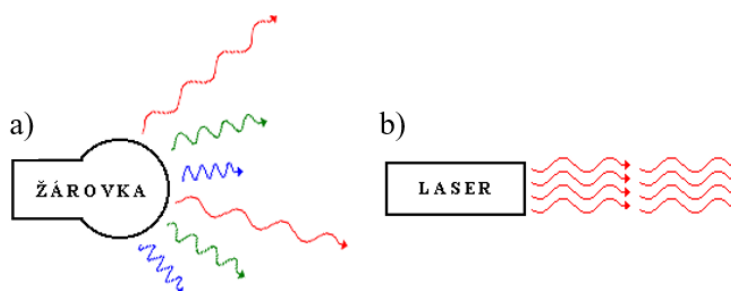
Laserový paprsek je monochromatický neboli jednobarevný, tzn., že fotony laserového paprsku mají stejnou frekvenci, resp. vlnovou délku na rozdíl od běžného světla viz Obr. 3. [4][9][12]



Obr. 3 Porovnání vlnových délek jednotlivých druhů záření [7]

## Koherentnost

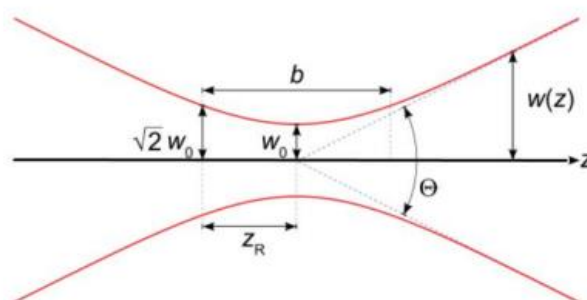
Koherentnost laserového paprsku znamená, že fotony mají stejnou vlnovou délku, směr šíření a stejný fázový posun v daném místě a čase viz Obr. 4. [4][9][12]



Obr. 4 Nekoherentní záření (a) a koherentní laserové záření (b) [10]

## Divergence (rozbíhavost) paprsku

Divergence představuje úhel, jenž charakterizuje rychlost zvětšování poloměru laserového paprsku v závislosti na vzdálenosti od výstupu z optického rezonátoru viz Obr. 5. Divergenci ovlivňuje vlnová délka, což vyplývá z rovnice (1), ze které je patrné, že úhel divergence klesá se zmenšující se hodnotou vlnové délky. [4][9][12][13]



Obr. 5 Schéma změny poloměru laserového paprsku na úhlu divergence (upraveno) [13]

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

Kde:

$\theta$  je polovina úhlu divergence [*mrad*]

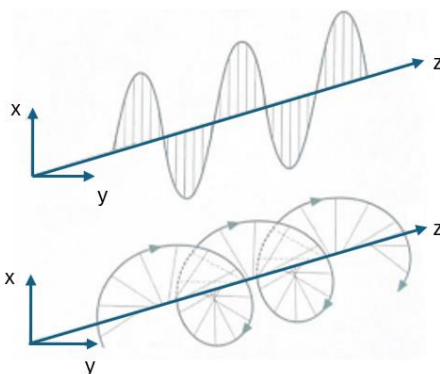
$\lambda$  je vlnová délka [*mm*]

$\pi$  je Ludolfovo číslo [–]

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

### Polarizace

Světlo je elektromagnetické záření, které je definováno dvěma vektory. Prvním z nich je vektor elektrické intenzity  $\vec{E}$  a druhým je vektor magnetické indukce  $\vec{B}$ . V případě, že tyto dva vektory kmitají vůči sobě kolmo ve směru šíření světla, je dané světlo polarizované. Laserové záření může být lineárně nebo kruhově polarizované viz Obr. 6, avšak může být i nepolarizované.[4] [9][14][15]



Obr. 6 Příklady lineární polarizace a kruhové polarizace (upraveno) [9]

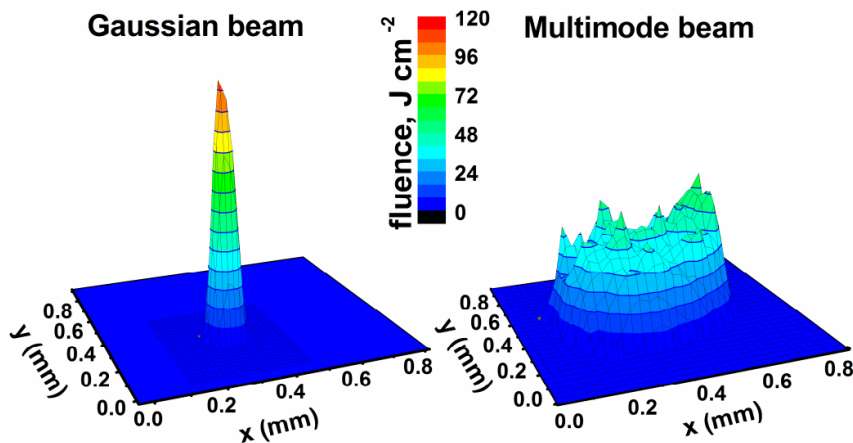
## 2.3 Charakteristika laserového paprsku

V této kapitole jsou popsány parametry laserového paprsku, jejichž nastavení a vzájemná kombinace má vliv na proces mikroobrábění.

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

Laserový paprsek se vyznačuje různými módy příčného rozložení intenzity tzv. TEM (transverse electromagnetic mode). TEM je charakterizován dvěma celými čísly,  $m$  a  $n$ , kde každé číslo udává rozložení intenzity laserového záření v jednom směru od osy optického rezonátoru. Tvar rozložení intenzity laserového záření je závislý na konstrukci optického rezonátoru. Základní mód používaný v laserovém mikroobrábění je TEM<sub>00</sub> viz Obr. 7, jehož průřez odpovídá Gaussově křivce. Zároveň má TEM<sub>00</sub> největší intenzitu kolem osy optického rezonátoru a je koncentrován do nejmenší plochy. V praxi se však používají i jiná rozložení intenzity v závislosti na konkrétní aplikaci, například Top-hat,

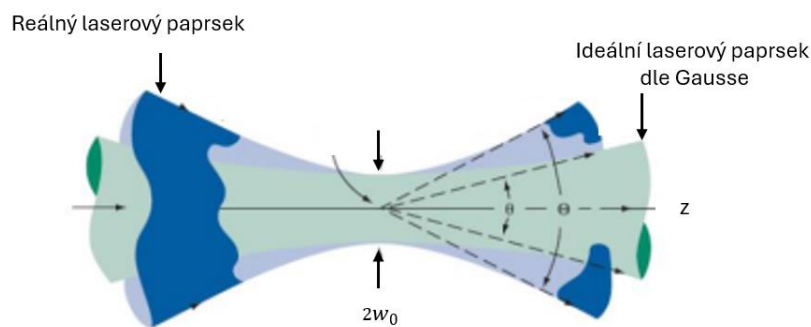
nebo Multimode viz Obr. 7, které vnáší energii do materiálu rovnoměrněji, a tudíž vytvářejí menší tepelně ovlivněnou zónu. [4][9][16][17][18][19][20]



Obr. 7 Gaussovo rozložení ( $TEM_{00}$ ) (vlevo) a Multimode rozložení (vpravo) [20]

## $M^2$ Faktor

Dalším parametrem laserového paprsku je tzv.  $M^2$  faktor, který udává kvalitu svazku. Tato veličina sleduje podíl mezi geometrickými vlastnostmi reálného svazku a ideálního paprsku dle Gaussova rozložení (kruhově symetrický svazek) pro stejnou vlnovou délku viz Obr. 8. Vlastnosti paprsku poté popisuje rovnice (2). [21][22][23]



Obr. 8 Rozdíl mezi reálným svazkem (modrá) a ideálním laserovým svazkem dle Gausse (zelená)(upraveno) [23]

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

Kde:

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

$w_0$  je počáteční poloměr paprsku [mm]

$\lambda$  je vlnová délka [mm]

$\pi$  je Ludolfovo číslo [–]



Ideální paprsek poté nabývá hodnoty  $M^2 = 1$ . Tomuto paprsku přísluší  $TEM_{00}$ , tato hodnota je minimální, dosažení hodnot menších než 1 je fyzikálně nemožné. Například pro vláknové lasery jsou hodnoty  $M^2 < 1,4$ . [21][22][23]

### **Fokusace laserového paprsku (laser spot)**

Fokusace laserového paprsku neboli laser spot je velikost zaostřeného laserového svazku. Dále tato hodnota udává velikost maximálního detailu, kterého lze dosáhnout při laserovém obrábění. Velikost průměru laserového svazku lze poté vypočítat pomocí rovnice (3). [9][24][25][26]

$$2 \cdot w_0 = \frac{2 \cdot f_o \cdot \lambda \cdot M^2}{D} \quad (3)$$

kde:

$2 \cdot w_0 = d_0$  je průměr spotu pro Gaussův paprsek [ $mm$ ]

$f_o$  je ohnisková vzdálenost [ $mm$ ]

$\lambda$  je vlnová délka [ $mm$ ]

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

$D$  je průměr laserového paprsku [ $mm$ ]

Pokud je však při výrobě požadován větší detail, lze laserový spot zmenšit pomocí zmenšení vlnové délky, viz vztah (3), nebo za použití optických komponent, které mají menší ohniskovou vzdálenost. Avšak při použití těchto komponent je průměr zaostřeného laserového paprsku nepřímo úměrný hloubce ostrosti, viz Obr. 9. Hloubku ostrosti označovanou jako DOF (depth of focus) lze vypočítat dle rovnice (4): [9][24][25][26]

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

Kde:

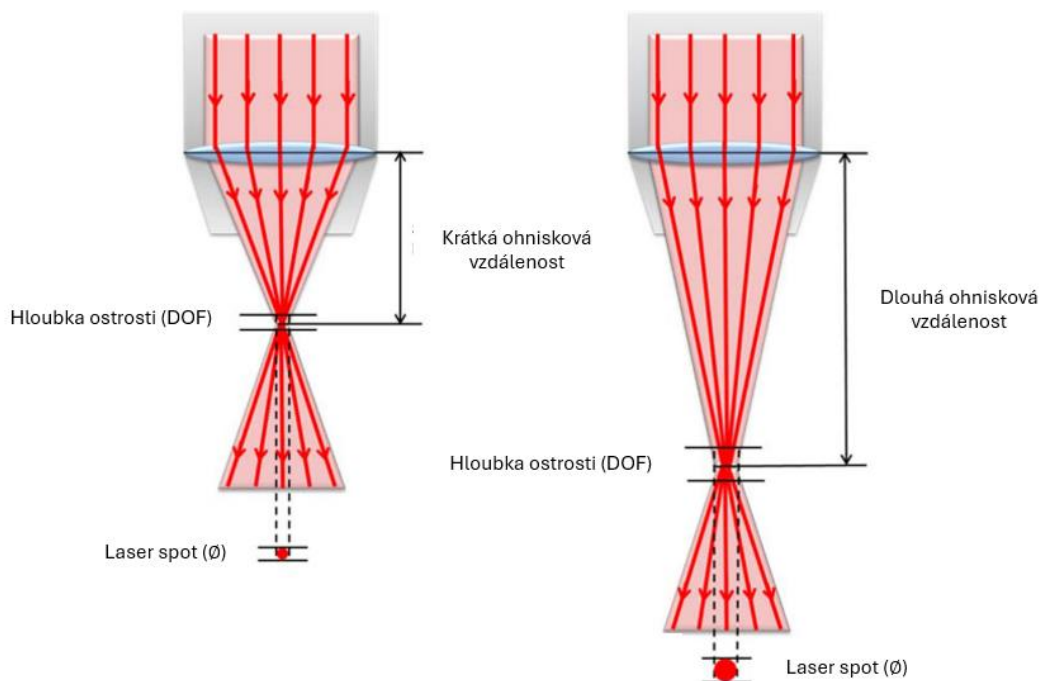
$Z$  je hloubka ostrosti [ $mm$ ]

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

$\lambda$  je vlnová délka [ $mm$ ]

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

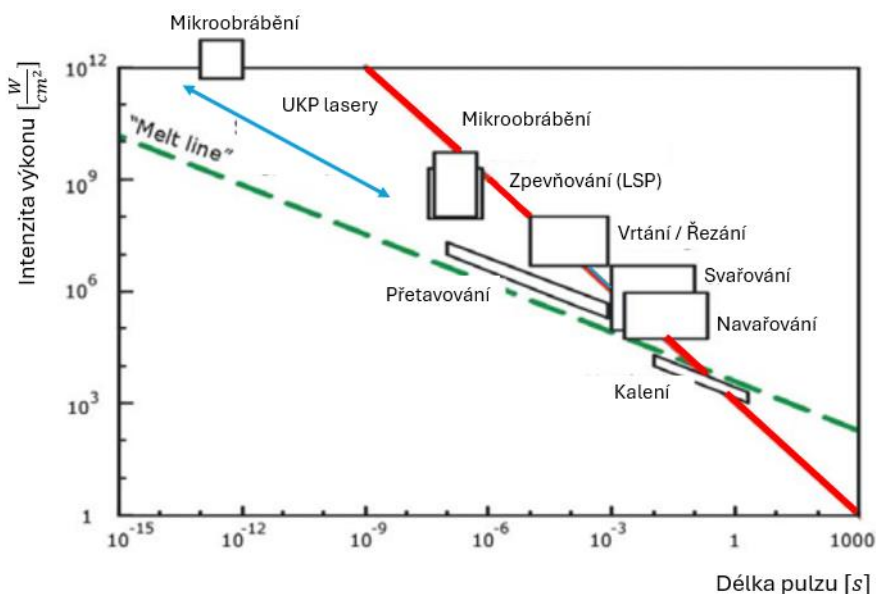
$\pi$  je Ludolfovo číslo [–]



Obr. 9 Změna hloubky ostrosti v závislosti na fokusační optice (upraveno) [26]

## 2.4 Interakce laserového paprsku s materiálem

Interakce laserového paprsku s materiálem je pro každý materiál unikátní. Klíčový faktor, který ovlivňuje interakci laserového paprsku s materiálem je absorptivita. Absorptivita udává, jak velká část laserového záření bude daným materiálem pohlcena. Dále závisí na vlnové délce, jelikož každý materiál interaguje s jinou vlnovou délkou. Dalšími neméně důležitými parametry jsou intenzita výkonu a délka pulzu, viz Obr. 10, kdy při výběru laserové technologie je nutné volit optimální kombinaci těchto dvou veličin.



Obr. 10 Závislost intenzity výkonu na délce pulzu pro jednotlivé laserové technologie (upraveno) [30]

Délka pulzu poté rozděluje termické procesy vyskytující se při interakci laserového paprsku s materiálem do dvou skupin. Pokud je délka pulzu v řádech mikrosekund či nanosekund, tak dochází především k přeměně energie pulzu na teplo a materiál se ohřívá a může docházet až k jeho tavení. Tyto délky pulzů se proto nejvíce využívají při sváření, kalení atd. Pro druhou skupinu jsou charakteristické délky pulzů v řádech pikosekund a femtosekund. Při takto krátkých délkách pulzů dochází pouze k minimálnímu přenosu tepla a nastává sublimace materiálu a proces, při kterém dochází k odpařování materiálu, se nazývá termální ablace. Tohoto procesu se poté využívá při laserovém mikroobrábění s minimální tepelně ovlivněnou oblastí. [9][11][27][28][29]

### 2.4.1 Absorptivita

Absorptivita je jedna z klíčových veličin, která ovlivňuje proces laserového mikroobrábění. Udává, jaké množství laserového záření je pohlceno materiálem tzn., že u toho množství záření nedochází k odrazu (reflexi) nebo průchodu (transmisi). Každý materiál má specifickou hodnotu absorpce a lze ji spolu s hodnotami transmisivity a reflektivity vypočítat dle vztahu (5). Faktory, které ovlivňují absorptivitu, jsou vlnová délka, směr dopadajícího laserového paprsku, drsnost a barva povrchu, chemické složení a uspořádání krystalové mřížky materiálu. [29][31][32]

$$A = 1 - R - T \quad (5)$$

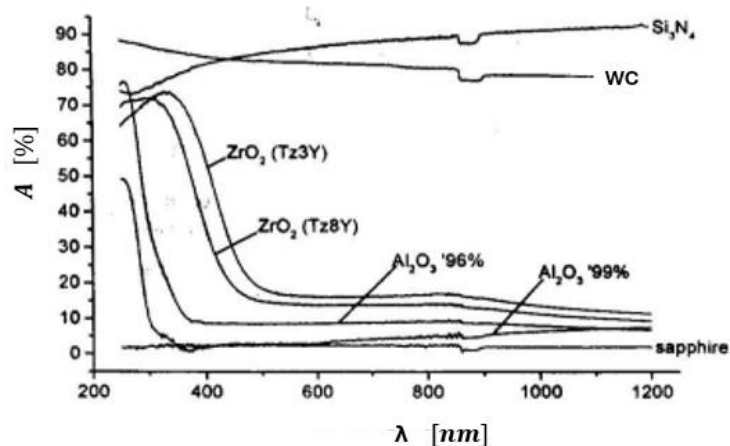
Kde

$A$  je absorptivita (pohltivost) [–]

$R$  je reflektivita (odrazivost) [–]

$T$  je transmisivita (propustnost) [–]

Nejdůležitější veličinou, která ovlivňuje absorptivitu, je vlnová délka laserového paprsku, jelikož každý materiál má jiný rozptyl elektromagnetického spektra, ve kterém má zvýšenou absorptivitu. Z toho důvodu je nutné volit vhodnou vlnovou délku, při které je absorptivita dopadajících fotonů nejvyšší. Obecně platí, že čím vyšší absorptivitu materiál má, tím je proces mikroobrábění efektivnější. [29][31][32]



Obr. 11 Graf absorptivity jednotlivých nástrojových materiálů (upraveno) [29]

Z grafu na Obr. 11 je patrné, že nástrojové materiály lépe absorbují kratší vlnové délky, ale slinuté karbidy a nitrid křemíku disponují dobrou absorptivitou i za použití delších vlnových délek. Zvýšení absorptivity jednotlivých materiálů lze docílit dvěma způsoby, prvním je povrchová úprava (zdrsnění, či povlakování povrchu), druhou metodou je poté úprava vlnové délky laserového záření pomocí laserového zdroje. Laserový zdroj je schopen generovat vlnové délky o dvojnásobku (II  $H-\lambda = 532 \text{ nm}$ ), trojnásobku (III  $H-\lambda = 355 \text{ nm}$ ) až čtyřnásobku (IV  $H-\lambda = 266 \text{ nm}$ ) základní emisní frekvence. Díky generování kratších vlnových délek lze poté mikroobrábět větší spektrum materiálů. Tento způsob však má jednu nevýhodu, a tou jsou vysoké pořizovací náklady na laserový zdroj. [29][31][32]

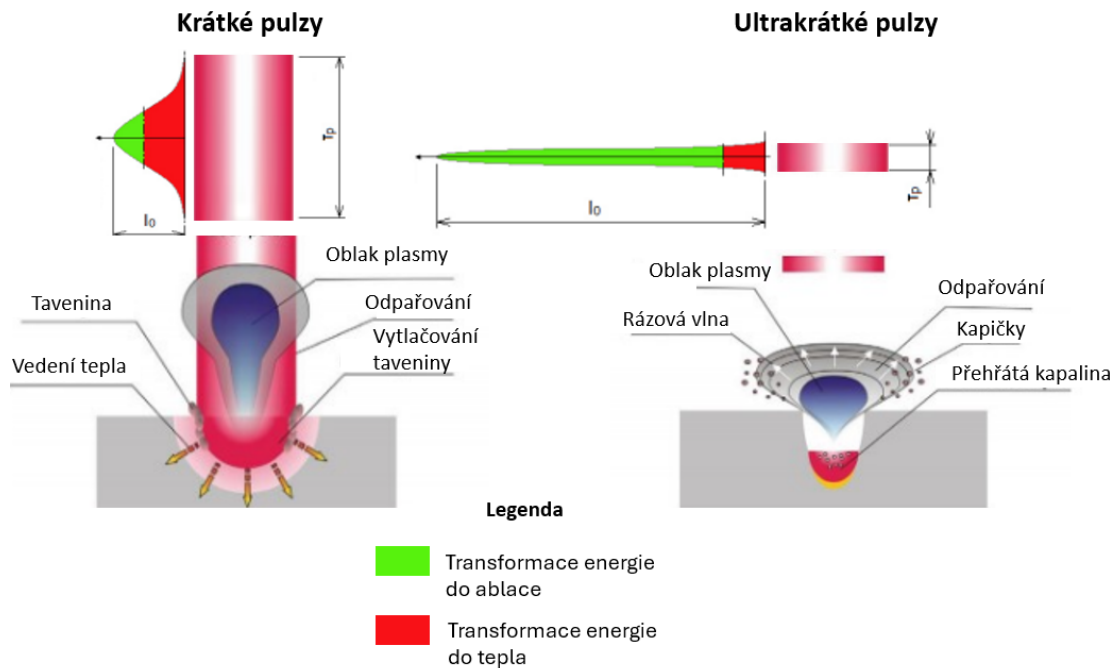
## 2.5 Laserová ablace

Laserová ablace je proces, při kterém dochází k odebírání materiálu vlivem absorpce laserového záření. Aby došlo k laserové ablaci, je nutné překročit tzv. ablační práh. Odebrané množství materiálu je poté závislé na mnoha veličinách, těmi nejpodstatnějšími pro laserovou ablaci jsou intenzita záření, materiálové vlastnosti (absorpce, tepelná vodivost a kapacita), výkon, vlnová délka a délka pulzů. Posledně zmíněná vlastnost laserového paprsku je pak klíčová pro rozdělení procesu laserové ablace na termální (tepelnou) ablaci a na atermální (studenou). [11] [29] [32] [33][34][35][36]

### 2.5.1 Termální ablace

Proces termální ablace je charakteristický jak pro lasery využívající kontinuální pracovní režim, tak pro pulzní lasery, které generují pulzy o délce  $\tau_p > 10 \text{ ps}$ . Během termální ablace dochází k absorpci energie laserového paprsku povrchem materiálu a dochází k látkové přeměně. Energie paprsku se z velké části přemění na teplo, dochází k tavení materiálu a následně k jeho odpařování či tvorbě plazmatu. Vlivem transformace velké části energie na teplo dochází v místě dopadu laserového paprsku k vytvoření tepelně ovlivněné oblasti tzv. HAZ (Heat Affected Zone). Tepelně ovlivněná zóna může vykazovat oxidaci, sníženou přesnost a další druhy degradace v materiálech s vysokou tepelnou vodivostí. Další nevýhodou je tvorba oblaku plazmatu, který brání v průchodu dalších pulzů, tzv. plazmatické stínění, kdy se část energie absorbuje a část odrazí. To má

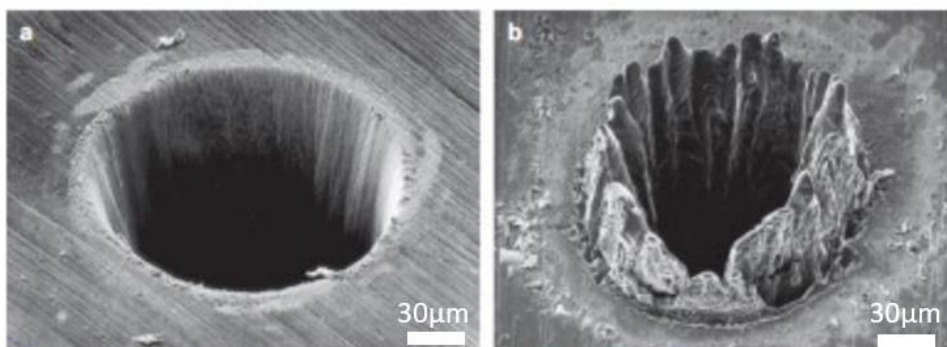
za následek snížení efektivity mikroobrábění. Oblak plazmy pak dál předává naakumulované teplo materiálu, což způsobuje zvětšování tepelně ovlivněné oblasti, viz Obr. 12. [29][33][34][35] [37]



Obr. 12 Rozložení energie v pulzu u krátkých (vlevo) a ultrakrátkých (vpravo) pulzů (upraveno) [29][34]

## 2.5.2 Atermální ablace

Při použití laserů generujících ultrakrátké pulzy, jejichž délka je  $\tau_p < 10$  ps, se termální ablace mění na atermální ablací. Vlivem ultrakrátkých pulzů o stejné energii v pulzu je v místě interakce laserového paprsku s materiálem mnohem vyšší špičkový výkon než u krátkých pulzů ( $\tau_p > 10$  ps). Energie ultrakrátkých pulzů je absorbována nejdříve elektrony, které jsou odstraněny z materiálu, což má za následek vytvoření silného elektrostatického pole, které odtrhne ionty z mřížky dříve, než by došlo k jejich zahřátí. Během atermální ablace vznikají extrémní tlaky, teploty a hustoty, jenž urychlují ionizovaný materiál. Materiál v místě interakce tedy okamžitě přechází do vysokotlaké směsi tvořené kapičkami a párou, která vysokou rychlostí expanduje. Vlivem tohoto procesu je materiál odstraněn dříve, než by došlo k přenesení tepla do objemu materiálu. Avšak dosažení 100% atermální ablace je v praxi nemožné, jelikož Gaussovský svazek má jen část nad ablačním prahem, a tím pádem je část energie vždy přeměněna na teplo viz Obr. 12. Při atermální ablaci tedy dochází k vytvoření tepelně ovlivněné oblasti (HAZ), ale oproti tepelně ovlivněné oblasti u termální ablace je mnohonásobně menší. Z toho důvodu lasery generující ultrakrátké pulzy dosahují vysoké přesnosti a používají se pro laserové mikroobrábění. [29][32][33][34][37]

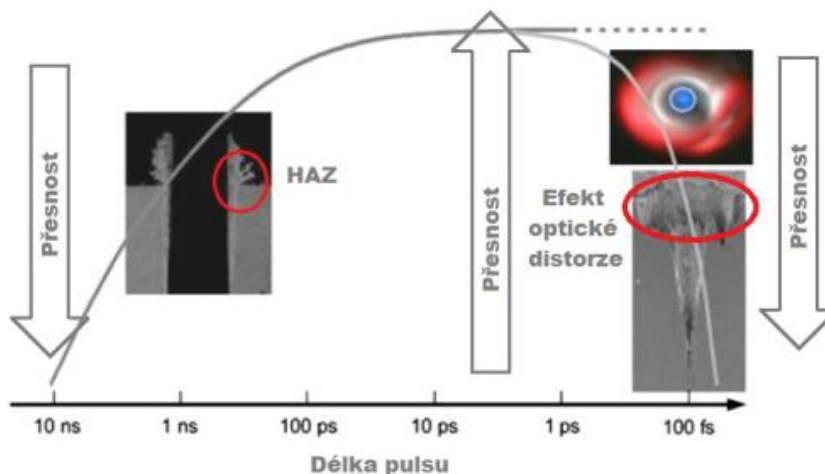


Obr. 13 Rozdíl mezi laserovým mikroobráběním a) ultrakrátkými pulzy ( $\tau_p = 200\text{fs}$ ) b) krátkými pulzy ( $\tau_p = 3,3\text{ns}$ ) [37]

Na Obr. 13 lze vidět rozdíl mezi atermální (a) a termální (b) ablací při mikrovrtání díry. Z obrázku je zjevné, že při použití ultrakrátkých pulzů  $\tau_p = 200\text{ fs}$  s intenzitou těsně nad ablačním prahem je tepelně ovlivněná oblast velice malá a přesnost díry mnohonásobně vyšší oproti mikrovrtání nanosekundovými pulzy  $\tau_p = 3,3\text{ ns}$  s intenzitou vysoko nad ablačním prahem, kde je možné pozorovat jak výraznou tepelně ovlivněnou oblast, tak vytlačenou taveninu na povrch materiálu. [37]

### 2.5.3 Optimální délka pulzu

Jak již bylo zmíněno, tak tepelně ovlivněná oblast se zmenšuje se zkracující se délkou pulzů, avšak při zkracování délek pulzů z jednotek ns na stovky fs jsou tepelné účinky na kovy téměř neměnné, zato efekt optické distorze je výraznější. [9][32][38][39]



Obr. 14 Graf znázorňující přesnost mikroobrábění v závislosti na délce pulzu [29]

Efekt optické distorze je způsoben extrémně vysokou intenzitou laserového paprsku, která může dosahovat hodnoty až několik  $\text{TW}/\text{cm}^2$ . Takto vysoké intenzity spolu s nelineárním charakterem laserového záření a interakcí laserového paprsku s okolní atmosférou mají za následek deformaci laserového paprsku v okolí ohniskové roviny. Efekt optické distorze je při laserovém mikroobrábění velmi nežádoucí, jelikož velice negativně ovlivňuje jeho přesnost. To dokazuje i Obr. 14, na kterém je vidět vliv délky pulzů na přesnost mikroobrábění. Zatímco při délkách pulzů nad  $\tau_p = 100\text{ ps}$  je kvalita

laserového mikroobrábění výrazně ovlivněna tepelnými účinky, tak u délek pulzů blízko  $\tau_p = 100$  fs je kvalita ovlivněna právě efektem optické distorze, což se projevuje špatnou morfologií ablace. [9][32][38][39]

#### 2.5.4 Popis procesu ablace

Pro popis procesu ablace je nejdříve nutné definovat parametry, jimiž jsou energie v pulzu  $E_p$ , intenzita výkonu pulzu  $I_p$  a špičkový výkon  $P_{peak}$ . Z těchto parametrů lze poté vypočítat fluence (hustota energie)  $F$ .

##### Energie v pulzu

Pulzní lasery generují laserový paprsek ve formě pulzů, které se periodicky opakují v čase. Každý pulz poté obsahuje určité množství energie. Toto množství se vypočítá z průměrného výkonu laseru a opakovací frekvence nebo periody, viz rovnice (6). Energie v pulzu poté může sloužit k matematickému odhadu špičkového výkonu, která je zmíněna dále. [40][41][42]

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

Kde:

$E_p$  je energie v pulzu [ $\mu J$ ]

$P_{avg}$  je průměrný výkon [ $W$ ]

$f_{rep}$  je opakovací frekvence [ $Hz$ ]

$\Delta t$  je perioda [ $s$ ]

Pulzní lasery, které využívají ke generování laserových pulzů metodu Q-switching mohou dosahovat energií v pulzu od mikrojoulů až po kilojouly. Naopak lasery generující laserové pulzy pomocí mode-lockingu dosahují maximálně energie v pulzu v řádu jednotek mikrojoulů. [40][41][42]

##### Intenzita výkonu pulzu

Intenzita energie pulzu vyjadřuje optický výkon na jednotku plochy. Jednotka intenzity je obecně  $W/m^2$ , ale častěji se používá  $W/cm^2$ . Pro Gaussův paprsek s optickým výkonem a Gaussovým poloměrem paprsku se dá intenzita vypočítat dle (7): [40][43]

$$I_p = \frac{P_{avg}}{\frac{\pi \cdot w_0^2}{2}} \quad (7)$$

Kde:

$I_p$  je intenzita energie pulzu [ $W/cm^2$ ]

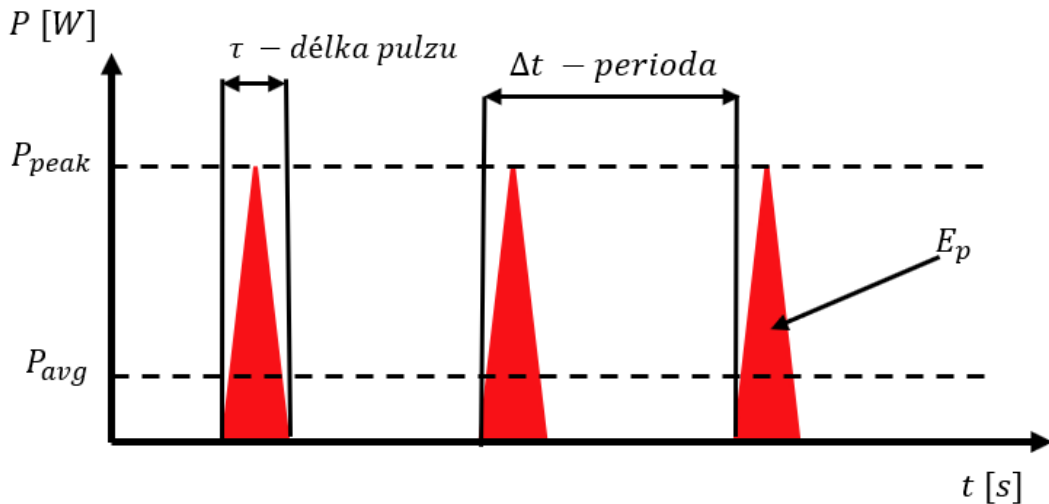
$P_{avg}$  je průměrný výkon [ $W$ ]

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

$\pi$  je Ludolfovo číslo [-]

### Špičkový výkon (peak power)

Špičkový výkon je veličina určující maximální optický výkon pulzu, který lze vypočítat ze vztahu (8), ze kterého vyplývá, že lze generovat pulzy o vysokém vrcholovém výkonu, a to i laserovými zdroji s relativně nízkým průměrným výkonem. Zvýšení vrcholového výkonu je možné pomocí zkrácení délky pulzu. [33][40]



Obr. 15 Závislost špičkového výkonu na čase [práce autora]

$$P_{peak} = \frac{P_{avg}}{f_{rep} \cdot \tau_p} = \frac{P_{avg} \cdot \Delta t}{\tau_p} \quad (8)$$

Kde:

$P_{peak}$  je špičkový výkon [W]

$P_{avg}$  je průměrný výkon [W]

$f_{rep}$  je opakovací frekvence [Hz]

$\Delta t$  je perioda [s]

$\tau_p$  je délka pulzu [s]

### Fluence

Fluence (hustota energie) udává množství energie, která je dodána jedním pulzem na jednotku plochy. Základní jednotka fluence je  $J/cm^2$ . Fluence se dá poté vypočítat dle rovnice (9), která vyjadřuje špičkovou fluence pro laserový paprsek, který má rozložení podle Gausse. K zahájení procesu laserové ablace je za potřebí, aby hodnota fluence byla vyšší než hodnota ablačního prahu  $F_{th}$ . Pokud není tato podmínka splněna, tak nedojde k ablaci materiálu. [29][44]



$$F = \frac{2 \cdot E_p}{\pi \cdot w_0^2} = \frac{8 \cdot E_p}{\pi \cdot d_0^2} \quad (9)$$

Kde:

$F$  je fluence [ $J/cm^2$ ]

$E_p$  je energie v pulzu [ $J$ ]

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

$d_0$  je průměr laserového paprsku [ $mm$ ]

$\pi$  je Ludolfovo číslo [-]

### 2.5.5 Ablací práh

Ablací práh (ablation threshold) charakterizuje potřebné minimální množství energie, při kterém dojde k odstraňování materiálu. Velikost ablačního prahu závisí z velké části na délce pulzu a vlnové délce laserového záření, z menší části pak tuto hodnotu mohou ovlivnit i tloušťka obrobku, jeho teplota nebo prostředí (vzduch/ vakuum). Při hodnotě fluence těsně nad ablačním prahem je efektivita ablace velice nízká, avšak díky nízkému úběru materiálu je proces ablace velice přesný. Proto se obecně při procesu laserového mikroobrábění používají fluence několikanásobně převyšující hodnotu ablačního prahu, což vede ke zvýšení úběru materiálu. Vyšetření ablačního prahu, se provádí experimentálně. Experiment pro zjištění ablačního prahu pro daný materiál je založen na měření průměru ablovaného bodu, který se zvětšuje s narůstající hodnotou energie v pulzu. Hodnotu ablačního prahu pro laserový paprsek s rozložením dle Gausse lze vypočítat ze vztahu (10). [29][34][45][46][47]

$$D^2 = 2 \cdot w_0^2 \cdot \ln \frac{F}{F_{th}} \quad (10)$$

Kde:

$D$  je průměr ablovaného bodu [ $mm$ ]

$F$  je fluence [ $J/cm^2$ ]

$F_{th}$  je ablační práh [ $J/cm^2$ ]

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

### 2.5.6 Hloubka ablace

Hloubka ablace je veličina, která je závislá na hloubce penetrace a poměru velikosti fluence oproti ablačnímu prahu. Obě tyto veličiny jsou závislé na mikroobráběném materiálu. Hloubka penetrace udává schopnost energie proniknout do materiálu s tím, že

s narůstajícím počtem pulzů a s jejich narůstající délkou hloubka penetrace rychle klesá. Hloubku ablace lze poté vypočítat dle vztahu (11): [29][48][49][50]

$$z_{abl} = \delta \cdot \ln \frac{F}{F_{th}}, \quad F > F_{th} \quad (11)$$

Kde:

$z_{abl}$  je hloubka ablace [ $\mu m$ ]

$\delta$  je hloubka penetrace [ $nm$ ]

$F$  je fluence [ $J/cm^2$ ]

$F_{th}$  je ablační práh [ $J/cm^2$ ]

## 2.6 Pulzní lasery v mikroobrábění

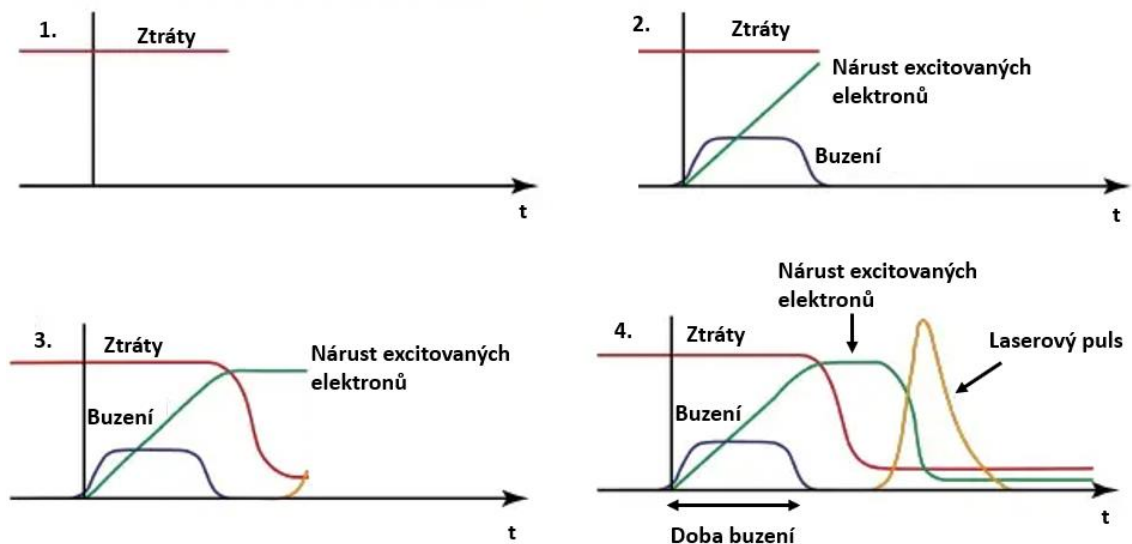
Existuje hned několik druhů laserů v závislosti na jejich pracovním režimu, ať už to jsou lasery pracující v kontinuálním režimu (CW), quasi-kontinuálně (QCW) nebo pulzní lasery. V procesu mikroobrábění se používají především pulzní lasery. Pulzní lasery generují laserový paprsek ve formě jednotlivých pulzů, které se opakují s vysokou frekvencí a tím jsou schopny generovat pulzy o vysoké energii. Tento druh laserů lze poté rozdělit podle délek vygenerovaných pulzů na lasery generující krátké pulzy, ultra krátké pulzy nebo lasery schopny generovat „dávky“ pulzů, tzv. bursty. [4][51][52]

### 2.6.1 Pulzní lasery generující krátké pulzy

Tyto lasery generují pulzy s délkou pulzu v rozsahu nanosekund, zároveň tyto pulzy mají vyšší energii a řádově vyšší špičkový výkon než průměrný výkon. Avšak nanosekundové pulzy mají příliš dlouhou dobu interakce s materiálem, a tím pádem jsou více náchylné k vytvoření tepelně ovlivněné oblasti viz, kap. 2.5.1. Z toho důvodu se tyto lasery spíše používají pro tzv. hrubování, kdy je zapotřebí vysoký úběr, ale není důležité hledět na tepelné ovlivnění nebo drsnost povrchu. [39][52][53]

#### Metoda generace krátkých pulzů – Q-switching

Metodou Q-switching lze generovat pulzy do délky v řádech několika nanosekund s vysokou energií a špičkovým výkonem u pevnolátkových laserových zdrojů. Princip této metody je založen na regulaci ztrát v optickém rezonátoru, který je ukončen modulátorem. Celý proces lze rozdělit do několika fází, které jsou znázorněny na Obr. 16. V první fázi buzení jsou ztráty vysoké, ale počet vybuzených elektronů s časem roste až na hranici rovnou ztrát. Buzení poté dále pokračuje a vybuzené elektrony setrvávají na vyšší energetické hladině, kde se hromadí. V okamžiku, kdy vybuzené elektrony dosáhnou určité energie, dojde k otevření modulátoru. Dochází tak ke skokovému poklesu ztrát v optickém rezonátoru a ke generaci krátkého pulzu. Po opuštění pulzu se modulátor uzavře a proces generace se opakuje. [11][53][54]



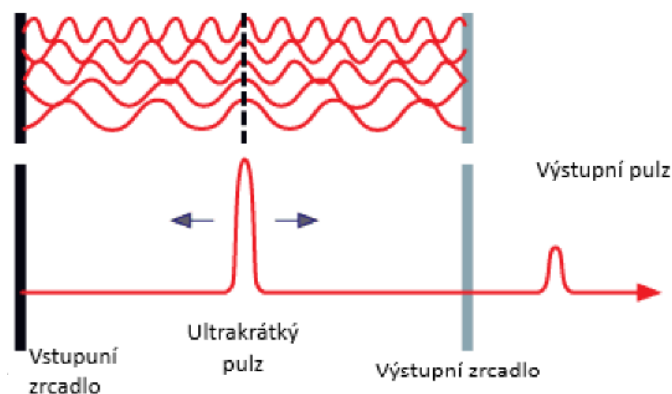
Obr. 16 Princip generace krátkých pulzů pomocí metody Q-switching (upraveno) [54]

## 2.6.2 Pulzní lasery generující ultrakrátké pulzy

Pulzní lasery jsou schopny generovat pulzy s délkou pulzu nižší než 10 pikosekund. Špičkový výkon ultrakrátkých pulzů je ještě vyšší než u krátkých pulzů. Interakce ultrakrátkých pulzů s mikroobráběním materiálem je velice krátká proto a dochází tak atermální ablaci, jejíž princip byl vysvětlen v kap. 2.5.2. Proto jsou ultrakrátké pulzní lasery používány v procesu precizního mikroobrábění, kde je zapotřebí minimální tepelného ovlivnění a velice nízká drsnost. [37][39][52][55]

### Metoda generování ultrakrátkých pulzů – Mode-locking

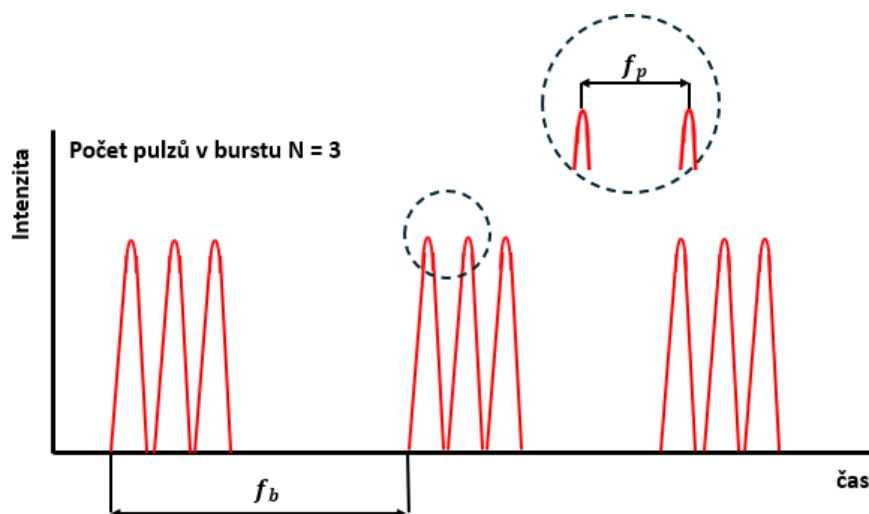
Mode-locking (metoda synchronizace módů) generuje ultrakrátké pulzy s délkou pulzu od 30 pikosekund až do 5 femtosekund. Taktování krátkých pulzů lze dosáhnout přidáním optického prvku do optického rezonátoru. Optický prvek může být buď aktivní (optický modulátor), nebo pasivní (saturovatelný absorbér). Bez toho optické vlny laserového záření v optickém rezonátoru mezi sebou interferovaly a při dosažení určité hodnoty energie by je opustily. Metoda mode-locking funguje na principu, že pokaždé, když dojde laserový pulz na výstup optického rezonátoru, tak je propuštěna jen jeho část a zbytek se vrátí zpět do optického rezonátoru. Funkce optické komponenty poté spočívá v tom, že interferuje laserové záření a díky tomu dokáže zkracovat pulzy a zvyšovat jejich intenzitu, viz Obr. 17. [56][57][58]



Obr. 17 Princip generace ultrakrátkých pulzů pomocí metody mode-locking (upraveno) [57]

### 2.6.3 Pulzní lasery s burst módem

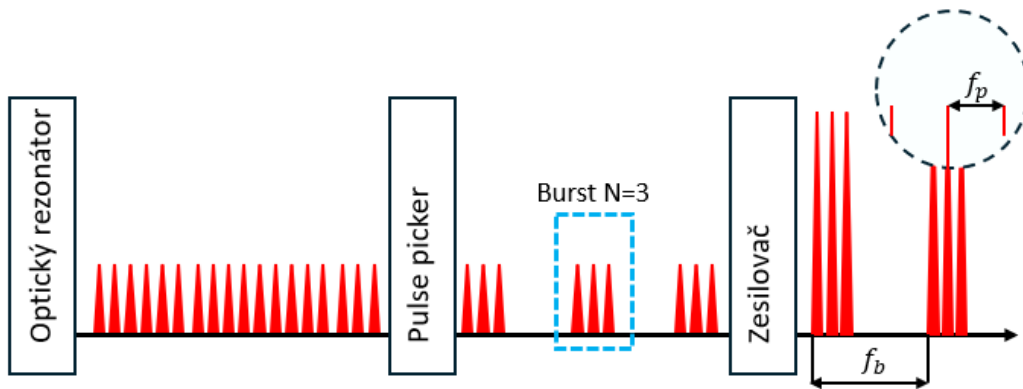
Pulzní lasery s burst módem, jsou druhem ultrakrátkých pulzních laserů, které byly vyvinuty ke zvýšení efektivity ablace v procesu mikroobrábění. Burst mód je technika formování ultrakrátkých pulzů, jejichž energie několikanásobně převyšuje hodnotu ablačního prahu do makro pulzů tzv. burstů. Burst je poté „balík“ mikro pulzů (počet pulzů v burstu  $N = 2-1000$ ), kde každý pulz má energii v pulzu blízko optimálnímu procesu ablace. Tento fakt má za následek zvýšení efektivity a preciznosti procesu mikroobrábění spolu s ještě větší minimalizací tepelně ovlivněné oblasti oproti laserům generující ultrakrátké pulzy. Na Obr. 18 je znázorněn časový průběh burstů obsahující tři pulzy, jednotlivé bursty se opakují s frekvencí  $f_b$  (inter-burst repetition rate), která může být v řádu jednotek Hz až několik stovek kHz. Frekvence opakování jednotlivých pulzů v rámci burstu  $f_p$  (inter-pulse repetition rate) se pohybuje v rozmezí od několik desítek MHz až jednotek GHz v mikroobrábění. Nevýhodou burst módu je, že při použití sudého počtu pulzů, a v závislosti na  $f_p$ , dochází u některých materiálů (hliník, mosaz, měď) k poklesu ablovaného materiálu vlivem plazmatického stínění, avšak slinutý karbid toto chování vykazuje až při použití burstu se čtyřmi pulzy. Ocel pak takovéto chování nevykazuje vůbec. [4][59][60][61][62][63][64][65]



Obr. 18 Příklad časového průběhu burstů obsahující tři pulzy [práce autora]

## Metody generování burstů – Pulse picking a Pulse splitting

Generace jednotlivých burstů pomocí metody pulse picking vyžaduje, aby do optického rezonátoru bylo přidáno elektrooptické zařízení, tzv. pulse picker jímž může být, např. akusticko-optický modulátor. Pulse picker poté vybere určitý počet pulsů  $N$  z optického rezonátoru, kde opakovací frekvence  $f_p$  je v rozmezí MHz až GHz, a utvoří z nich burst, který je poté vyslán frekvencí  $f_b$  do zesilovače. Zesilovač poté zesílí jednotlivé pulzy na potřebný špičkový výkon potřebný pro ablaci, viz Obr. 19. [59][60][65]



Obr. 19 Schéma generace burstu o třech pulzech ( $N=3$ ) metodou pulse picking [práce autora]

Druhou metodou je tzv. pulse splitting (dělení laserového pulzu) využívající k dělení pulzů Michelsonův interferometr. Dělení probíhá pomocí Michelsonova interferometru, kde jej polarizační krychle rozdělí na dva pulzy a vzniká tak burst o dvou pulzech. Při použití více interferometrů lze generovat bursty o více pulzech počet pulzů však vždy bude dán rovnicí (12). [59][60][65]

$$n = 2^m \quad (12)$$

Kde:

$n$  je počet pulzů v burstu [–]

$m$  je počet interferometrů [–]

## 2.7 Způsoby laserového mikroobrábění

Laserové mikroobrábění je skupina technologií, které využívají laser k tvorbě miniaturních dílů nebo složitých struktur na povrchu materiálu. Během tohoto procesu je finální podoba dílu realizována selektivním úběrem materiálu pomocí laserového paprsku o vysoké intenzitě, jenž je fokusován na velmi malou plochu. Stěžejními požadavky pro laserové mikroobrábění jsou poté kvalita povrchu, efektivita úběru a tepelné ovlivnění, a jsou silně závislé na nastavení parametrů procesu. [4][7][29][32][61][66]

Laserový paprsek je univerzální bezkontaktní nástroj, a tudíž při procesu mikroobrábění nezáleží na mechanických vlastnostech obráběného materiálu, ale spíše na jeho fyzikálních a chemických vlastnostech. Vzhledem k tomuto faktu lze obrábět široké spektrum materiálů, a to i ty těžko obrobitelné (např. keramika, polykrystalický diamant,

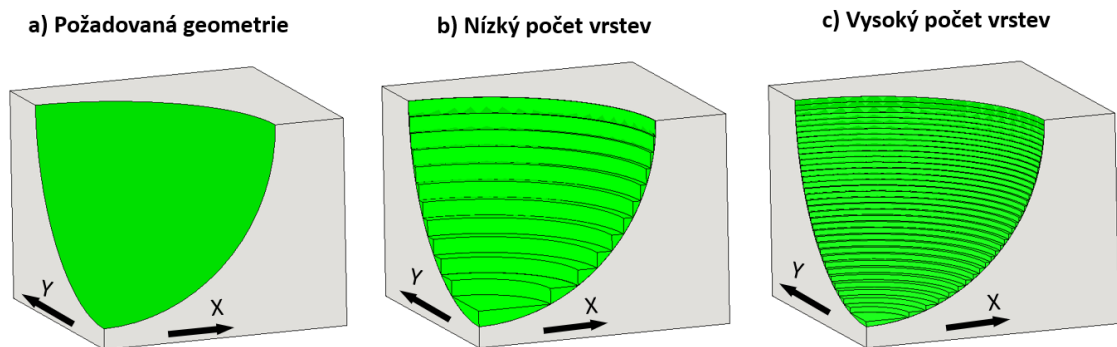
kubický nitrid bóru atd.). Zároveň při použití vhodného nastavení parametrů laserových pulzů lze tyto materiály obrábět s minimálním tepelným ovlivněním. [4][7][29][32][61][66]

Laserové mikroobrábění se v dnešní době používá v mnoha oborech, hlavně v odvětvích, kde je kladen vysoký důraz na malou velikost dílů s vysokou přesností a kvalitou povrchu. Například v medicíně se laserové mikroobrábění používá k texturování zubních a kostních implantátů nebo tvorbě antibakteriálních povrchů. Další oblastí použití je elektrotechnický průmysl, kde se pomocí pulzních laserů vyrábí například mikroelektromechanické komponenty (MEMS). Největší uplatnění má laserové mikroobrábění ve strojírenství, ve kterém se používá k výrobě velmi malých přesných otvorů jejichž rozměr se může pohybovat až v rozměrech jednotek mikrometrů. Dále lze tuto technologii využít při tvorbě 3D struktur při výrobě vstřikovacích forem. Zároveň lze vytvářet povrchy které jsou hydrofobní, nebo naopak na svém povrchu drží maziva pomocí miniaturních prohlubní. Neméně důležitou oblastí je mikroobrábění rezných materiálů ve formě břitových destiček, fréz či vrtáků, na kterých jsou vytvářeny fazetky nebo utvařeče třísek. Zároveň lze vyrábět samotné mikronástroje, např. mikrofrézy. [4][7][29][32][61][66]

V současné době existuje několik přístupů laserového mikroobrábění. Prvním je 2,5D mikroobrábění tzv. radiální mikroobrábění, kdy laserový paprsek dopadá kolmo na obrobek, dalším způsobem je poté tangenciální laserové mikroobrábění, kdy paprsek dopadá tečně k obrobku. Posledním způsobem je tzv. quasi-tangenciální laserové mikroobrábění, což je způsob laserového mikroobrábění na pomezí radiálního a tangenciálního laserového mikroobrábění. [67][68][69]

### **2.7.1 Radiální laserové mikroobrábění**

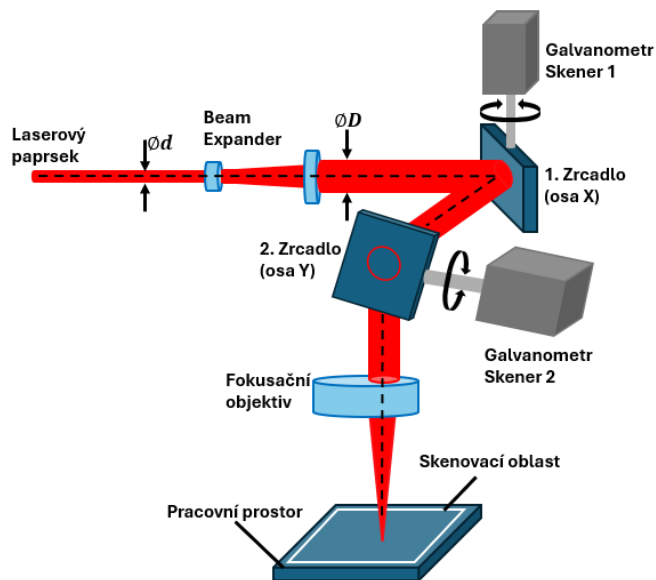
Jak již bylo zmíněno v kap. 2.7, při radiálním laserovém obrábění dopadá laserový paprsek kolmo na povrch obrobku. Tato metoda využívá k dosažení požadované geometrie pomocí ablování materiálu v jednotlivých vrstvách s měnícím se profilem, tzv. selektivní ablace. Výsledná hloubka požadované geometrie je silně závislá na interakci materiálu s laserovým paprskem. Dosažená přesnost se poté odvíjí od rychlosti ablace, kterou ovlivňuje  $\tau_p$ ,  $f_p$ ,  $P_{avg}$ , spolu s materiálovými vlastnostmi jako je např. chemické složení. Přesnost však nezávisí nejen na rychlosti ablace, ale i na počtu zvolených vrstev. Při nižším počtu vrstev výsledná geometrie poté vykazuje zhoršenou kvalitu povrchu a odchylku od požadované geometrie u tvarově složitějších geometrických prvků, např. kulová kapsa, viz Obr. 20. Tento nedostatek lze odstranit použitím vyššího počtu vrstev, ale dojde ke snížení efektivity úběru. Avšak při optimalizaci laserových parametrů je metoda radiálního laserového mikroobrábění efektivní, a to jak z pohledu dosažené drsnosti, tak i rychlosti ablace. [29][70][71]



Obr. 20 Ukázka radiálního mikroobrábění a) požadovaná geometrie; b) použitý nízký počet vrstev; c) použitý vysoký počet vrstev (upraveno)[29]

### 2.7.1.1 Rozmítání laserového paprsku při radiálním laserovém mikroobrábění

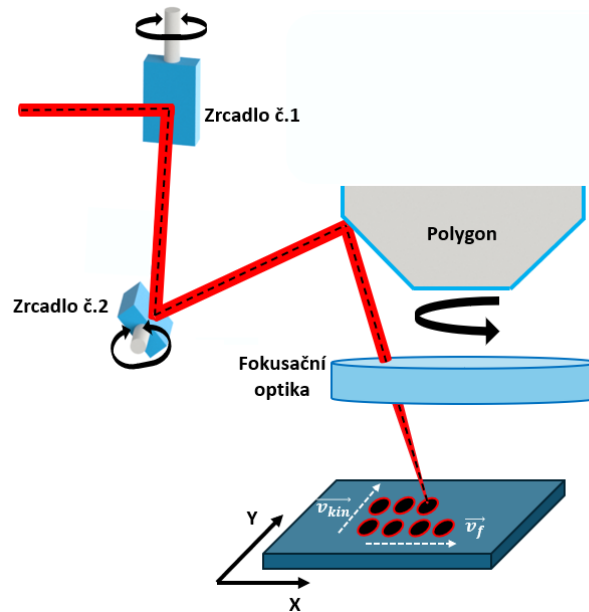
Rozmítání laserového paprsku je v procesu radiálního laserového mikroobrábění velice důležité, jelikož na správně zvolené technice rozmítání laserového paprsku silně závisí efektivita ablace, přesnost a kvalita povrchu finální geometrie po laserovém obrábění. Proces rozmítání laserového paprsku probíhá v galvo-skeneru pomocí dvou odrazivých zrcadel, která jsou umístěna na galvo metrických skenerech, které zajišťují přesný a dynamický pohyb zrcadel a tím pádem i přesnou polohu dopadajícího laserového paprsku. Každé zrcadlo poté vychyluje laserový paprsek do jedné z os  $X_{galvo}$  a  $Y_{galvo}$ . Laserový paprsek vstupující do galvo-skeneru je nejdříve vychýlen pomocí prvního zrcadla ve směru osy  $X_{galvo}$  a následně ve směru osy  $Y_{galvo}$  druhým zrcadlem, viz Obr. 21. Laserový paprsek po vychýlení prochází skrz fokusační optiku a dopadá na obrobek. [29][72][73]



Obr. 21 Princip rozmítání laserového paprsku pomocí galvo-skeneru [práce autora]

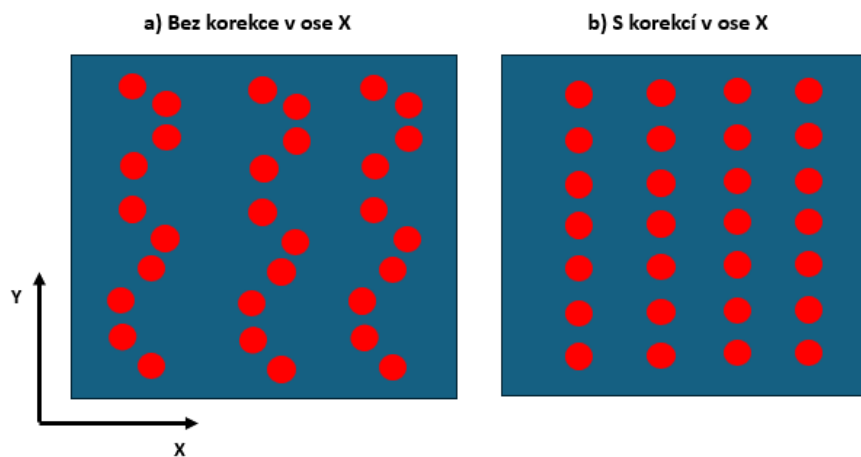
V dnešní době se čím dál tím více používají galvo-skenery, které využívají k rozmítání laserového paprsku polygony. Tyto galvo-skenery jsou schopné rozmítat laserový paprsek rychlostí  $v_f$  až 200 m/s, což je v porovnání s galvo-skenerem s klasickou konstrukcí, jež dokážou rozmítat laserový paprsek rychlostí  $v_f$  pouze 10 m/s. Z toho

důvodu jsou galvo-skeneru využívající polygony schopny razantně snížit procesní časy a tím pádem zvýšit efektivitu procesu laserového mikroobrábění. [29][72][73]



Obr. 22 Princip rozmítání laserového paprsku pomocí polygonálního galvo-skeneru [práce autora]

Při rozmítání laserového paprsku pomocí polygonálních galvo-skenerů probíhá pomocí rotujícího polygonu na který dopadá laserový paprsek a vlivem měnícího úhlu dopadu laserového paprsku na polygon se rozmítání laserového paprsku rapidně zrychlí (Obr. 22). Posun laserového paprsku v rastru je realizován přes zrcátko č.2 nebo je řízen kinematikou laserového zařízení  $v_{kin}$ . Zrcátko č.1 poté slouží ke korekci polohové chyby při rastrování, viz Obr. 23. Polygonální galvo-skeneru jsou schopny rozmítat laserový paprsek pouze v jednom směru, tato nevýhoda je dána jeho konstrukcí. Tento typ galvo-skenerů se zásadně používá při rastrování velkých ploch, např. při povrchových úpravách, tvorbě otvorů a kapes nebo při 3D tisku. [29][72][73]



Obr. 23 Ukázka rozmítání laserového paprsku a) bez korekce v ose X, b) s korekcí v ose X (upraveno) [74]

### 2.7.1.2 Strategie rozmítání laserového paprsku pomocí strategie šrafování

V radiálním laserovém mikroobrábění se krom hardwarových metod rozmítání laserového paprsku (kap. 2.7.1.1) využívá strategie šrafování, kterou lze dále

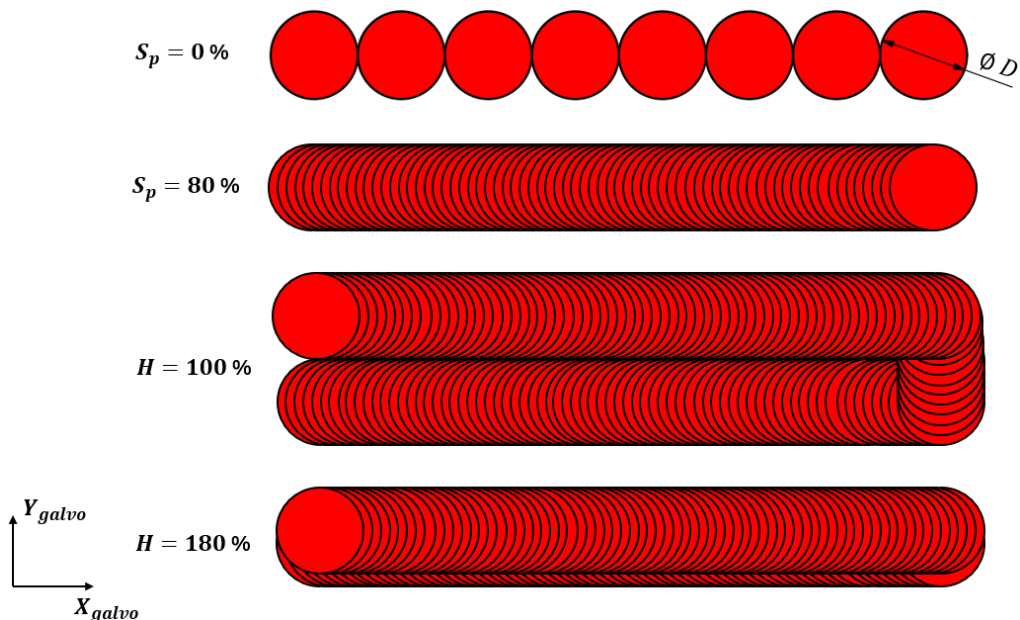


optimalizovat proces ablace. Šrafování je jednou z rozmítacích strategií, které má různé geometrické uspořádání. Mezi nejvíce používané uspořádání šrafování patří konturové a liniové šrafování, viz Obr. 24. [29][72][73]



Obr. 24 Schéma a) konturového šrafování, b) liniové šrafování [práce autora]

Pro optimální ablační proces během laserového mikroobrábění je nutné, aby se laserový paprsek rozmítal dle určitých parametrů šrafování. Šrafování se definuje pomocí vzdáleností středů jednotlivých pulzů v osách  $X_{galvo}$  a  $Y_{galvo}$ . Vzdálenosti středů pulzů lze definovat pomocí parametru překrytí pulzů  $S_p$  ve směru  $X_{galvo}$  (čím menší vzdálenost je mezi jednotlivými středy pulzů, tím je větší) a parametru překrytí šrafování  $H$  ve směru  $Y_{galvo}$  (čím větší je vzdálenost mezi jednotlivými středy pulzů ve směru  $Y_{galvo}$ , tím je hodnota menší), viz Obr. 25. Tyto dva parametry musí být nastavovány v souladu, aby došlo k minimalizaci inklinčního úhlu, pokud nejsou parametry  $S_p$  a  $H$  nastaveny správně může dojít k vytvoření velkého inklinčního úhlu, a tudíž např. ke zhoršení drsnosti a snížení hloubky ablace. [29][72][73]



Obr. 25 Parametry strategie šrafování  $S_p$  (překrytí pulzů) a  $H$  (překrytí šrafování) [práce autora]

Parametr  $S_p$  lze poté vypočítat dle:

$$S_p = 1 - \frac{v_f}{D \cdot f_p} \quad (13)$$

Kde:

$S_p$  je parametr překrytí pulzů [%]

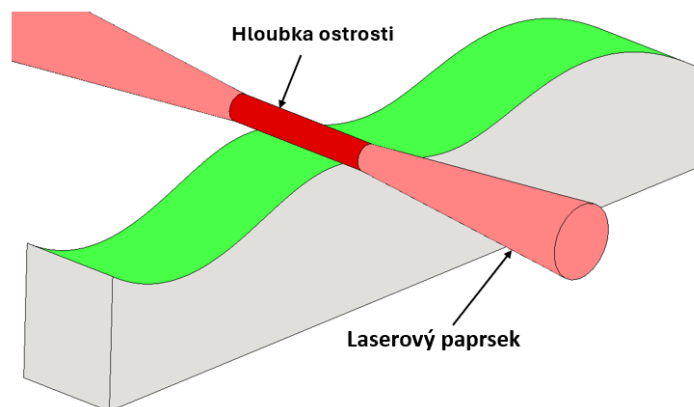
$v_f$  je skenovací rychlost [mm/s]

$D_s$  průměr laserového spotu [mm]

$f_p$  opakovací frekvence [Hz]

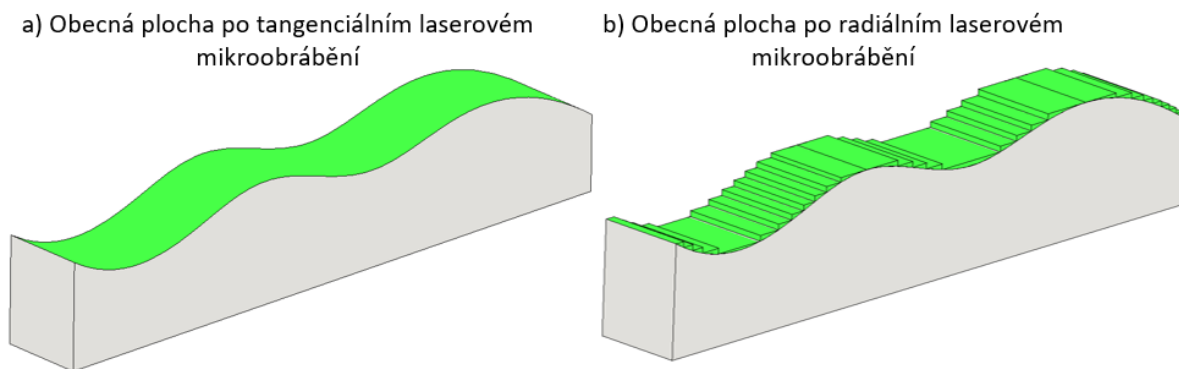
### 2.7.2 Tangenciální laserové mikroobrábění

Tangenciální laserové mikroobrábění je způsob laserového mikroobrábění, kdy laserový paprsek dopadá tangenciálně na obrobek, tzn., že laserový paprsek je při použití Gaussovského rozložení tečný k obrobku. U tohoto druhu laserového mikroobrábění lze použít vyšší výkony, jelikož po odstranění požadovaného objemu materiálu laserový paprsek dále neinteraguje s obrobkem, a tudíž nedochází k akumulaci tepla i po dosažení požadované geometrie. [29] [71]



Obr. 26 Ukázka tangenciálního obrábění obecné plochy (upraveno)[29]

Výsledná přesnost požadované geometrie je u tangenciálního laserového mikroobrábění vyšší než u radiálního, což je způsobeno tím, že pohyb obrobku je vykonáván relativním pohybem kinematiky laserového zařízení, viz Obr. 27. Drsnost po tangenciálním obrábění je z pravidla také lepší, a to vlivem relativně malých úhlů dopadu laserového paprsku, což způsobí nižší absorpci energie, ale zvýší se leštící efekt. Limitace této metody obrábění spočívá v hloubce ostrosti laserového paprsku, jelikož pokud je tloušťka odebíraného materiálu vyšší než hloubka ostrosti, dochází k rozostření laserového paprsku, a tím pádem k poklesu efektivity ablace. Z toho důvodu je nutné při vyšších tloušťkách zakomponovat optimální posun galvo-skenovací hlavy v ose Z, aby se rozostření laserového paprsku předešlo. [29] [71]

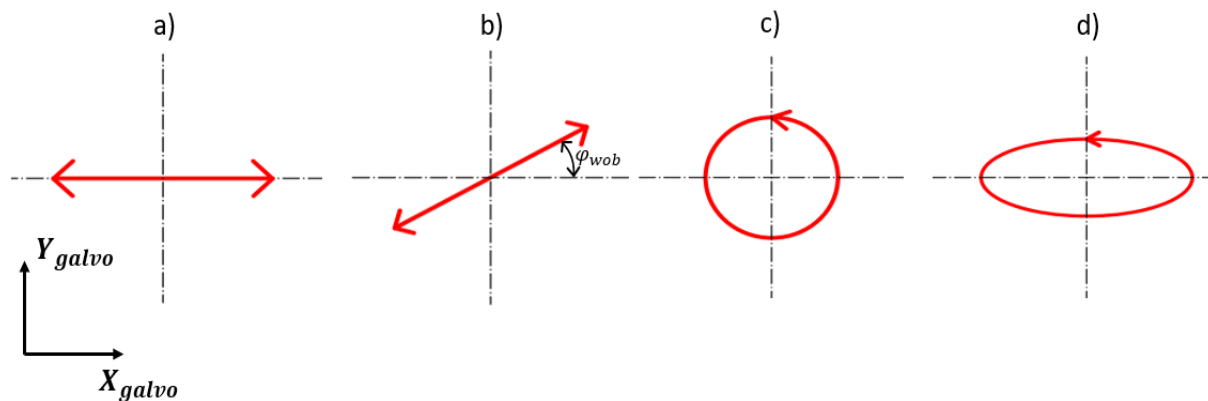


Obr. 27 Porovnání obrábění obecné plochy a) tangenciálním laserovým mikroobráběním; b) radiálním laserovým mikroobráběním (upraveno) [29]

Tyto výhody je nutné však brát v potaz pouze v některých aplikacích, kde lze tangenciální laserové mikroobrábění použít. Tangenciální laserové mikroobrábění není vhodné pro 2,5D aplikace, jako je tvorba drážek či laserové mikrovrtání. Vhodné aplikace pro použití této metody laserového mikroobrábění je tvarování monolitních mikronástrojů a hrubování nedefinovaných polotovarů. Nejširší uplatnění má tangenciální laserové mikroobrábění právě v obrábění rotačních součástí a mikronástrojů, kde se v poslední době objevil nový způsob obrábění, který svými charakteristikami připomíná konvenční soustružení. [29] [71]

### 2.7.2.1 Strategie rozmítání laserového paprsku při tangenciálním laserovém obrábění pomocí funkce wobble

Funkce wobble je rozmítací strategie, pomocí které lze dynamicky rozkmitat laserový paprsek tak, že vytváří jednoduché geometrické obrazce (např. přímka, kruh, elipsa), viz Obr. 28. Velikost těchto geometrických obrazců lze regulovat pomocí amplitudy  $A_{wob}$ , zároveň tyto obrazce lze libovolně natočit pomocí úhlu natočení  $\varphi_{wob}$ , samotná rychlost kmitání je dána frekvencí  $f_{wob}$ . Tento způsob je velice často využíván v procesu tangenciálního laserového obrábění pro zvětšení plochy interakce laserového paprsku s materiálem, avšak funkci wobble lze uplatnit i při radiálním laserovém mikroobrábění. Dalšími aplikacemi může být například laserové řezání či sváření. Zároveň rozmítání laserového paprsku pomocí funkce wobble je možné synchronizovat s kinematikou laserového zařízení a lze tedy docílit relativního pohybu laserového paprsku. [29] [75]



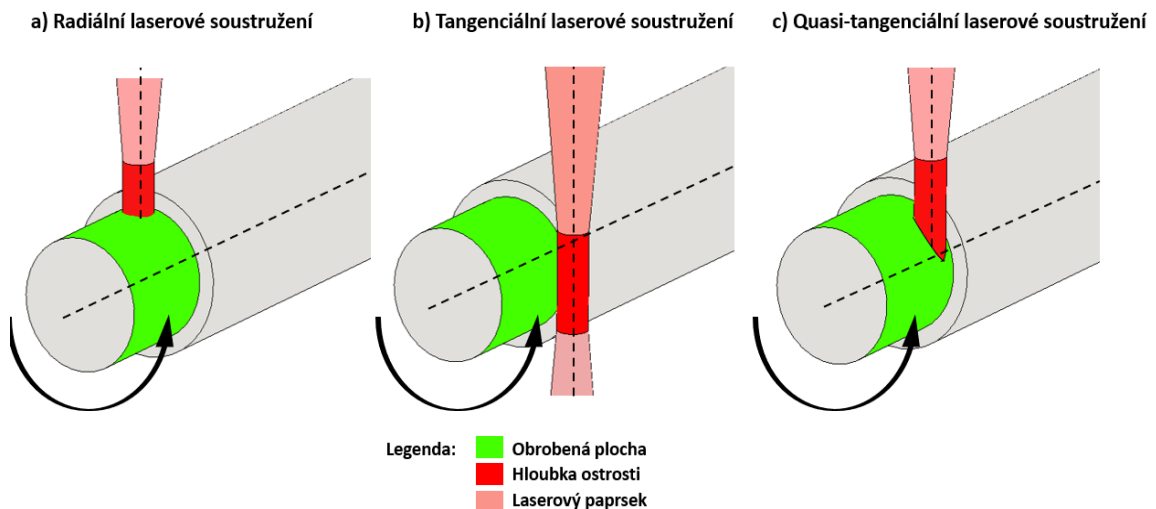
Obr. 28 Druhy rozmítání laserového paprsku pomocí funkce wobble a) lineárně ve směru  $X_{galvo}$ , b) lineárně s definovaným natočením  $\varphi_{wob}$ , c) kruhově, d) elipticky (upraveno)[29]

## 2.8 Laserové soustružení

Laserové soustružení je druh laserového mikroobrábění a je svými charakteristikami blízké konvenčnímu soustružení. Stejně jako u konvenčního soustružení se obrobek otáčí kolem své rotační osy. Zároveň se při procesu laserového soustružení mohou nastavovat stejné parametry jako při konvenčním obrábění ( $v_c, n, f, a_p$ ). Naopak pohyb obrobku je při laserovém soustružení vykonáván kinematikou laserového zařízení a laserový paprsek je statický, oproti konvenčnímu, kde se pohybuje nástroj a obrobek zůstává statický. Proces úběru materiálu je realizován pomocí laserového paprsku, který má oproti konvenčním soustružnickým nožům mnoho výhod. Například nedochází během procesu laserového soustružení k opotřebení nástroje nebo ke vzniku rezných sil, které negativně mohou ovlivnit celý proces soustružení. V důsledku těchto sil může dojít k odštípnutí částí obrobku, nebo dokonce k jeho zlomení. Zároveň lze pomocí laserového paprsku dosáhnout mnohem vyšší přesnosti a nižší drsnosti s minimálním tepelným ovlivněním. V současné době existuje několik přístupů laserového soustružení. [67] [68] [69]

### Radiální laserové soustružení

Při radiálním (cylindrickém) laserovém obrábění laserový paprsek dopadá kolmo na osu rotace obrobku, viz Obr. 29a, avšak při tomto způsobu laserového soustružení je dosažitelný průměr jen těžko kontrolovatelný, což je dáno především místem dopadu laserového paprsku, který může ablovat materiál i po dosažení požadovaného rozměru obrobku. [67] [68] [69]

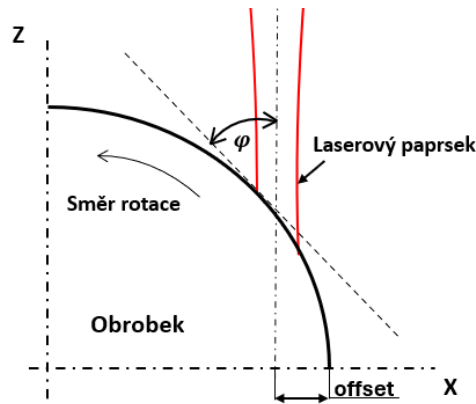


Obr. 29 Jednotlivé přístupy laserového mikroobrábění a) radiální, b) tangenciální, c) quasi-tangenciální [práce autora]

### Tangenciální laserové soustružení

Nevýhody radiálního laserového soustružení jsou eliminovány použitím tangenciálního laserového soustružení. Při tomto způsobu dopadá laserový paprsek tečně k obrobku a po dosažení požadovaného rozměru nebo geometrie dále již nedochází k ablaci materiálu, jak již bylo zmíněno v kap. 2.7.2, viz Obr. 29b. Poslední způsob je quasi-tangenciální laserové soustružení, viz Obr. 29c, což je druh tangenciálního laserového soustružení, kdy laserový paprsek je posunut blíže k ose rotace a nedochází tak k tečné interakci laserového paprsku s materiálem, ale laserový paprsek dopadá na obráběnou plochu pod

určitým uhlím  $\varphi$ , který je řízen velikostí posunutí, tzv. offsetem, viz Obr. 30. Quasi-tangenciální laserové soustružení je spíše vhodné pro hrubovací operace, kdy je nutný vysoký minutový úběr materiálu. Naproti tomu výhodou tangenciálního laserového soustružení je jeho možnost využití právě v dokončovacích operacích. [67] [68] [69]



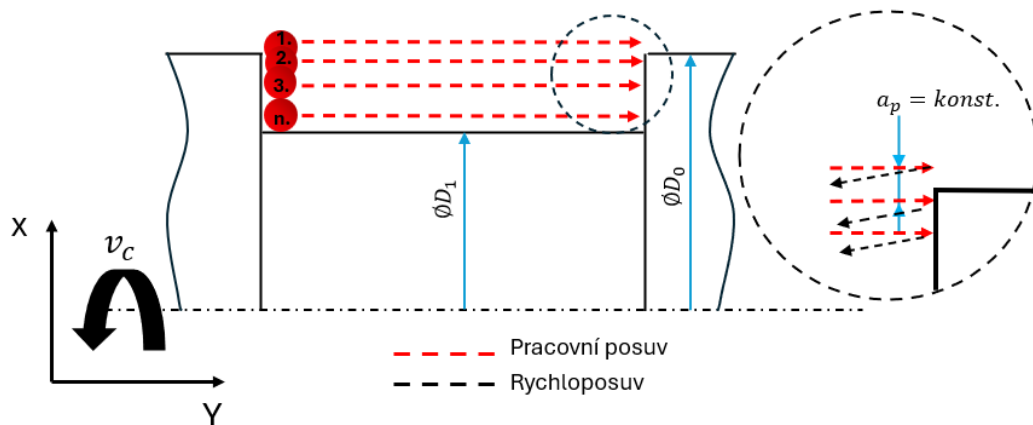
Obr. 30 Schématické zobrazení quasi-tangenciálního obrábění [práce autora]

## 2.8.1 Možnosti nastavení procesu tangenciálního laserového soustružení

Tato kapitola je zaměřena na nastavení procesu tangenciálního a quasi-tangenciálního laserového soustružení. Možnosti radiálního laserového soustružení zde nejsou zmíněny z důvodu jeho nevýhod, které odstraňují již dva zmíněné přístupy.

### 2.8.1.1 Nastavení procesu tangenciálního laserového soustružení dle konvenčního soustružení

Při tomto způsobu laserového soustružení je laserový paprsek veden tangenciálně k obrobku a zároveň je fokusován do roviny osy rotace. Průběh celého procesu je vidět na Obr. 31. Laserový paprsek je po celou dobu statický a veškerý pohyb vykonává kinematika laserového zařízení. Obrobek se tedy pohybuje pracovním posuvem  $y$  v ose Y, po dokončení dráhy se laserový zdroj vypne a následně se rychloposuvem obrobek přemístí na začátek další dráhy. Rozdíl v souřadnicích jednotlivých přejezdů laserů se odvíjí od parametru hloubky řezu  $a_p$ , který je pro všechny dráhy konstantní a je řízen osou X. [76]



Obr. 31 Schéma procesu tangenciálního laserového soustružení dle konvenčního soustružení [práce autora]

Počet přejezdů  $n_p$  je poté závislý na hloubce řezu  $a_p$ , rozdílem počátečního a požadovaného průměru a je dán vztahem (14), řeznou rychlost zajišťuje osa C. [76]

$$n_p = \frac{(D_0 - D_p)}{2 \cdot a_p} \quad (14)$$

Kde:

$n_p$  je počet přejezdů [–]

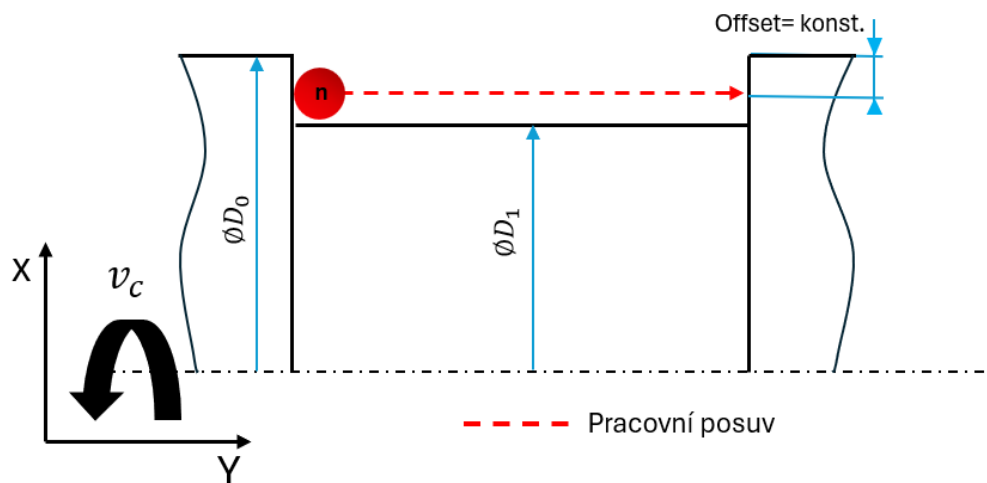
$D_0$  je počáteční průměr [mm]

$D_p$  je požadovaný průměr [mm]

$a_p$  je hloubka řezu [mm]

### 2.8.1.2 Nastavení quasi-tangenciálního procesu laserového soustružení

Při quasi tangenciálním soustružení je laserový paprsek veden v určité vzdálenosti od počátečního průměru, tato vzdálenost se označuje jako offset. Offset je po celý průběh soustružení konstantní a obrobek se pohybuje rychlostí posuvu  $y$  v X-ové souřadnici, která je definována hodnotou offsetu.



Obr. 32 Schéma procesu quasi-tangenciálního soustružení [práce autora]

Velikost offsetu se většinou nastavuje dle vzorce (15), aby bylo dosaženo po určitém počtu přejezdů požadovaného průměru. Při tomto způsobu tedy není použita hloubka řezu  $a_p$  jelikož je nahrazena právě offsetem. Určení počtu přejezdů je ale v tomto případě velice obtížné, protože se proces quasi-tangenciálního soustružení každým provedeným přejezdem blíží procesu tangenciálního laserového soustružení, což je žádoucí, jelikož jakmile je dosaženo požadovaného rozměru, tak laserový paprsek při dalších přejezdech neinteraguje s obrobkem a není tudíž ovlivněna rozměrová přesnost.[67][68][69]

$$offset = \frac{(D_0 - D_p)}{2} \quad (15)$$

Kde:

*offset* je odsazení od kontury [mm]

$D_0$  je počáteční průměr [mm]

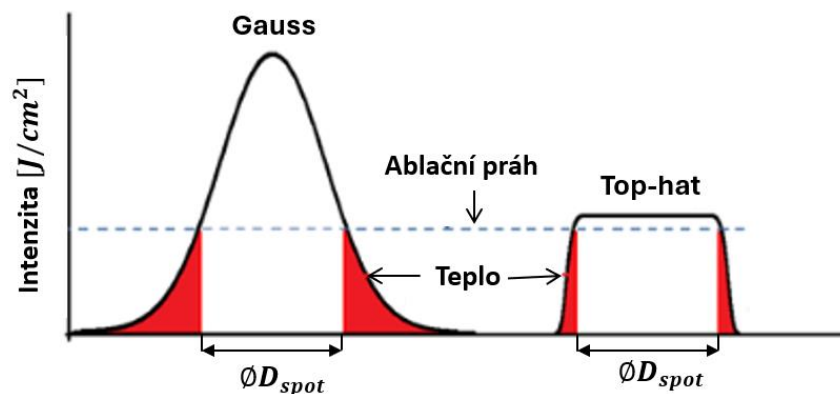
$D_p$  je požadovaný průměr [mm]

## 2.9 Vliv parametrů na proces tangenciálního soustružení

Proces tangenciálního laserového soustružení je ovlivňován kromě použitého přístupu viz kapitoly 2.8.1.1 a 2.8.1.2 také dalšími parametry, jako je rozložení energie v pulzu, velikost wobble a poloha laserového paprsku.

### 2.9.1 Rozložení energie v pulzu

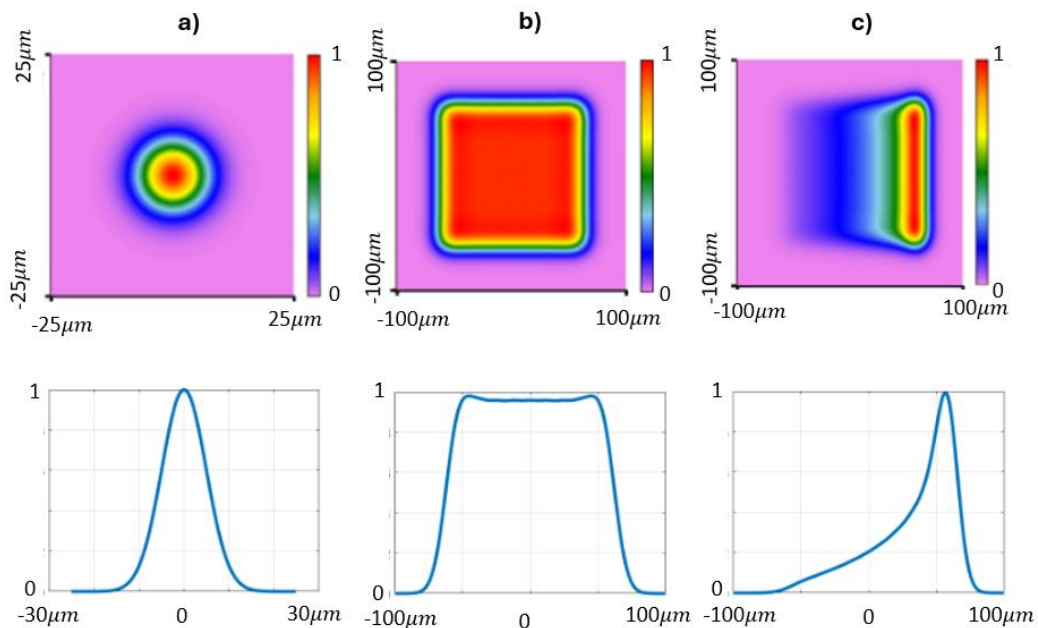
Prostorové rozložení energie laserového paprsku má vliv na efektivitu ablace a výslednou drsnost. Standartně využívané Gaussovské rozložení energie laserového paprsku je část energie pod hodnotou ablačního prahu a nepřispívá tudíž k úběru materiálu, ale může přispívat k nežádoucímu ohřevu obrobku. Z tohoto důvodu lze použít rozložení energie typu top hat, jenž může mít tvar čtverce nebo obdélníku. Energie v pulzu u rozložení typu top hat je distribuována homogenněji, viz Obr. 33, a tudíž může přispět ke zlepšení kvality procesu. [77]



Obr. 33 Zobrazení ztrát intenzity Gaussovského paprsku a Top-hat paprsku (upraveno) [77]

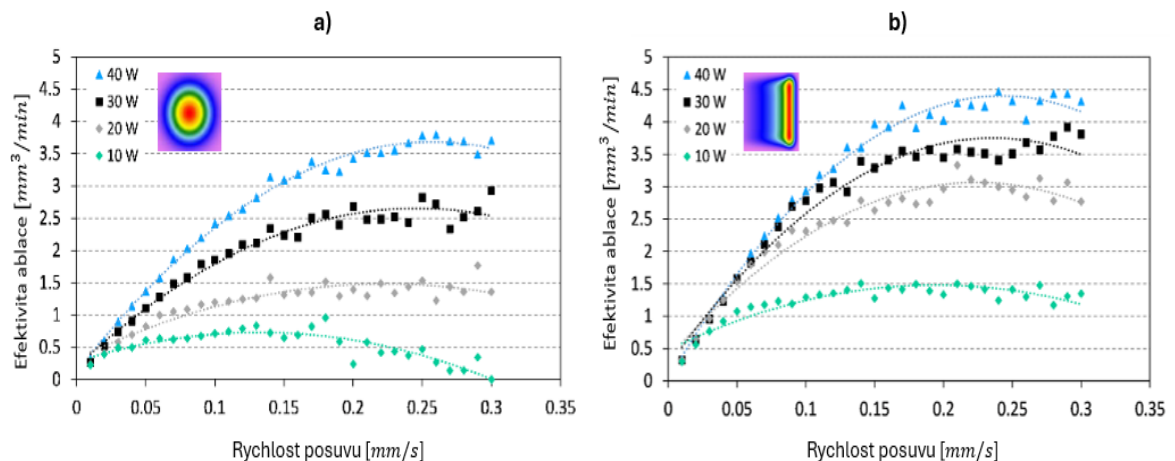
Základní rozložení energie dle Gausse a typu top hat v ohniskové rovině lze vidět na Obr. 34a a Obr. 34b. Zároveň lze profil top hat upravit pomocí posunutí optiky pro tvarování laserového paprsku, kdy dojde ke změně čtvercového profilu top hat na liniový, viz Obr. 34c. [77]





Obr. 34 Jednotlivá rozložení fokusovaných laserových paprsku a) Gaussův, b) Top hat, c) liniový Top hat (upraveno) [77]

Vliv rozložení energie dle Gause, na efektivitu ablace lze vidět na Obr. 35a, kdy maximální hodnoty efektivitu ablace nepřekročily hodnotu  $4 \text{ mm}^3/\text{min}$ . Avšak při použití liniového rozložení top hat je vidět signifikantní nárůst efektivitu ablace, hlavně při použití nižších výkonů, např. při průměrném výkonu  $10 \text{ W}$  jde o nárůst až o  $57,3 \%$ . Takovýto nárůst je pravděpodobně způsoben pomalým nárůstem intenzity v ohniskové rovině a také díky protáhlému tvaru ohniska, což vede k delšímu vystavení materiálu působení laserového paprsku. [77]



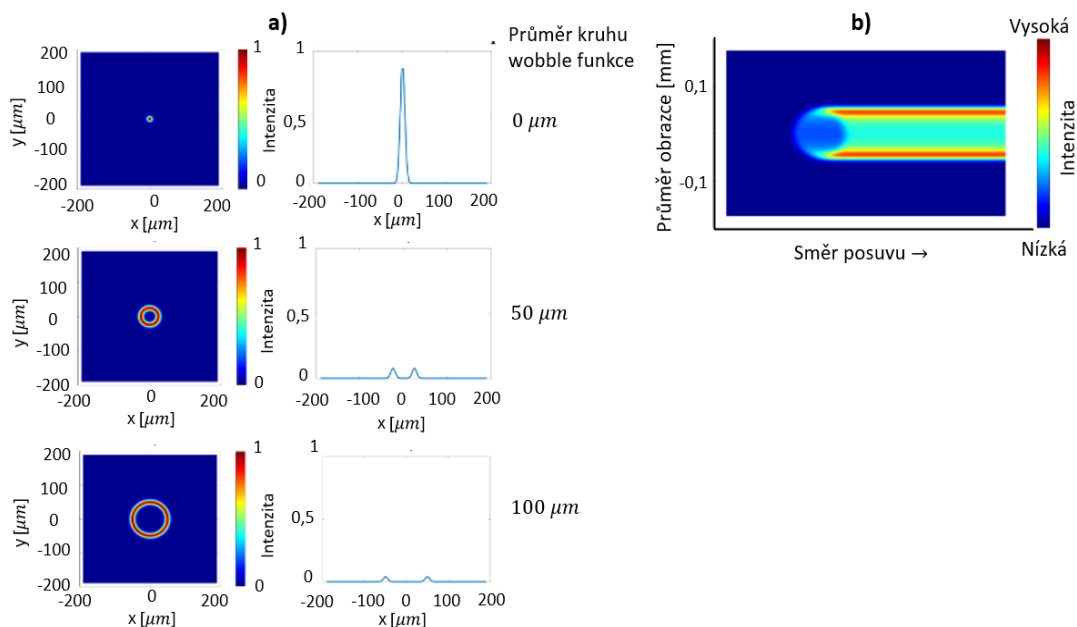
Obr. 35 Z Vliv rozložení energie v pulzu na efektivitu ablace a) rozložení dle Gause, b) liniové rozložení top hat (upraveno) [77]

## 2.9.2 Velikost laserového paprsku

Velikost laserového paprsku je jednou z důležitých veličin procesu laserového soustružení, jelikož při použití malého průměru laserového paprsku, dochází k tomu, že pouze malá oblast interaguje s laserovým paprskem. To má vliv na rychlost celého procesu, a tudíž i na výslednou efektivitu ablace. Z toho důvodu lze velikost laserového



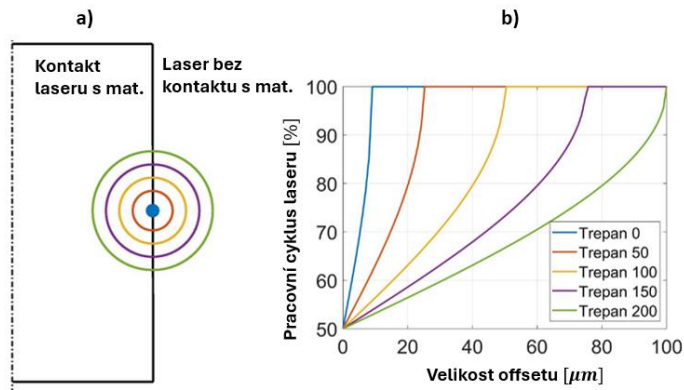
paprsku uměle zvětšit pomocí funkce wobble (kap. 2.7.2.1) nebo trepanační optikou, viz Obr. 36. Avšak při zvětšení velikosti laserového paprsku touto metodou dochází k poklesu intenzity s narůstajícím rozměrem geometrického prvku, který laser opisuje (například kruh – průměr), jak je znázorněno na Obr. 36a. Dále ke snížení intenzity může vést použití příliš vysoké rychlosti posuvu s velkým průměrem laserového paprsku, kvůli nižšímu překrytí jednotlivých laserových pulzů. Z tohoto důvodu musí být rychlost posuvu volená v určitých mezích, aby byla zajištěna homogenní ablace v průběhu celého procesu. Správné rozložení intenzity lze poté vidět na Obr. 36b, kde je zároveň vidět, že největší intenzity je dosaženo na vnějším poloměru, jelikož v těchto místech dochází k překrytí jednotlivých drah laserového paprsku. Ovšem Obr. 36 je zjednodušený pro případ rovinného obrábění pro snazší pochopení vztahu mezi velikostí průměru laserového paprsku, rozložením jeho intenzity a rychlostí posuvu. Avšak při obrábění válcových dílů je rozložení intenzity složitější a musí se brát v potaz defokusace laserového paprsku a nakloněný povrch obrobku. [67] [69]



Obr. 36 a) ukázka umělého zvětšení průměru laserového paprsku pomocí funkce wobble, b) ukázka distribuce intenzity výkonu s použitím posuvu (0,1 mm/s) a wobble funkce (kruh s průměrem 100 $\mu$ m) (upraveno) [67]

### 2.9.3 Poloha laserového paprsku

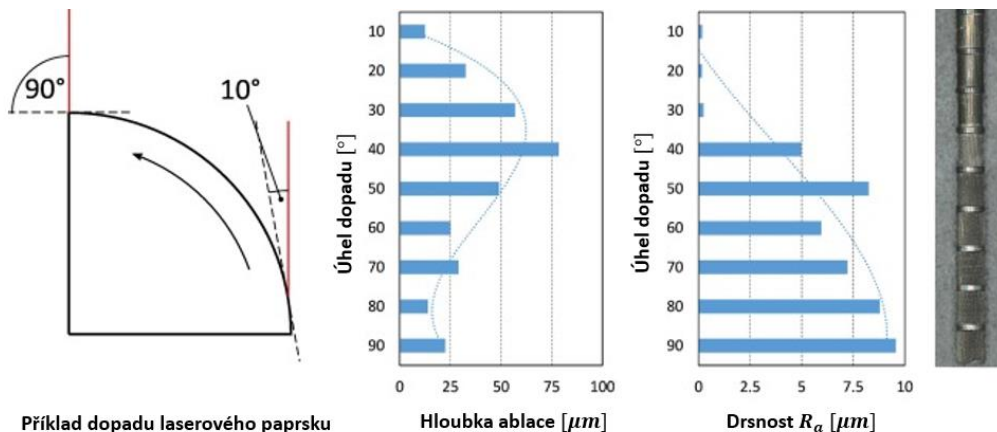
Proces tangenciálního laserového soustružení lze ovlivnit krom velikosti laserového paprsku také polohou laserového paprsku, který je definován tzv. „offsetem“, a dále fokusací laserového paprsku. Parametr offsetu definuje posunutí laserového paprsku blíže k ose rotace obrobku. Při nulovém offsetu interaguje laserový paprsek s materiálem pouze svojí částí, viz Obr. 37a, kde jsou zároveň vidět i jednotlivé velikosti laserového paprsku. [69]



Obr. 37 a) ukázka různých velikostí průměrů laserového paprsku s nulovým offsetem b) pracovní cyklus laserového paprsku v závislosti na průměru laserového paprsku a offsetu (upraveno) [69]

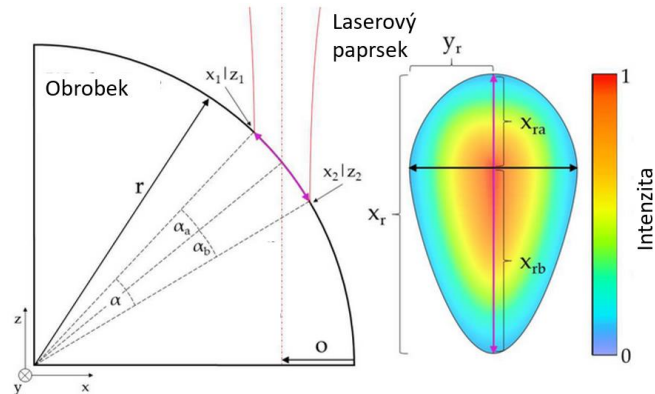
Z toho vyplývá že pracovní cyklus laserového paprsku, který procentuálně udává poměr doby, po kterou laserový paprsek obrábí materiál a doby po kterou obrobek míjí může dosáhnout hodnoty maximálně 50 %, viz Obr. 37b. Avšak se zvyšujícím se offsetem, např. 60 μm, a průměru laserového paprsku 200 μm je dosaženo kontaktního pracovního cyklu 70 %. Z toho vyplývá, že při zmenšení průměru laserového paprsku a zachování offsetu se obecně zvyšuje pracovní cyklus. Kromě toho je důležité, aby se pro daný průměr laserového paprsku zvolil vyšší offset, aby bylo dosaženo co nejvyšší procentuální hodnoty pracovního cyklu. [69]

Použití offsetu také znamená, že se mění úhel dopadu laserového paprsku na obrobek. Na Obr. 38 je vidět vliv dopadu laserového paprsku na hloubku ablace a drsnost při použití laserového paprsku bez funkce wobble, nebo trepanační optiky při jednorůchodovém procesu. Z grafů na obrázku je vidět, že se hloubka ablace zvyšovala s narůstajícím úhlem dopadu (offsetem) a svého maxima dosáhla při 40°. S dalším zvyšováním je vidět pokles hloubky ablace, který může být zapříčiněn plazmatickým stíněním. Dosažená drsnost vykazuje náhlý nárůst při použití uhlů dopadu 40° a vyšší, to je způsobeno tím, že nedochází k ablaci celého materiálu, avšak výsledná drsnost pro úhly dopadu do 30° se pohybuje v hodnotách pod 0,24 μm. Takto nízké drsnosti je dosaženo vlivem odstranění úplného požadovaného objemu materiálu. Závěrem z toho vyplývá, že pro dosažení nízké drsnosti je potřeba zvolit správnou kombinaci energie v pulzu, offsetu a rychlosti posuvu, aby byl odstraněn veškerý materiál. [69]



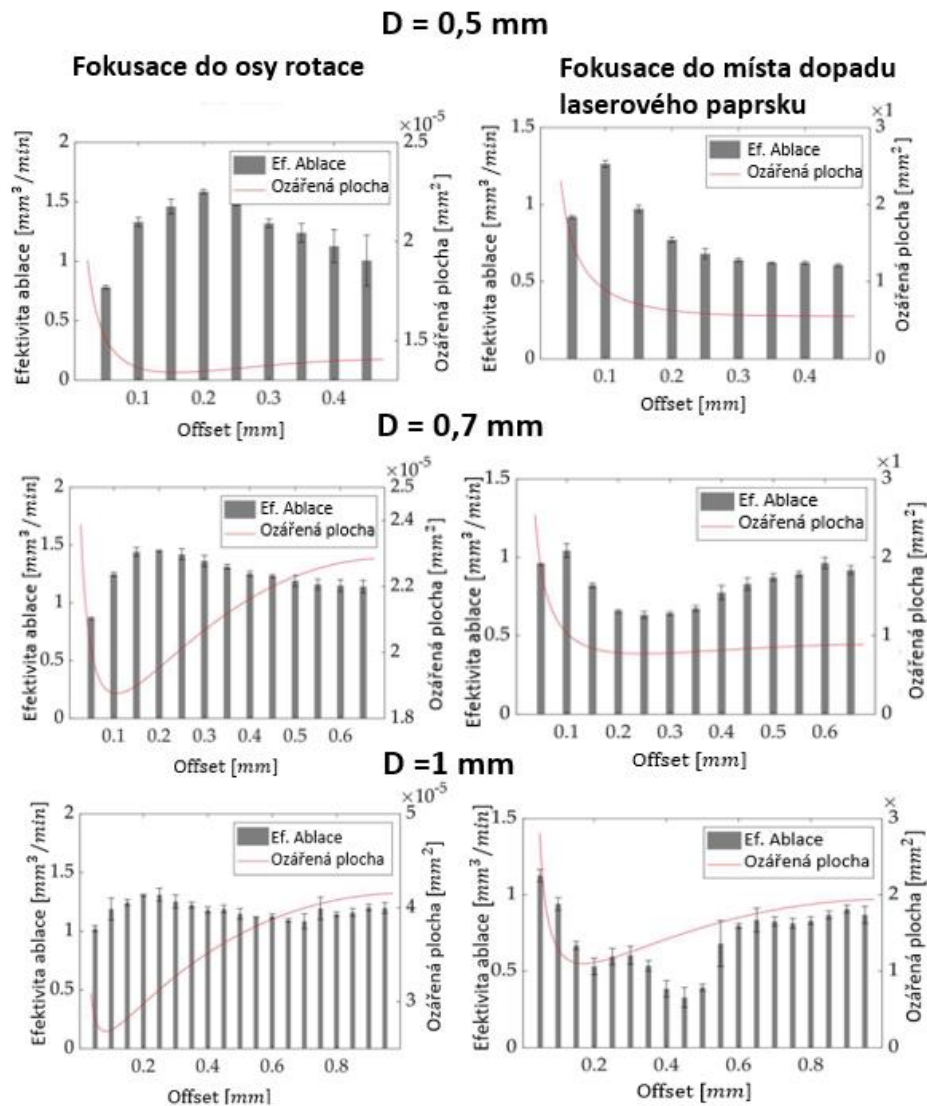
Obr. 38 Závislost hloubky ablace a drsnosti v závislosti na úhlu dopadu (upraveno) [69]

Jak již bylo zmíněno další veličina, která ovlivňuje proces tangenciálního soustružení, je fokuse, resp. defokuse laserového paprsku. Jelikož je laserový paprsek fokusován v rovině osy otáčení, tak při jeho dopadu na válcový povrch obrobku dochází k deformaci ozařované oblasti do tvaru elipsy jejíž osy se vzájemně protínají mimo střed, jak je znázorněno Obr. 39. [68] [69]



Obr. 39 Schéma laserového paprsku dopadajícího na válcový povrch obroku a jeho rozložení intenzity (upraveno) [68]

Pro zjištění vlivu fokuse laserového paprsku na efektivitu ablace při laserovém soustružení byla provedena řada studií, jejichž výsledky jsou shrnuty na Obr. 40. Z výsledků je patrné, že při fokusaci laserového paprsku do roviny osy rotace dochází s narůstajícím offsetem k čím dál větší defokusaci laserového paprsku. To způsobuje nárůst ozařované oblasti, a díky změně úhlu dopadu laserového paprsku vlivem offsetu se dosahuje vyšší efektivity ablace než při fokusaci laserového paprsku o 0,37 mm směrem vzhůru od roviny osy rotace. Závěrem lze konstatovat, že laserové soustružení s defokusem laserovým paprskem vede k vyšší efektivitě celého procesu. [68] [69]



Obr. 40 Vliv fokusace na velikost ozářené plochy a efektivitě ablace: fokusace laserového paprsku do roviny osy rotace (nahore), rovina fokusace posunuta o 0,37mm směrem vzhůru od roviny osy rotace (dole) (upraveno) [68]

## 2.9.4 Procesní limitace tangenciálního soustružení

Procesní limitace je dána tzv. kritickým otáčkovým posuvem  $\dot{y}_{crit}$ , který je dán rovnicí (16). Překročení této rychlosti paprsku způsobuje oddělení jednotlivých drah laserového paprsku a způsobuje na válcové ploše vytvoření spirálové geometrie, tzv. „threading“ viz Obr. 41.[67] [69]

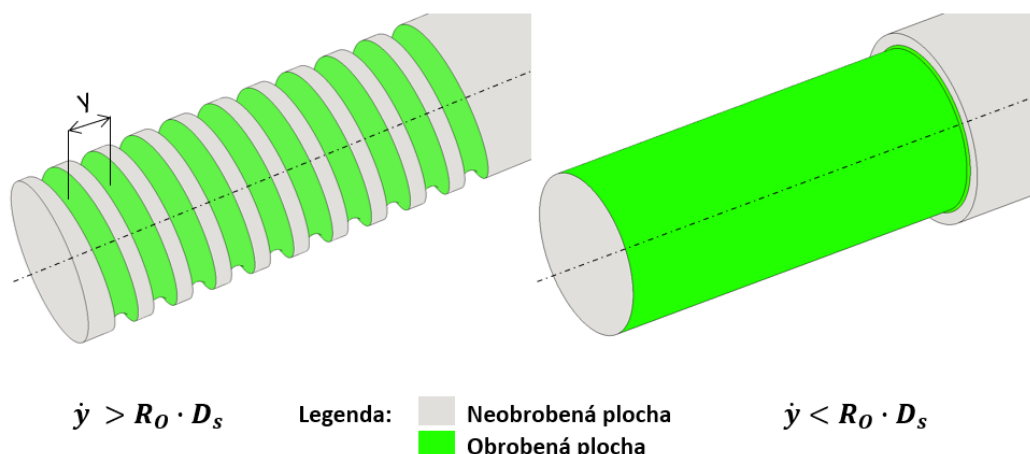
$$\dot{y}_{crit} = R_o \cdot D_s \quad (16)$$

Kde:

$\dot{y}_{crit}$  je kritická rychlost posuvu [mm/s]

$R_o$  je rychlost otáčení [ot/min]

$D_s$  průměr laserového spotu [mm]

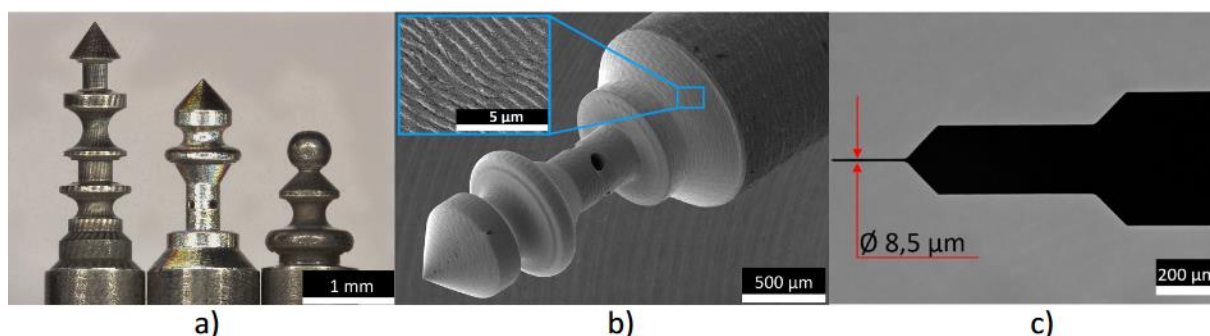


Obr. 41 Ukázka procesní limitace a) překročení  $\dot{\gamma}_{crit}$  – tvorba závitové geometrie, b) dodržení  $\dot{\gamma}_{crit}$  – správné obrobení válcové plochy [práce autora]

Tato limitace při použití samostatného laserového paprsku značně zpomaluje celý proces tangenciálního laserového soustružení, z toho důvodu je výhodné použití funkce wobble (kap. 2.7.2), nebo trepanační optiku kdy nejčastěji užívané geometrické tvary jsou kruh nebo elipsa, díky které lze uměle zvětšit průměr laserového paprsku. Použitím funkce wobble lze tedy potenciálně při tangenciálním laserovém soustružení zvýšit  $\dot{\gamma}_{crit}$ , což vede k snížení procesních časů a celkovému zefektivnění celého procesu tangenciálního laserového soustružení. [67] [69]

### 2.9.5 Geometrická limitace tangenciálního soustružení

Limitace požadované geometrie vyplývá z povahy laserového paprsku, jelikož při laserovém soustružení se nejčastěji využívá paprsek Gaussovského rozložení, tudíž jeho průřezem je kruh. Z toho vyplývá, že kulové plochy, oblouky či zkosení lze jednoduše vyrobít, avšak problém nastává u kolmých stěn, kdy jejich kolmost je omezena poloměrem laserového paprsku. [67] [69]



Obr. 42 a) ukázka možných geometrií dosažitelných pomocí laserového soustružení, b) obrázek ze SEM, c) dosažitelný průměr laserovým soustružením [67]

### 2.9.6 Shrnutí současného stavu

Proces tangenciálního laserového soustružení založeného na konvenčním soustružení je velice neefektivní z hlediska efektivity ablace, jelikož při vyšších řezných rychlostech dochází ke snížení odebraného objemu materiálu a zároveň ke zhoršení drsnosti povrchu finálního obrobku. Oproti tomu přístup quasi-tangenciálního soustružení má jasně

definované limitní parametry, kterými jsou počáteční průměr obrobku, velikost průměru laserového paprsku a offset. Po nastavení parametru offsetu a velikosti laserového spotu je pevně nastaven i teoretický průměr obrobku po obrobení. Cílem je tedy kombinace těchto dvou způsobů za účelem dosažení co nejvyšší efektivity úběru, finální drsnosti a minimálního tepelného ovlivnění obrobku. [67] [68] [69] [76]

### 3 Cíle práce

Cílem teoretické části bylo popsat laserovou technologii od základních principů funkce laserového zdroje, až po laserové mikroobrábění a jeho druhy se zaměřením na laserové soustružení.

Na základě poznatků z teoretické části je poté hlavním cílem této diplomové práce vyšetření celkem tří přístupů k tangenciálnímu laserovému soustružení s různým nastavením výkonu laserových zdrojů a zhodnocení, který z přístupů by byl nejvíce efektivní pro potřeby hrubovacích operací při laserovém soustružení.

Prvním dílčím cílem bylo definování tří přístupů, z čehož dva přístupy jsou definované na základě teoretické části a jeden bude vlastním řešením.

Druhým dílčím cílem bylo vytvoření programů pro řízení jednotlivých přístupů laserového soustružení pomocí G-kódu a následné obrobení jednotlivých vzorků.

Třetí dílčí cíl, který je nutný naplnit pro komplexní vyhodnocení, je vyšetření velikosti odebraného materiálu, dosažené drsnosti povrchu a velikosti tepelného ovlivnění.

## 4 Vlastní experiment

### 4.1 Popis experimentu

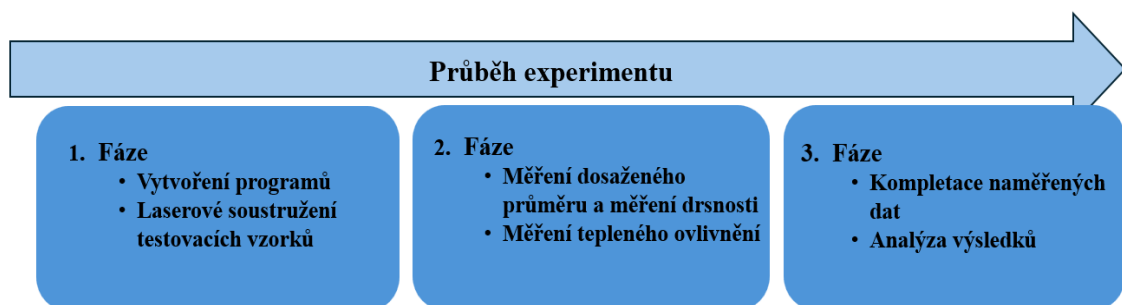
Experimentální část byla provedena na laserovém zařízení, pro účely přípravy vzorků bylo využito elektrojiskrové řezání drátem, metalografická bruska a leštička a k následnému vyhodnocení byly použity optický a konfokální mikroskop. Všechna tato zařízení jsou součástí laboratoře Českého institutu informatiky robotiky a kybernetiky (CIIRC), kde se nachází společné pracoviště Fakulty strojní ČVUT a CIIRC ČVUT.

Samotný experiment byl rozdělen do tří fází, které na sebe navazují. Výsledky zjištěné z jednotlivých fází poté posloužily pro komplexní vyhodnocení celého experimentu.

První fáze experimentu se skládala z dvou dílčích fází, kde první bylo vytvoření programů pro jednotlivé přístupy laserového soustružení. Náplní druhé dílčí fáze bylo obrobení válcových vzorků ze slinutého karbidu pomocí tří přístupů tangenciálního laserového soustružení. První přístup použitého tangenciálního laserového soustružení je proces definovaný v kap. 2.8.1.1, druhý způsob je přístup quasi-tangenciálního laserového soustružení pospaný v kap. 2.8.1.2 třetí přístup je kombinace obou již zmíněných procesů. Každý z těchto procesů byl proveden v pěti různých nastaveních laseru.

Druhou fází experimentu lze opět rozdělit do dvou částí. Obsahem první část bylo měření dosaženého průměru a drsnosti povrchu jednotlivých vzorků po laserovém soustružení na optickém mikroskopu. Ve druhé části byli jednotlivé vzorky rozřezány pomocí elektrojiskrového řezání drátem, vyleštěny a bylo na nich provedeno měření tepelného ovlivnění na laserovém mikroskopu.

Poslední fází tvořila kompletace naměřených dat. Experiment byl poté zakončen komplexní detailní analýzou.



Obr. 43 Schéma průběhu experimentu [práce autora]

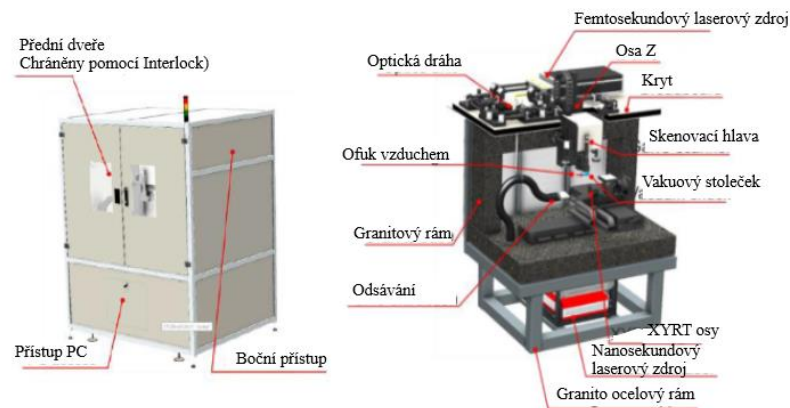
### 4.2 Popis zařízení použitých při experimentu

V této kapitole jsou popsána zařízení, jež byla použita při realizaci experimentu. Zároveň jsou zde uvedeny jejich základní charakteristiky.



## 4.2.1 Obráběcí laserová mikro stanice MASTER 1 PSGFRT

Obrábění jednotlivých vzorků bylo provedeno na laserovém zařízení MASTER 1 PSGFRT od společnosti Akoneer, viz Obr. 44, a vybaven je řídicím softwarem Direct Machining Control. [78]

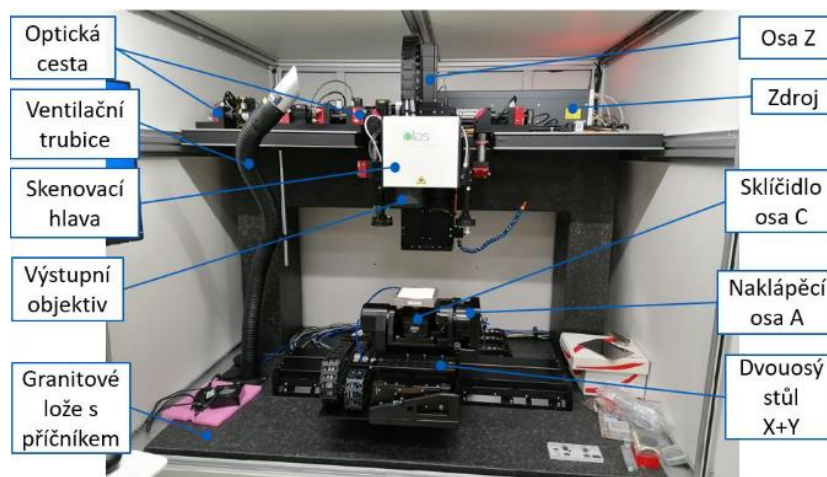


Obr. 44 Laserové zařízení MASTER 1 PSGFRT (upraveno) [78]

Pohyb zařízení je řízen pomocí třech translačních os, pohyb v osách X a Y je realizován pomocí pohyblivého stolečku, zatímco pohyb v ose Z vykonává galvo-skenovací hlava. Rotační pohyb vykonávají osy A a C, které jsou umístěny v kolébkce pracovního stolu. Charakteristiky jednotlivých os jsou uvedeny v Tab. 1. [78]

Tab. 1 Charakteristika jednotlivých os zařízení MASTER 1 PSGFRT [78]

Parametr	Osa X	Osa Y	Osa Z	Osa C	Osa A
Rozsah os	600 mm	400 mm	200 mm	$\pm 360^\circ$	$\pm 120^\circ$
Absolutní přesnost	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 0,5 \mu\text{m}$	$\pm 1,2 \mu\text{m}$	$\pm 12 \mu\text{rad}$	$\pm 12,12 \mu\text{rad}$
Opakovatelnost	0,11 $\mu\text{m}$	$\pm 0,09 \mu\text{m}$	$\pm 0,08 \mu\text{m}$	$\pm 8,31 \mu\text{rad}$	$\pm 8,31 \mu\text{rad}$
Max. rychlost	<800 mm/s	<1000 mm/s	< 150 mm/s	1500 rpm	1500 rpm



Obr. 45 Pracovní prostor laserového zařízení MASTER 1 PSGFRT [17]

Dále je zařízení vybaveno odsávacím systémem, které odsává ablovaný materiál. Nedílnou součástí zařízení jsou i dvě kamery, které jsou umístěné na galvo-skenovací hlavě sloužící k monitorování pracovního prostoru a zaměření polohy obrobku, viz Obr. 45. Laserové záření je vedeno pomocí optických drah, kde každá umožňuje změnu polarizace, změnu výkonu pomocí atenuátorů, měření výkonu a změnu velikosti paprsku. Optické dráhy poté ústí do galvo-skenovací hlavy IntelliSCAN14 od firmy SCANLAB ze které laserové záření dopadá na obrobek. Vybrané parametry jsou uvedeny v Tab. 2. [4][17][79][80]

Tab. 2 Vybrané parametry galvo-skenovací hlavy IntelliSCAN14 od firmy SCANLAB [79]

Parametr	Hodnota
Polohovací rychlost [ $m/s$ ]	5
Rychlost značení [ $m/s$ ]	2
Rozsah rotace [ $rad$ ]	$\pm 0,35$
Přesnost [ $\mu rad$ ]	2

Zařízení MASTER 1 disponuje dvěma laserovými zdroji. Prvním je diodový femtosekundový laserový zdroj Carbide Light Conversion, jenž je schopen generovat tři harmonické frekvence a zároveň umožňuje použití burst módu. Aktivní prostředí je poté chlazeno vodou. Parametry tohoto laserového zdroje jsou uvedeny v Tab. 3. [4][17][32][78][80]

Tab. 3 Vybrané parametry femtosekundového laserového zdroje Carbide light conversion [80]

Parametr	Hodnota
Vlnové délky [nm]	I H $\approx$ 1030, II H $\approx$ 515, III H $\approx$ 343
Maximální výstupní výkon [W]	I H = 40, II H = 21, III H = 11
Maximální pulzní energie [mJ]	0,4
Počet pulzů v burstu [–]	1-10
Délka pulzu [fs – ps]	250-10
Perioda jednotlivých pulzů v burstu [ns]	15
Opakovací frekvence [MHz]	Od jednoho pulsu – 1

Druhým laserovým zdrojem je vláknový nanosekundový laserový zdroj SPI-200P-A-EP-Z-L-Y od firmy SPI (nyní Trumpf). Laserový paprsek je veden optickým vláknem dostejné skenovací hlavy jako femtosekundový laserový zdroj. Nastavení výkonu laseru je prováděno pomocí zadávání napětí na zdroji v rozsahu 1-10 V, parametry jsou uvedeny v Tab. 4. [32]

Tab. 4 Parametry nanosekundového laserového zdroje SPI-200P-A-EP-Z-L-Y [32]

Parametr	Hodnota
Vlnové délky [nm]	1063 $\pm$ 2
Maximální výstupní výkon [W]	200
Maximální pulzní energie [mJ]	1,03
Délka pulzu [ns]	10-2020
Opakovací frekvence [kHz]	100-4160

#### 4.2.2 Vyhodnocovací zařízení

Pro vyhodnocovací fázi experimentu byly použity dva mikroskopy, z nichž každý sloužil k vyhodnocování jiných parametrů. Prvním byl optický 3D mikroskop InfiniteFocus G5 od firmy Alicona Imaging GmbH a druhým byl laserový konfokální mikroskop Keyence VK-X 3000.

##### Optický 3D mikroskop InfiniteFocus 5G

Optický mikroskop InfiniteFocus G5 je flexibilní a rychlé zařízení pro analýzu a měření povrchů součástí. Tento mikroskop je schopen vyhodnocovat jak profilové parametry drsnosti (2D) tak i plošné parametry drsnosti 3D. Díky pohyblivému stolu v osách X, Y, kolébkou vybavenou rotační osou C a výklopnou osou A, a zároveň s funkcí automatického spojování snímků je možné vyhodnocovat rozsáhlejší oblast v jediném snímku, viz Obr. 46. [81]



Obr. 46 Optický mikroskop Alicona InfiniteFocus G5 [81]

Tyto klíčové vlastnosti činí InfiniteFocus G5 velmi univerzálním nástrojem, kterým byl vyhodnocován dosažený průměr, kvalita povrchu a celkový vzhled jednotlivých vzorků po laserovém mikroobrábění. Níže v Tab. 5 jsou uvedeny vybrané parametry. [81]

Tab. 5 Vybrané parametry optického 3D mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5 [81]

Parametr	Hodnota
Rozsah pojezdů [mm]	100x100x100
Revolverová hlava s šesti objektivy [–]	2,5x, 5x, 10x, 20x, 50x, 100x
Maximální výška vzorku [mm]	170
Maximální hmotnost dílu [kg]	20
Maximální rozlišení ve vertikálním směru [nm]	10
Přesnost [μm]	1

### Laserový konfokální mikroskop Keyence VK-X 3000

Laserový konfokální mikroskop Keyence VK-X 3000 je vybaven šesti objektivy (2,5x, 5x, 10x, 20x, 50x, 100x), součástí mikroskopu je i pohyblivý stůl v osách X, Y a rotační osou C sloužící ke snadnému polohování vzorku, viz Obr. 47. Pro měření a vyhodnocování naskenovaných dat posloužil software Multifile analyzer, ve kterém lze měřit hloubku a drsnost povrchu, avšak v tomto experimentu sloužil pro vyhodnocení tepelného ovlivnění jednotlivých vzorků po procesu laserového mikroobrábění. [82]



Obr. 47 Laserový konfokální mikroskop Keyence VK-X 3000 [82]

Níže jsou v Tab. 6 uvedeny základní parametry laserového konfokálního mikroskopu Keyence VK-X 3000. [82]

Tab. 6 Základní parametry laserového konfokálního mikroskopu Keyence VK-X 3000 [82]

Parametr	Hodnota
Maximální výkon laseru [mW]	1
Vlnová délka [nm]	661
Maximální velikost vzorku [mm]	318 x 72
Zvětšení [x]	42 – 28800
Přesnost [%]	± 2
Maximální rozlišení [nm]	0,01

### 4.2.3 Pomocná zařízení

#### Fanuc Robocut $\alpha$ -C600iC

Dělení vzorků probíhalo vzhledem k jejich malé velikosti na zařízení využívající technologii elektrojiskrové řezání Fanuc Robocut  $\alpha$ -C600iC, jehož základní technické parametry jsou uvedeny v Tab. 7

Tab. 7 Základní parametry zařízení Fanuc Robocut  $\alpha$ -C600iC [83]

Parametr	Hodnota
Maximální rozměry obrobku [mm]	1050 x 820 x 300
Maximální hmotnost obrobku [kg]	661
Maximální velikost vzorku [mm]	318 x 72
Max. úhel řezu [°/mm]	± 30°/150
Minimální krok pohonu [mm]	0,0001
Průměr řezacího drátu [mm]	0,1 – 0,3

#### LaboPol-60 a LaboForce-100

Leštění vzorků proběhlo na zařízení LaboPol-60 s dvěma kouři o průměru 250 a 300 mm a rychlostí otáčení 5-500 ot/ min. viz s poloautomatickým přemisťovačem vzorků LaboForce-100 s přítlačnou silou až 300 N, do které lze umístit přípravek na šest vzorků. [84]



Obr. 48 a) Zařízení LaboPol-60, b) LaboForce-100 [84]

### 4.3 Testovaný materiál

Pro jednotlivé fáze experimentu byl použit stejný materiál, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. V celém experimentu byl využit slinutý karbid K20 od firmy Ceratizit s velikostí zrn WC 0,5-0,8  $\mu\text{m}$ . Chemické složení spolu s vlastnostmi je v Tab. 8.

Tab. 8 Chemické složení a vlastnosti slinutého karbidu s označením (K200)

Chemické složení	
Obsah WC [hm. %]	90
Obsah Co [hm. %]	10
Vlastnosti slinutého karbidu	
Hustota [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	14,4
Tvrдость [HV30]	1,510
Pevnost v příčném lomu [MPa]	3,920

### 4.4 Nastavení experimentu z pohledu procesních parametrů laseru

V této části jsou definovány konstantní a proměnné parametry, které jsou společné pro všechny tři použité přístupy během celého experimentu. Neměnné parametry všech přístupů jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 Konstantní parametry společné pro všechny přístupy během experimentu

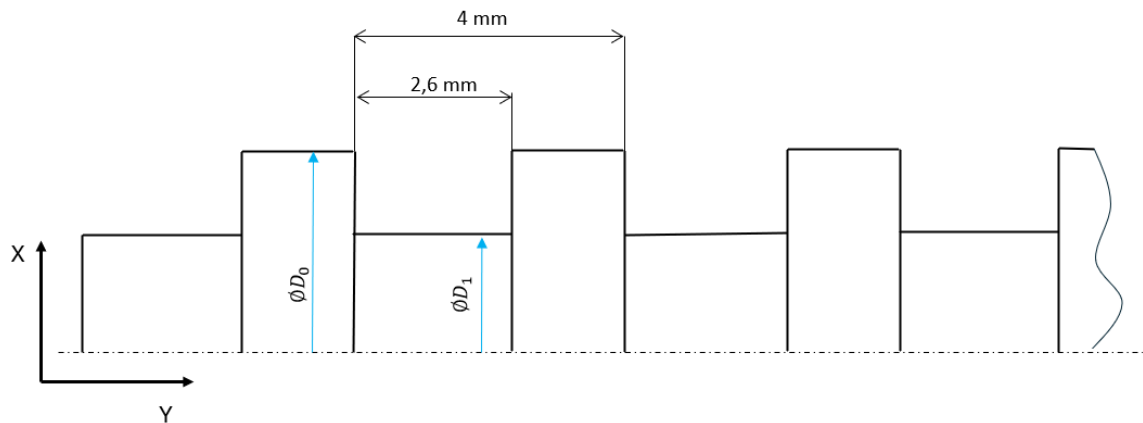
Parametr	Hodnota
Tvar a velikost funkce wobble [mm]	Elipsa – Amp. X = 0,4 ; Amp. Y=0,15
Obráběná délka jednotlivých segmentů [mm]	2,6
Průměr laserového paprsku [ $\mu\text{m}$ ]	25
Počáteční průměr obrobku $D_0$ [mm]	3

V Tab. 10 jsou uvedena jednotlivá laserová nastavení, která byla použita pro všechny tři přístupy laserového soustružení. U každého nastavení byla poté proměnná energie v pulzu, délka pulzu.

Tab. 10 Proměnné parametry pro všechny použité přístupy během experimentu

Parametr	Hodnota	
IH bez burst módu [ $\mu\text{J}$ ] / [ $f\text{s}$ ]	50; 100; 150; 200	260
IH s burst módem o 3 pulzech [ $\mu\text{J}$ ] / [ $f\text{s}$ ]	50; 100; 150; 200	260
IIH bez burst módu [ $\mu\text{J}$ ] / [ $f\text{s}$ ]	25; 50; 75; 105	260
SPI – WF 0 [ $\mu\text{J}$ ] / [ $\text{ns}$ ]	250; 400; 500; 650; 825	58

Na každém válci ze slinutého karbidu byly obrobena 4 (5 pro WF 0) segmenty s různým nastavením laseru a jednotlivé segmenty i s označením jsou 4 mm dlouhé, ale délka obrobeného segmentu je dlouhá pouze 2,6 mm, viz Obr. 49.



Obr. 49 Schéma rozdělení jednotlivých segmentů na válcovém polotovaru [práce autora]

## 4.5 Realizace experimentu

V této kapitole jsou popsány jednotlivé použité přístupy laserového soustružení, jejich nastavení, která byla již definovaná v kapitolách 2.8.1.1. 2.8.1.2, a vlastní přístup, který bude definován v této kapitole.

### 4.5.1 Nastavení experimentu – tangenciální laserové soustružení – varianta A

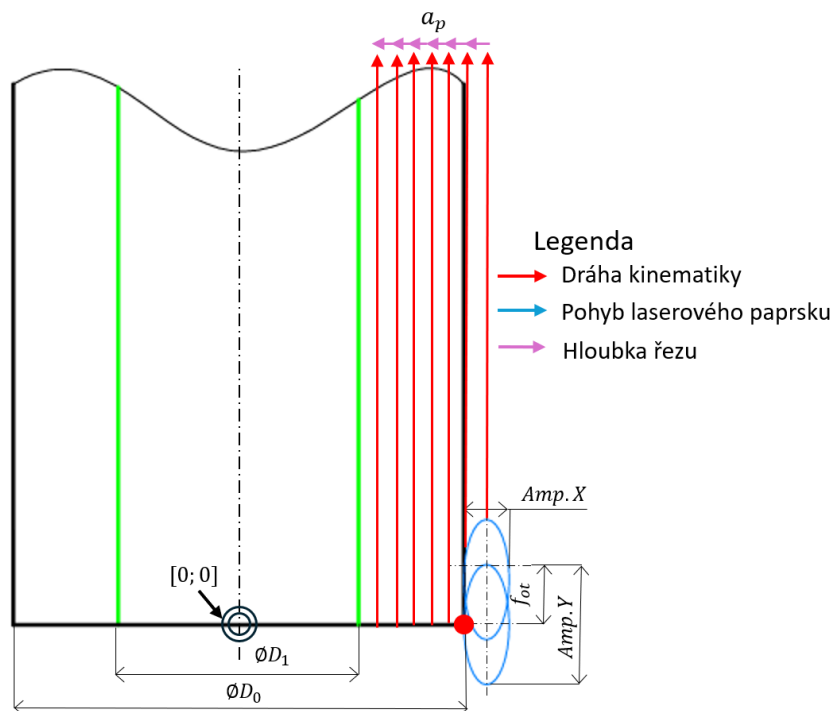
Nastavení varianty A je založeno na základě přístupu tangenciálního laserového soustružení, jež byl popsán v kap. 2.8.1.1, z čehož vyplývá, že toto nastavení odpovídá konvenčnímu soustružení. Celý tento proces je řízen pomocí G kódu a počátek souřadného systému je ve středu obráběného válce ze slinutého karbidu, viz Obr. 50. Velikost laserového paprsku je uměle zvětšena pomocí funkce wobble, která má tvar elipsy a její velikost je dána amplitudami ve směru osy X a osy Y. Jejich parametry jsou uvedeny v kapitole 4.4 a byly pro všechny přístupy stejné.

Procesní parametry sloužící k řízení toho procesu jsou uvedeny v Tab. 11. Důležitá je hodnota offsetu, která nabývá hodnoty 0,025 mm. Tato hodnota byla zvolena pro dosažení maximálního kontaktu laserového paprsku v místě tangenciálního dotyku s obrobkem.

Tab. 11 Procesní parametry pro nastavení tangenciálního laserového soustružení dle varianty A [práce autora]

Parametr	Hodnota
Řezná rychlost [ $m/min$ ]	0,65
Otáčkový posuv [ $mm/ot$ ]	0,05
Hloubka řezu [ $mm$ ]	0,01
Offset [ $mm$ ]	0,025
Celkový počet přejezdů [-]	37
Celkový čas procesu [ $s$ ]	1527

Jako teoreticky požadovaný průměr byla zvolena hodnota 2,25 mm, z toho vyplývá i počet přejezdů. Ostatní parametry byly zvoleny na základě předchozích experimentů a optimalizovány na použitý laserový systém. Zároveň cílem experimentu nebylo zkoumat vliv procesních parametrů na proces tangenciálního laserového soustružení, ale porovnání jednotlivých přístupů. Z toho důvodu jsou procesní parametry  $v_c$ ,  $a_p$  a  $f_{ot}$  rozdílné od ostatních nastavení. Schéma průběhu tangenciálního laserového soustružení dle varianty A je vidět na Obr. 50.



Obr. 50 Schéma nastavení tangenciálního laserového soustružení dle varianty A [práce autora]



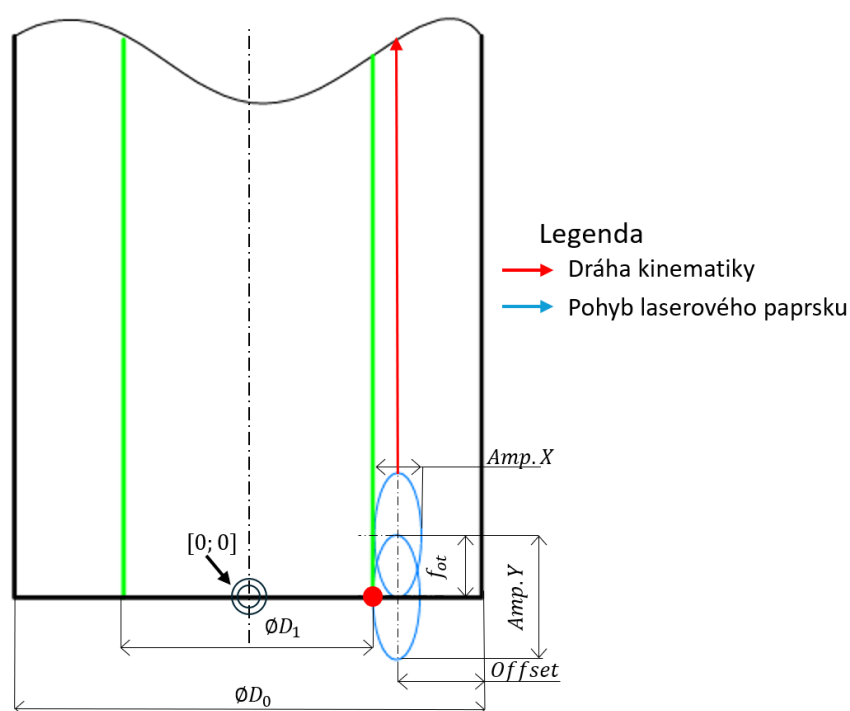
## 4.5.2 Nastavení experimentu – tangenciální laserové soustružení – varianta B

Varianta B je nastavena jako quasi – tangenciální přístup, který je blíže popsán v kap. 2.8.1.2. Stejně jako ve variantě A, je i zde celý proces řízen pomocí G kódu, počátek souřadného systému je ve středu válcového obrobku a laserový paprsek je zvětšen pomocí funkce wobble. Rozdíl oproti variantě A je v pozici umístění laserového paprsku. Při této variantě je velikost offsetu nastavena tak, aby se laserový paprsek pohyboval po teoretickém požadovaném průměru 2,25 mm, viz Obr. 51. Díky tomu se laserový paprsek pohybuje jen po jedné dráze, a tím pádem při tomto způsobu není použita hloubka řezu. Procesní parametry jsou uvedeny v Tab. 12.

Tab. 12 Procesní parametry pro nastavení quasi-tangenciálního laserového soustružení dle varianty B [práce autora]

Parametr	Hodnota
Řezná rychlost [ $m/min$ ]	3,54
Otáčkový posuv [ $mm/ot$ ]	0,0012
Offset [ $mm$ ]	0,3
Celkový počet přejezdů [–]	2
Celkový čas procesu [ $s$ ]	520

Dle tabulky byly použity pouze dva přejezdy, které byly zvoleny na základě literatury [67], kde bylo při použití dvou přejezdů dosaženo lepší drsnosti povrchu oproti jednomu přejezdu. Ostatní parametry jako  $v_c$  a  $f_{ot}$  byly voleny taktéž na základě literatury. [67]



Obr. 51 Schéma nastavení quasi-tangenciálního obrábění dle varianty B [práce autora]

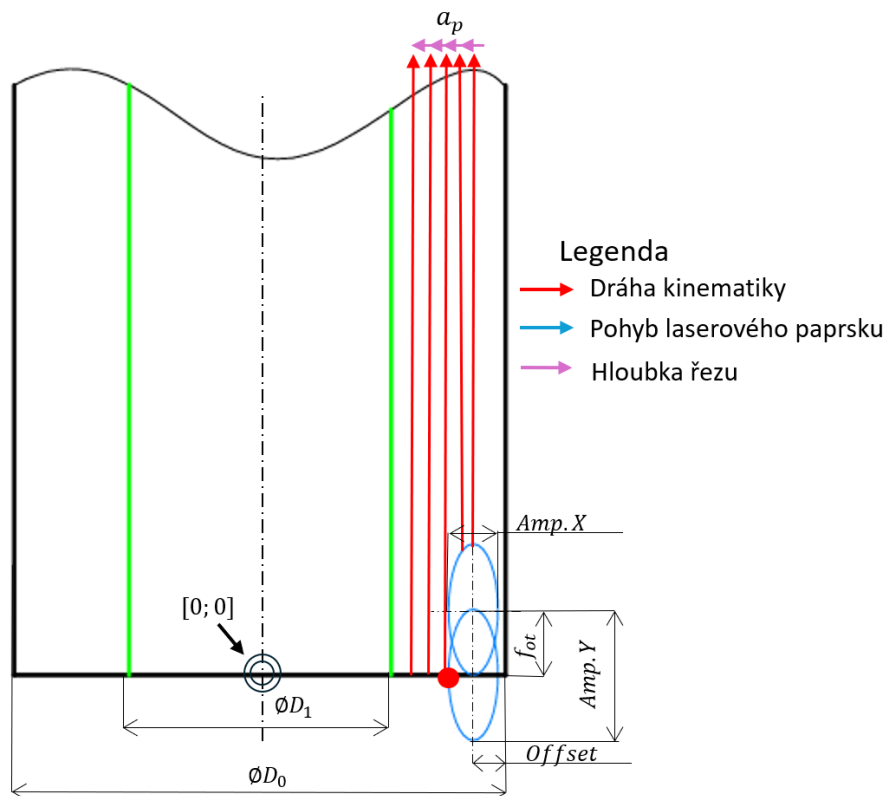
### 4.5.3 Nastavení experimentu – vlastní přístup tangenciálního laserového soustružení – varianta C

Vlastní přístup, resp. varianta C, je kombinací obou předchozích přístupů. Základní nastavení, jako velikost wobblu, způsob řízení procesu a počátek souřadného systému, je totožný jako u variant A a B. Jelikož jde o kombinaci obou přechozích přístupů, tak laserový paprsek dopadá quasi-tangenciálně, ale zároveň se po každém přejezdu přiblíží do středu obrobku pomocí definovaného  $a_p$ , viz Obr. 52.

Tab. 13 Procesní parametry pro nastavení tangenciálního laserového soustružení dle varianty C [práce autora]

Parametr	Hodnota
Řezná rychlost [ $m/min$ ]	3,54
Otáčkový posuv [ $mm/ot$ ]	0,006
Hloubka řezu [ $mm$ ]	0,05
Offset [ $mm$ ]	0,2
Celkový počet přejezdů [-]	5
Celkový čas procesu [ $s$ ]	389

V Tab. 13 jsou uvedeny procesní parametry, za zmínku stojí hlavně hodnota offsetu. Tato hodnota byla vypočtena na základě výpočtu, kdy dle studie [69] bylo dosaženo největší efektivity ablace v poměru k drsnosti při dopadu paprsku pod úhlem  $30^\circ$ , viz Obr. 38 v kapitole 2.9.3. Hodnota offsetu pro počáteční průměr  $D_0$  je 0,2 mm.

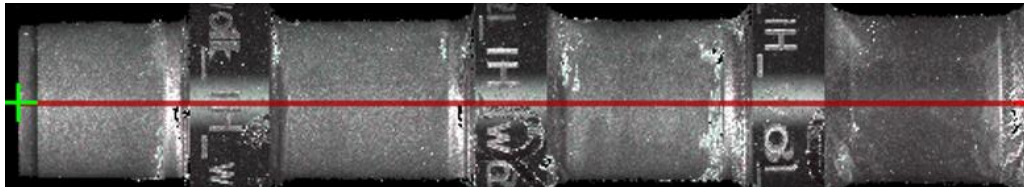


Obr. 52 Schéma nastavení procesu laserového soustružení dle varianty C [práce autora]

## 4.6 Měření dosažených průměrů a drsnosti povrchů obrobených vzorků

### Měření hloubky ablace a výpočet minutového úběru

Měření dosažené hloubky a ablace, resp. dosaženého průměru a drsnosti probíhalo na optickém 3 D mikroskopu Alicona Infinite focus G5. Postup měření spočíval v naskenování celého válce s obrobenými segmenty a následně bylo provedeno měření hloubky ablace, viz Obr. 53.



Obr. 53 Schéma způsobu měření hloubky odebraného materiálu [práce autora]

Po naměření hloubek ablace byly poté vypočítány minutové úběry pro všechny nastavení dle rovnice (17). Vypočítané hodnoty jsou poté uvedeny Příloha 1.

$$U = \frac{(D_0^2 - D_1^2) \cdot L_0 \cdot \pi \cdot 60}{4 \cdot t_o} \quad (17)$$

Kde:

$U$  je minutový úběr [ $mm^3/min$ ]

$D_0$  je počáteční průměr [ $mm$ ]

$D_1$  je dosažený průměr [ $mm$ ]

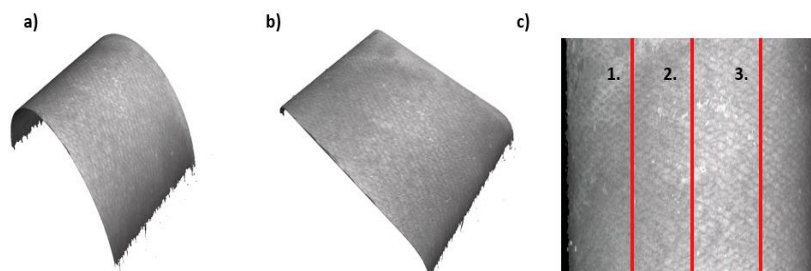
$L_0$  je délka obrobeného segmentu [ $mm$ ]

$t_o$  je doba trvání procesu [ $s$ ]

$\pi$  je Ludolfovo číslo [-]

### Měření dosažené drsnosti

Měření dosažené drsnosti povrchu (parametr Ra) probíhalo taktéž na optickém 3D mikroskopu Alicona Infinite focus G5. Po naměření byly jednotlivé segmenty rozděleny v 3D editoru a vyrovnány pomocí funkce Form removal viz Obr. 54.

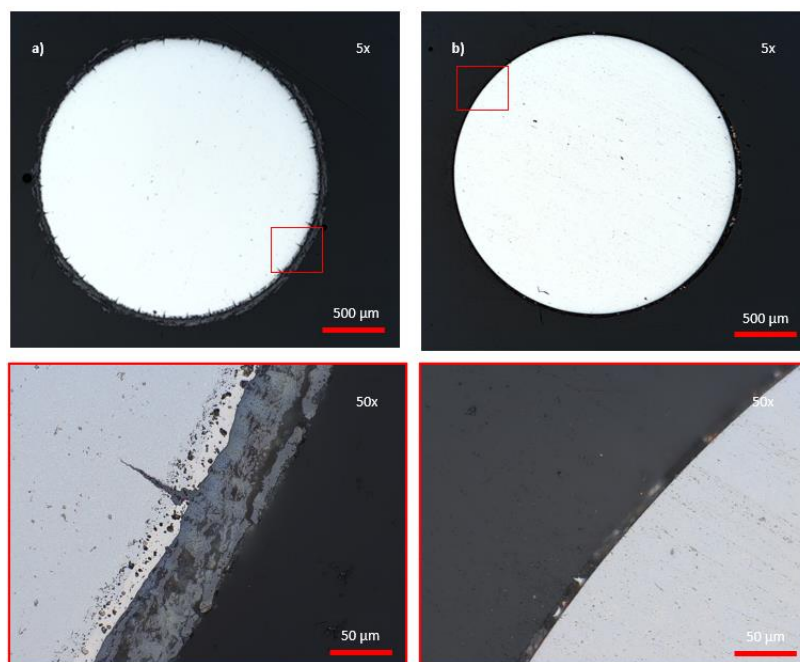


Obr. 54 a) segment po rozdělení pomocí 3D editoru, b) narovnaný segment pomocí funkce form removal, c) ukázka měření drsnosti [práce autora]

Následně byla drsnost povrchu měřena na třech místech znázorněných na Obr. 54c a naměřené hodnoty byly zprůměrovány a uvedeny v Příloha 1.

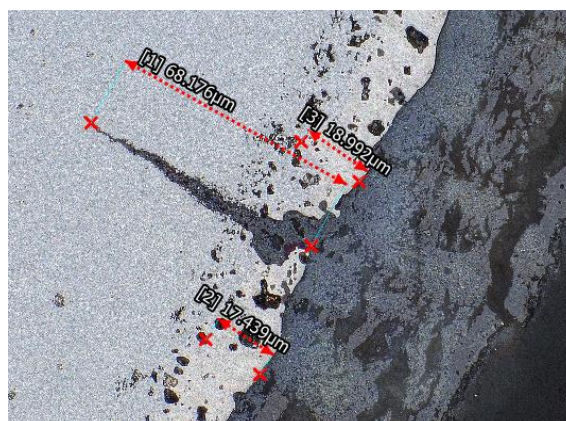
### Měření tepelného ovlivnění

Měření tepelného ovlivnění probíhalo na laserovém konfokálním mikroskopu Keyence VK-X 3000. Jednotlivé vzorky byly nejdříve naskenovány s objektivem s pětinasobným zvětšením. Na Obr. 55a je naskenovaný vzorek po obrobení na nanosekundovým laserovém zdroji a na Obr. 55b je zobrazený vzorek obrobený femtosekundovým laserovým zdrojem. Následně se vybrala významná oblast z pohledu možného tepelného ovlivnění (červený rámeček) a naskenovala se objektivem s padesáti násobným zvětšením. Vzniklé obrázky jsou vidět v červeném ohrazení na Obr. 55.



Obr. 55 Naskenované vzorky a) vzorek obrobený ns pulzy b) vzorek obrobený fs pulzy [práce autora]

Po naskenování následovalo měření velikosti tepelného ovlivnění, popřípadě délka vzniklých trhlin, viz Obr. 56, na kterém je vidět změřený vzorek obrobeného ns laserovým zdrojem.



Obr. 56 Příklad změřeného tepelného ovlivnění a délky trhliny po obrobení ns pulzy [práce autora]

## 4.7 Vyhodnocení experimentu

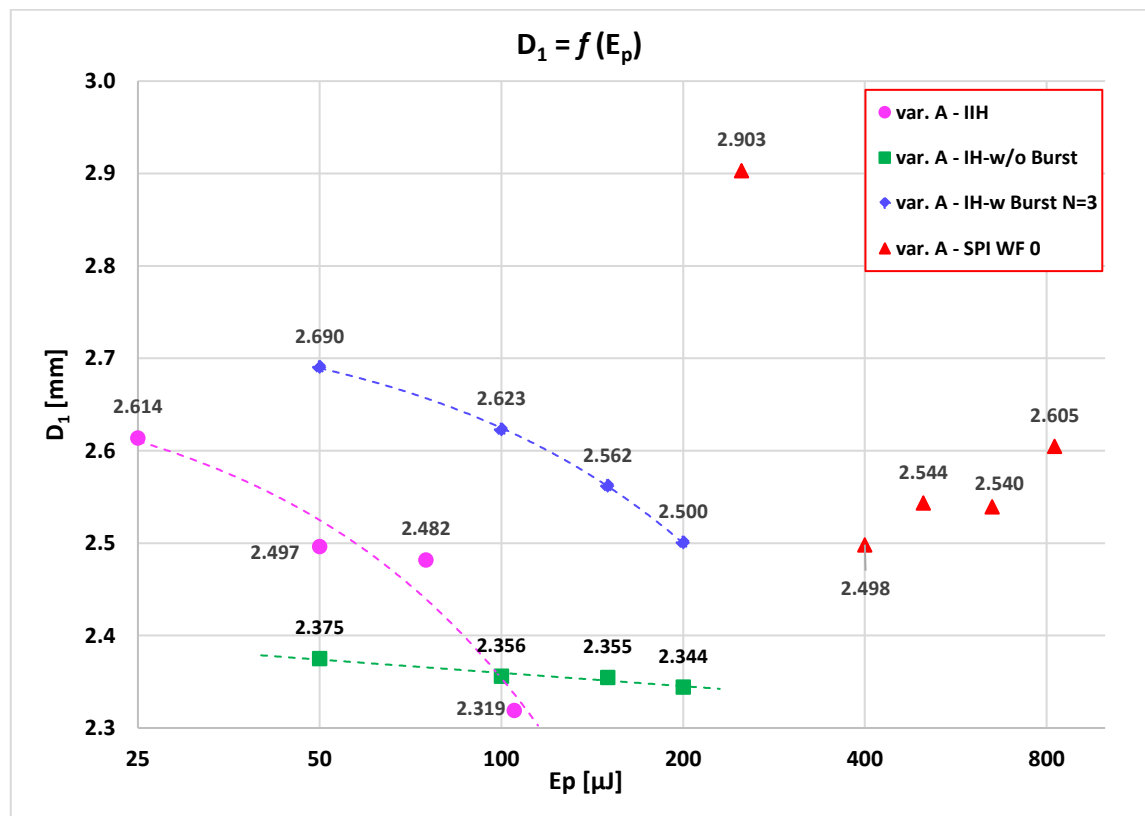
V této kapitole jsou vyhodnocena naměřená data ze všech přístupů.

### 4.7.1 Vyhodnocení přístupu tangenciálního laserového soustružení dle varianty A

Proces tangenciálního laserového soustružení dle varianty A vychází ze schématu na Obr. 50. Použité procesní parametry jsou uvedeny v Tab. 11 a celý proces trval 1527 sekund.

#### Vyhodnocení dosažených průměrů po laserovém soustružení

Vyhodnocení dosažených průměrů po laserovém tangenciálním soustružení jsou vidět na Graf 1, z naměřených hodnot je vidět, že ani při jednom nastavení nedošlo k dosažení teoreticky vypočítaného průměru 2,25 mm, kterého se mělo dosáhnout v závislosti na použité hloubce řezu  $a_p$  a počtu přejezdů. Avšak nejbližše se hodnotě 2,25 mm přiblížilo nastavení, kdy byla použita II H ( $\lambda = 532$  nm) s energií v pulzu 105  $\mu$ J, kdy bylo dosaženo hodnoty průměru 2,319 mm. Zároveň zbylými nastaveními I IH (25; 50; 75  $\mu$ J) bylo dosaženo poměrně vysokých úběrů v poměru k použitým energiím v pulzu oproti ostatním nastavením.



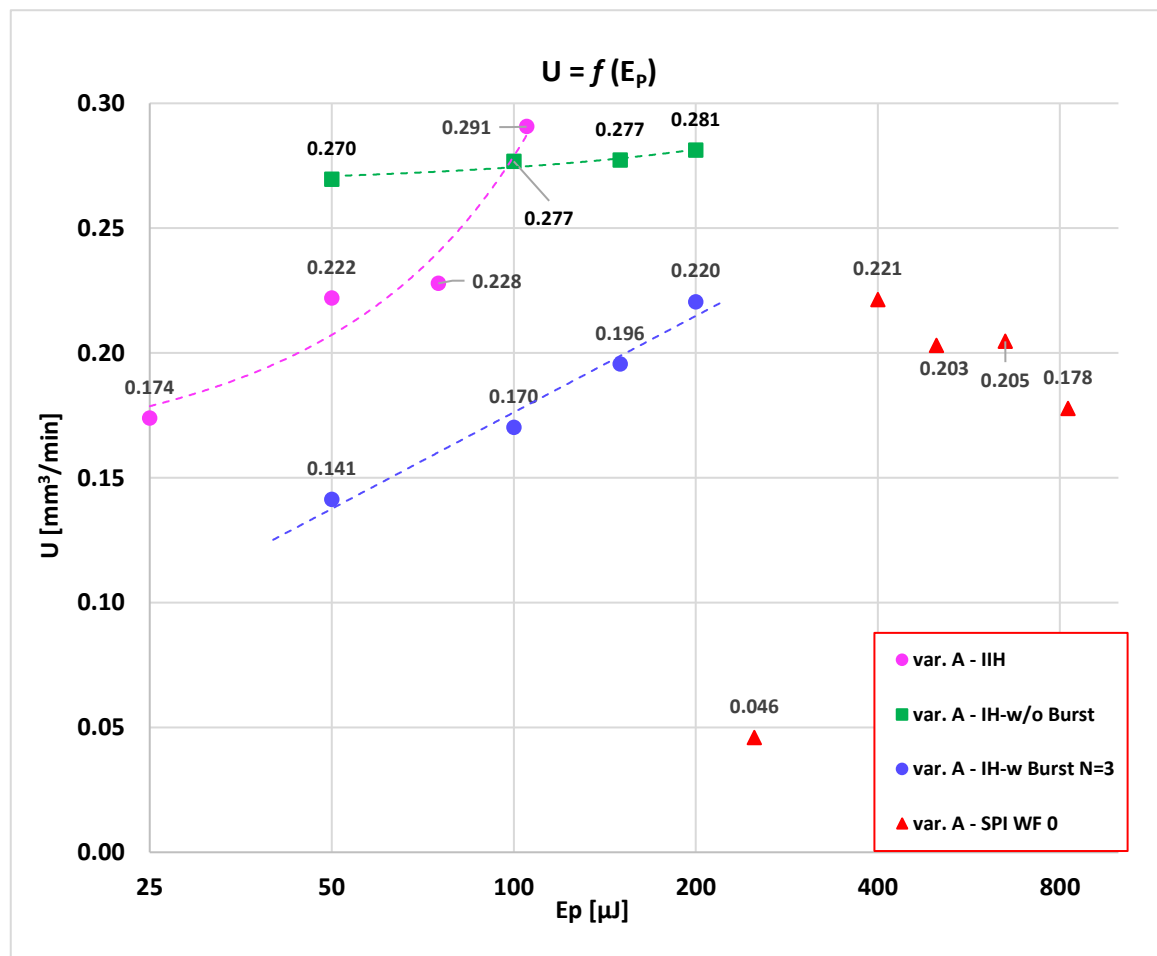
Graf 1 Závislost dosaženého průměru na použité energii v pulzu při tangenciálním laserovém soustružení dle varianty A [práce autora]

Co se týče nastavení IH ( $\lambda = 1030$  nm) bez použití burst módu je vidět, že hodnoty se téměř neměnily v závislosti na použité energii v pulzu (50; 100; 150; 200  $\mu$ J). Z toho vyplývá, že i pro stejný úběr lze použít nižší energii v pulzu při tomto způsobu laserového soustružení. Při nastavení IH s použitím burst módu došlo při zvětšování energie v pulzu z 50  $\mu$ J na 200  $\mu$ J k redukci průměru z 2,69 na 2,5 mm což je poměrně nízký nárůst

vzhledem k tomu, že se energie v pulzu navýšila o čtyřnásobek. Poslední nastavení laseru bylo využití nanosekundového laserového zdroje SPI s použitím WF 0 (wave from 0). Došlo zde k velké změně dosažených průměrů 2,903 mm pro energii v pulzu 250  $\mu\text{J}$ , která je takto nízká vlivem nízké interakce laserového paprsku s obrobkem, na hodnotu 2,498 mm pro 400  $\mu\text{J}$ . Při dalším navyšování energie v pulzu (500; 650; 850  $\mu\text{J}$ ) se opět hodnota dosaženého průměru zvyšovala. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Příloha 1.

### Vyhodnocení minutového úběru

Na Graf 2 je vidět, že minutový úběr se zvyšuje se snižující se hodnotou dosaženého průměru, viz Graf 1. Nejvyšších hodnot minutového úběru 0,291  $\text{mm}^3/\text{min}$  bylo dosaženo při použití IIH. U IH bez použití burst módu měl minutový úběr téměř konstantní průběh s nejvyšší hodnotou 0,281  $\text{mm}^3/\text{min}$ . Dále po použití IH s burst módem o třech pulzech měly vypočítané hodnoty lineární průběh, přičemž nejvyšší hodnoty 0,22  $\text{mm}^3/\text{min}$  bylo dosaženo při použití 200  $\mu\text{J}$ . Poměrně zajímavé hodnoty vykázal minutový úběr po obrobení WF 0, kdy hodnota minutového úběru rapidně vyskočila z hodnoty 0,046  $\text{mm}^3/\text{min}$  na 0,221  $\text{mm}^3/\text{min}$  a následně se poté nezvyšovala, ale mírně klesala, a to navzdory zvyšující se energii v pulzu. Ostatní vypočítané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 15 v Příloha 1.

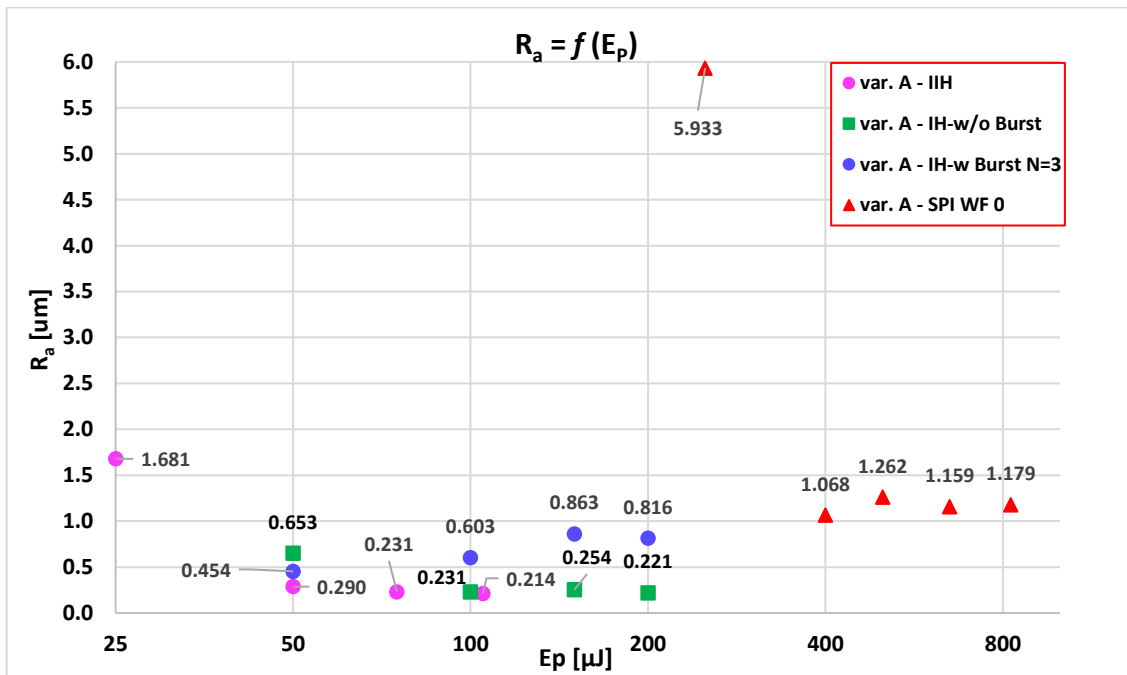


Graf 2 Závislost minutového úběrů u na použité energii v pulzu při tangenciálním laserovém soustružení dle varianty A [práce autora]



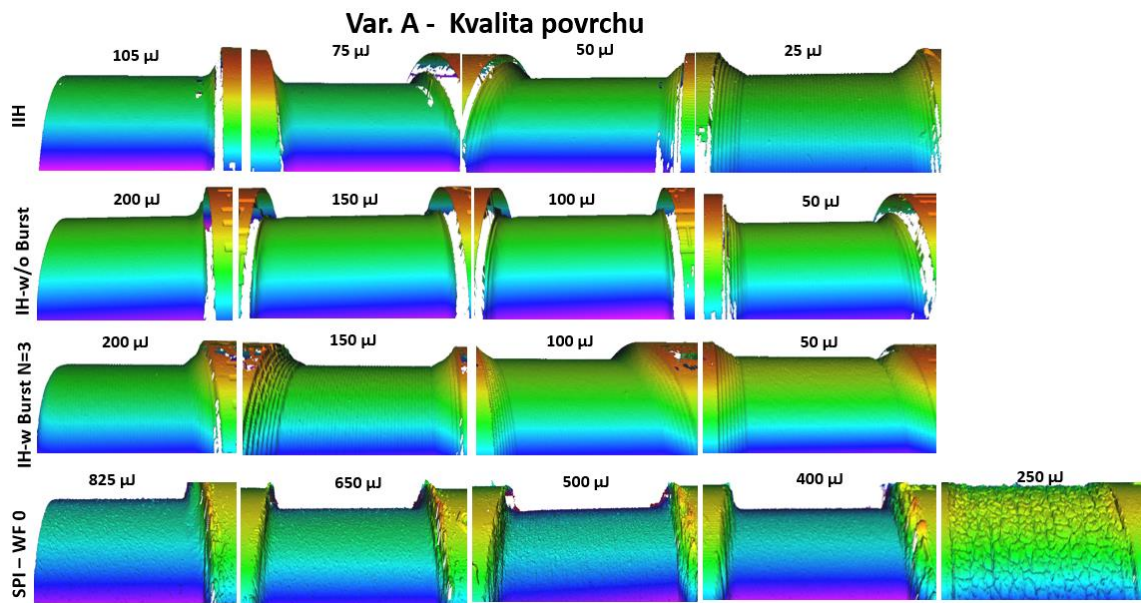
## Vyhodnocení dosažené drsnosti povrchu

Dosažená drsnost povrchu je znázorněna na Graf 3, z něhož lze vyčíst, že nejnižší hodnoty drsnosti povrchu 0,214  $\mu\text{m}$  bylo dosaženo při použití IIH s energií v pulzu 105  $\mu\text{J}$ . Současně při použití nastavení s IIH byla naměřena i nejvyšší drsnost povrchu 1,681  $\mu\text{m}$  ze všech nastavení s femtosekundovými pulzy o délce  $\tau_p = 260$  fs. Vysoká drsnost povrchu je spojena s nízkou energií v pulzu, konkrétně 25  $\mu\text{J}$ , což způsobilo vznik spirálové struktury na povrchu, jak je znázorněno na Obr. 57, kde je porovnána kvalita povrchu po laserovém soustružení s energiemi od 25 do 105  $\mu\text{J}$ .



Graf 3 Dosažená drsnost v závislosti na použité energii v pulzu při tangenciálním laserovém soustružení dle varianty A [práce autora]

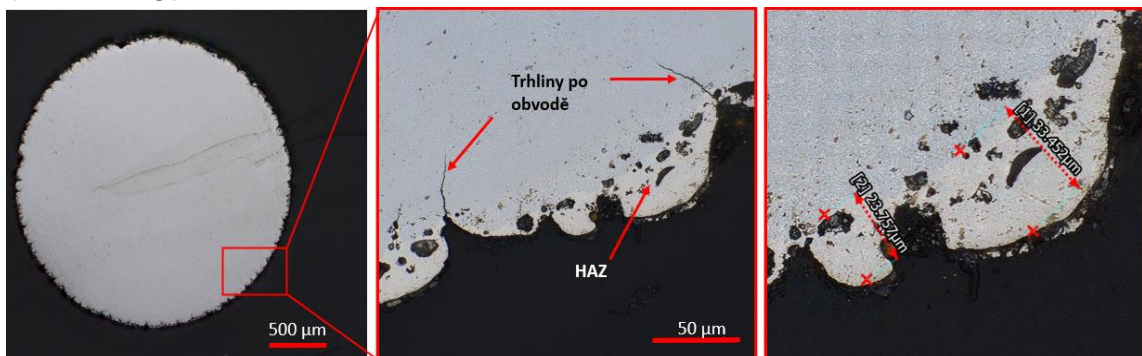
Podobnou drsnost povrchu jako byla naměřena při IIH, vykazoval povrch po laserovém soustružení IH bez použití burst módu, kde nejnižší hodnota drsnosti povrchu byla 0,221  $\mu\text{m}$  při energii v pulzu 200  $\mu\text{J}$ . V případě IH s burst módem o třech pulzech je vidět, že nejnižší drsnosti povrchu 0,454  $\mu\text{m}$  bylo dosaženo při energii v pulzu 50  $\mu\text{J}$ . Tento jev lze vysvětlit tím, že použití nízké energie v pulzu spolu s burst módem vede k minimálnímu úběru materiálu, což je patrné z předchozích grafů, a povrch je spíše vyhlazován laserovým paprskem. Z Grafu 3 je vidět, že pro nastavení WF 0 s nanosekundovými pulzy o délce  $\tau_p = 58$  ns, se hodnoty drsnosti povrchu při energiích od 400 do 825  $\mu\text{J}$  téměř neměnily. Nejvyšší hodnota drsnosti povrchu 5,993  $\mu\text{m}$  byla naměřena po laserovém soustružení energií v pulzu 250  $\mu\text{J}$ . Důvodem vysoké drsnosti povrchu je při použití nízké energie v pulzu je, to že energie v pulzu je příliš nízká a dochází pouze k minimálnímu úběru a větší část energie je poté přeměněna na teplo a akumulována materiálem za vzniku tepelně ovlivněné oblasti. Tento rozdíl v kvalitě povrchu po použití 250 a 400  $\mu\text{J}$  je zobrazen na Obr. 57 spolu s vývojem kvality povrchu všech vzorků v závislosti na energii v pulzu.



Obr. 57 Ukázka vývoje kvality povrchů po tangenciálním laserovém soustružení dle varianty A [práce autora]

### Vyhodnocení tepelného ovlivnění

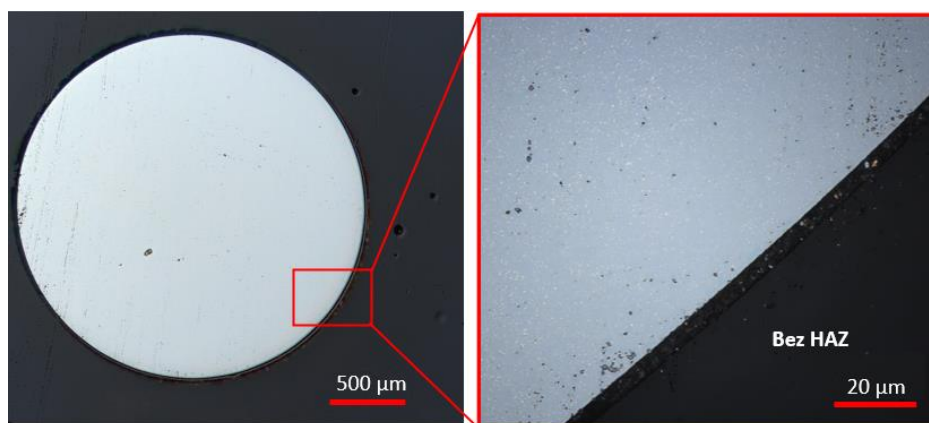
Vyhodnocení tepelně ovlivněné oblasti (HAZ) bylo provedeno pouze po laserovém soustružení nanosekundovým laserovým zdrojem SPI s nastavením WF 0, jelikož pouze u toho nastavení byla zaznamenána tepelně ovlivněná oblast. Vznik tepelně ovlivněné oblasti byl způsoben nejspíše délkou pulzů  $\tau_p = 58$  ns, což vedlo k odebrání materiálu pomocí termální ablace, při níž byla větší část energie přeměněna na teplo, které bylo akumulováno materiálem. Největší tepelně ovlivněná oblast byla pozorována při energii v pulzu 250  $\mu$ J, jak je znázorněno na Obr. 58, kde velikost tepelně ovlivněné oblasti dosáhla až 35  $\mu$ m. Důvodem byla nejspíše příliš nízká energie v pulzu, při níž docházelo pouze k natavení povrchu, jak již bylo zmíněno při vyhodnocování drsnosti povrchu. U ostatních energií v pulzu se velikost tepelně ovlivněné oblasti pohybovala do 10  $\mu$ m, viz Příloha 3.



Obr. 58 Ukázka tepelného ovlivnění pro nastavení WF 0 s energií v pulzu 250 $\mu$ J [práce autora]

Jak již bylo zmíněno, u ostatních nastavení nebyla pozorována žádná tepelně ovlivněná oblast, protože laserový paprsek postupně pronikal do materiálu pomocí hloubky řezu  $a_p$ . Díky tomu nedocházelo k velké akumulaci tepla a současně byly použity ultrakrátké laserové pulzy o délce  $\tau_p = 260$  fs, což vedlo k atermální ablací materiálu a zabránilo vytvoření tepelně ovlivněné oblasti, viz Obr. 59. Ostatní obrázky jsou uvedeny v Příloha 3.





Obr. 59 Ukázka vzorku bez tepelně ovlivněné oblasti pro nastavení IH bez burst módu s energií v pulzu 200 µJ [práce autora]

#### 4.7.2 Vyhodnocení přístupu quasi-tangenciálního laserového soustružení-varianty B

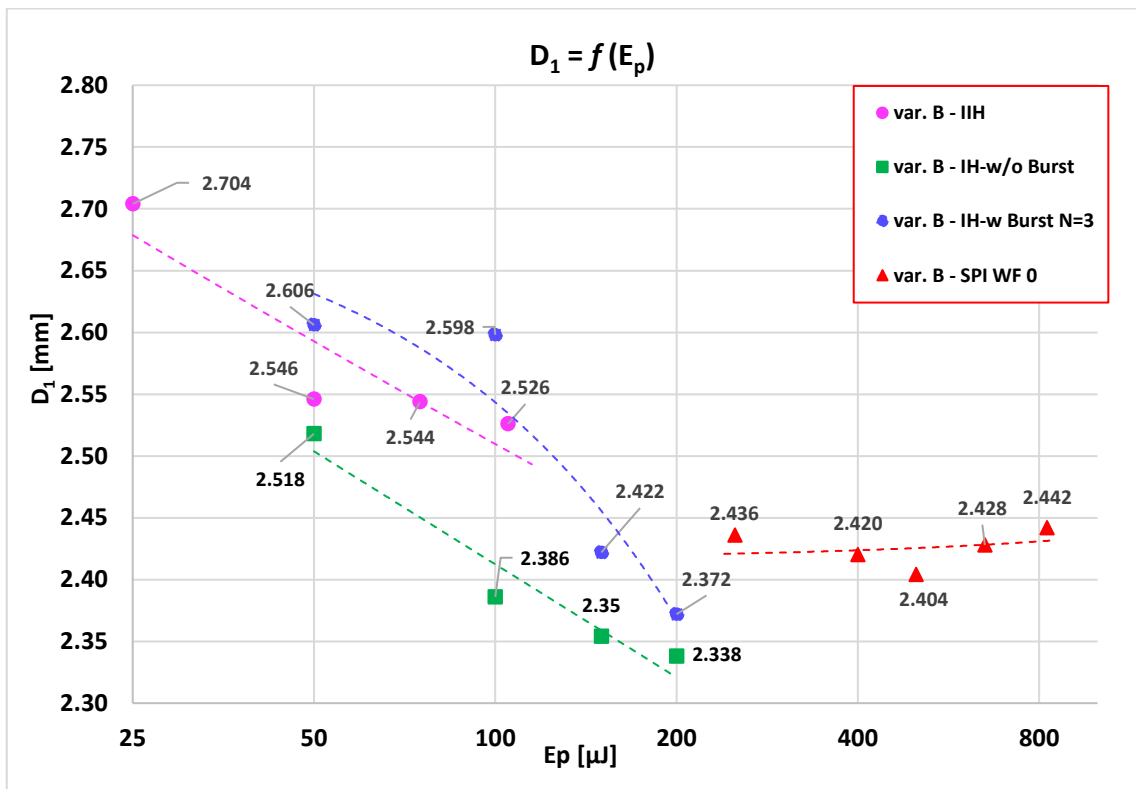
Proces quasi-tangenciálního laserového soustružení dle varianty B vychází ze schématu viz Obr. 51. Použité procesní parametry jsou uvedeny v Tab. 12 a celý proces trval 520 sekund.

##### Vyhodnocení dosažených průměrů po laserovém soustružení

Vyhodnocení hodnot dosažených průměrů po quasi-tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B je zobrazeno na Grafu 4. Z grafu je vidět, že nejmenší naměřená hodnota průměru byla naměřena při nastavení IH bez použití burst módu, kdy bylo dosaženo 2,338 mm při energii v pulzu 200 µJ. Následně při použití nižších energií v pulzu (50; 100; 150 µJ) je vidět, že se zvyšuje naměřená hodnota dosaženého průměru se snižující se energií v pulzu. Při použití IH s burst módem o třech pulzech byla naměřena hodnota průměru 2,372 mm a zároveň i zde došlo s klesající energií v pulzu k nárůstu naměřené hodnoty průměru, avšak nárůst průměru zde byl výraznější než u IH bez použití burst módu. Nejmenší úběr materiálu byl naměřen u IIH, kde nejnižší hodnoty průměru bylo dosaženo energií v pulzu 105 µJ a pro energie v pulzu 75 a 50 µJ nedošlo k výrazným změnám v naměřeném průměru, ale následně je vidět velký skok pro energii v pulzu 25 µJ, kdy byla naměřena hodnota pouze 2,704 mm. Při WF 0, je z naměřených hodnot vidět, že i když docházelo ke zvyšování energie v pulzu z 250 µJ až na hodnotu 825 µJ, tak hodnoty dosažených průměrů vykazovaly konstantní trend. Konstantní charakter je nejspíše zapříčiněn počtem přejezdů, které byly pouze dva, a dlouhou dobou interakce laserového paprsku s obrobkem, při níž nedošlo k významné ablaci, ale větší část energie v pulzu se přeměnila na teplo. Všechny naměřené hodnoty jsou k dispozici v Příloha 1.

Vyhodnocení hodnot dosažených průměrů po quasi-tangenciálním laserovém soustružení podle varianty B je zobrazeno na Grafu 4. Z tohoto grafu je patrné, že nejmenší naměřená hodnota průměru 2,338 mm byla dosažena při nastavení IH bez použití burst módu s energií v pulzu 200 µJ. Při použití nižších energií v pulzu (50, 100, 150 µJ) lze pozorovat, že se naměřená hodnota průměru zvyšuje se snižující se energií v pulzu. Při použití IH s burst módem o třech pulzech byla největší redukce průměru pozorována rovněž u energie v pulzu 200 µJ, kdy byla naměřena hodnota průměru 2,372 mm. Zároveň

zde došlo k nárůstu průměru s klesající energií v pulzu, přičemž tento nárůst byl výraznější než u IH bez použití burst módu. U nastavení IIH byl naměřen nejmenší průměr 2,526 mm, kterého bylo dosaženo energií v pulzu 105  $\mu\text{J}$ . Pro energie v pulzu 75 a 50  $\mu\text{J}$  nedošlo k výrazným změnám v naměřeném průměru, avšak následně lze na Graf 4 vidět, že došlo k výraznému skoku při energii v pulzu 25  $\mu\text{J}$ , kdy byla naměřena hodnota 2,704 mm. Při WF 0 je z naměřených hodnot zřejmé, že ačkoli se energie v pulzu zvyšovala z 250  $\mu\text{J}$  až na 825  $\mu\text{J}$ , hodnoty dosažených průměrů vykazovaly konstantní trend. Tento konstantní charakter lze pravděpodobně způsoben počtem přejezdů, které byly pouze dva, a dlouhé době interakce laserového paprsku s obrobkem, během níž nedošlo k významné ablaci a větší část energie v pulzu se přeměnila na teplo. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v Příloze 1.

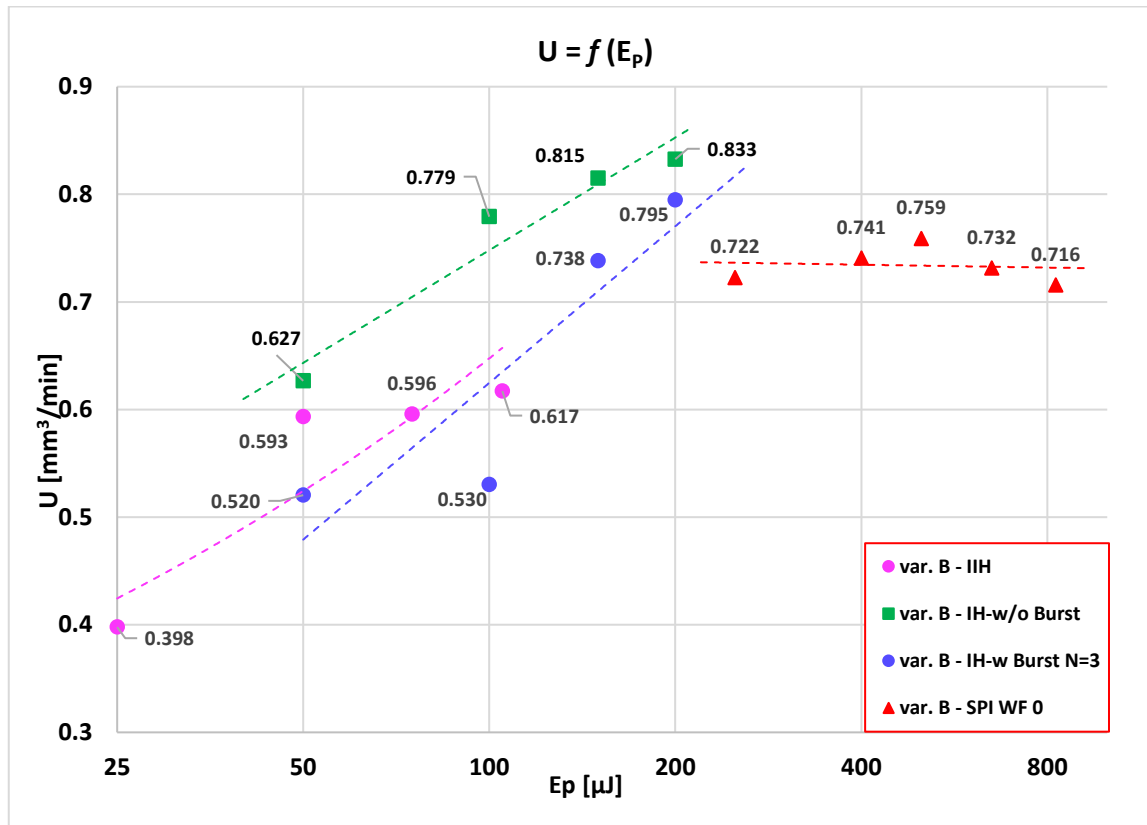


Graf 4 Závislost dosaženého průměru na použité energii v pulzu při quasi-tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B [práce autora]

### Vyhodnocení minutového úběru

Vypočítané hodnoty minutového úběru pro všechna nastavení jsou zobrazeny na Graf 5. Z grafu je patrné, že hodnoty minutového úběru vzrostly v průměru o 300 % ve srovnání s variantou A při použití pulzů o délce  $\tau_p = 260$  fs. Nejvyšší minutový úběr, 0,833  $\text{mm}^3/\text{min}$ , byl dosažen u IH bez použití burst módu při energii v pulzu 200  $\mu\text{J}$ , přičemž stejnou energií v pulzu bylo dosaženo hodnoty 0,795  $\text{mm}^3/\text{min}$  pro nastavení IH s burst módem o třech pulzech. Nejnižší hodnoty minutového úběru byly vypočítány u IIH, kde maximální hodnota minutového úběru byla pouze 0,617  $\text{mm}^3/\text{min}$  při energii v pulzu 105  $\mu\text{J}$ . Při použití nastavení s nanosekundovými pulzy WF 0 s délkou pulzů  $\tau_p = 58$  ns se minutový úběr zvýšil až o 400 % ve srovnání s tangenciálním laserovým soustružením dle varianty A, přičemž hodnota minutového úběru dosáhla hodnoty až 0,759  $\text{mm}^3/\text{min}$  při energii v pulzu 500  $\mu\text{J}$ . Tento výrazný nárůst byl způsoben zkrácením

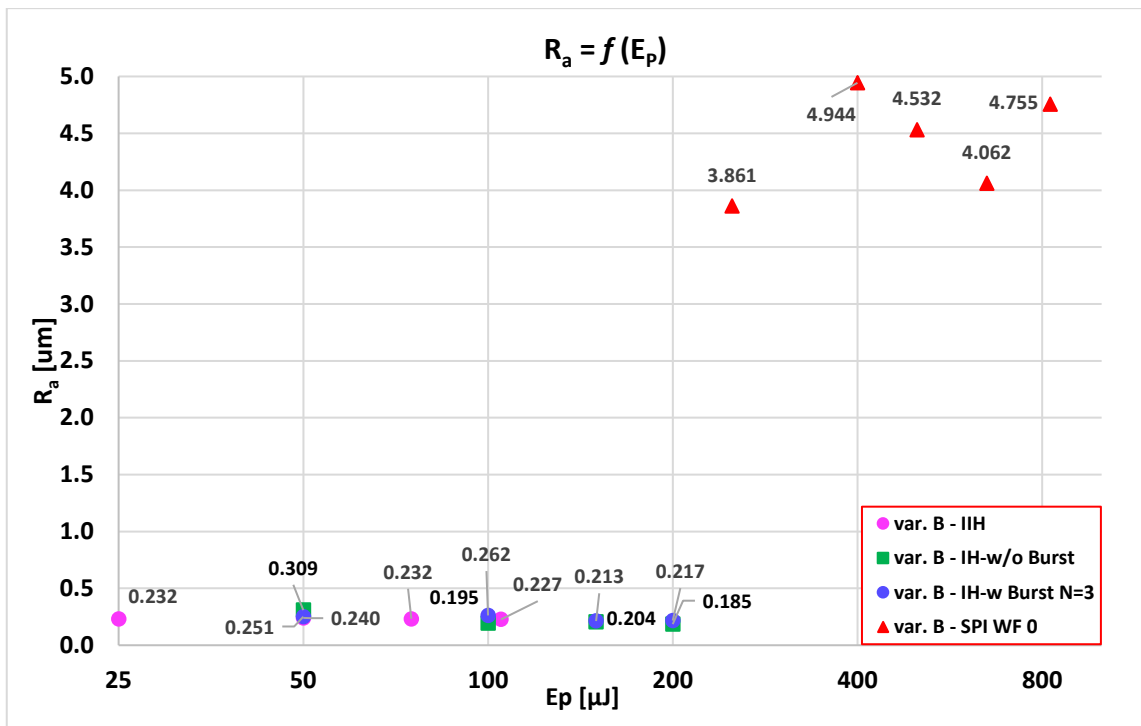
délky celého procesu o 65 %, přičemž byl odebrán přibližně stejný objem materiálu. Velikost minutového úběru je úzce spojena s dosaženou hodnotou průměru, respektive s velikostí odebraného objemu materiálu. Proto byl nejvyšší minutový úběr vypočítán u nastavení, při kterých došlo k největší redukci průměru obrobku, viz Příloha 1.



Graf 5 Závislost minutového úběru  $u$  na použité energii v pulzu při quasi-tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B [práce autora]

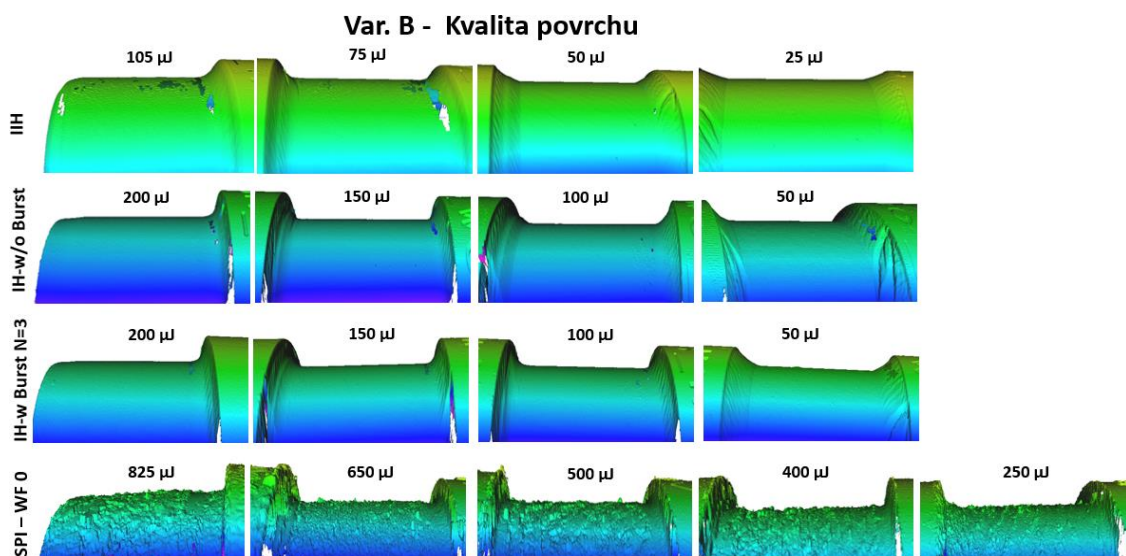
### Vyhodnocení dosažené drsnosti povrchu

Naměřené hodnoty drsnosti povrchu po quasi-tangenciálním soustružení dle varianty B jsou vyneseny v Graf 6. Na tomto grafu je vidět, že hodnoty drsnosti povrchu pro nastavení IIH, IH bez burst módu a IH s burst módem o třech pulzech se pohybovaly v rozmezí 0,185 - 0,309  $\mu\text{m}$ . Zároveň byly naměřené hodnoty nižší než po laserovém soustružení variantou A při použití stejných nastavení a energií v pulzu. Důvodem nižší drsnosti povrchu je druhý přejezd, který se pohybuje po stejné dráze jako první, avšak zároveň je více rozostřen, a tudíž působí na obrobek krom úběru i leštícím efektem. Nejnižší hodnoty drsnosti povrchu 0,185  $\mu\text{m}$  bylo dosaženo IH bez použití burst módu při energii v pulzu 200  $\mu\text{J}$ . Při nastavení, při němž byl pro IH použit burst mód o třech pulzech byla naměřena nejnižší drsnost povrchu 0,213  $\mu\text{m}$  s použitím energie v pulzu 150  $\mu\text{J}$ . Pro IIH byla naměřena nejnižší drsnost 0,227  $\mu\text{m}$  při energii v pulzu 105  $\mu\text{J}$ , viz Obr. 60.



Graf 6 Dosažená drsnost v závislosti na použité energii v pulzu při quasi – tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B [práce autora]

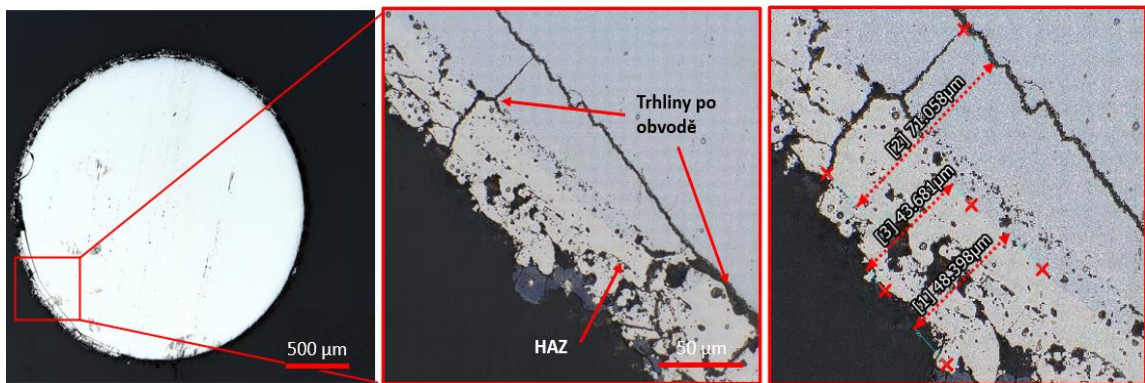
Při použití nastavení WF 0 nedošlo ke zlepšení drsnosti povrchu jako u nastavení s femtosekundovými pulzy, ale naopak k poměrně velkému zhoršení. Nejnižší drsnosti povrchu 3,861 μm bylo dosaženo energií v pulzu 250 μJ a nejvyšší hodnota drsnosti povrchu 4,944 μm byla naměřena pro energii v pulzu 400 μJ. Srovnání nejlepší a nejhorší kvality povrchu je vidět na Obr. 60, kde je zároveň vidět vývoj kvality povrchů v závislosti na použité energii v pulzu pro všechna nastavení.



Obr. 60 Ukázka vývoje kvality povrchů po quasi-tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B [práce autora]

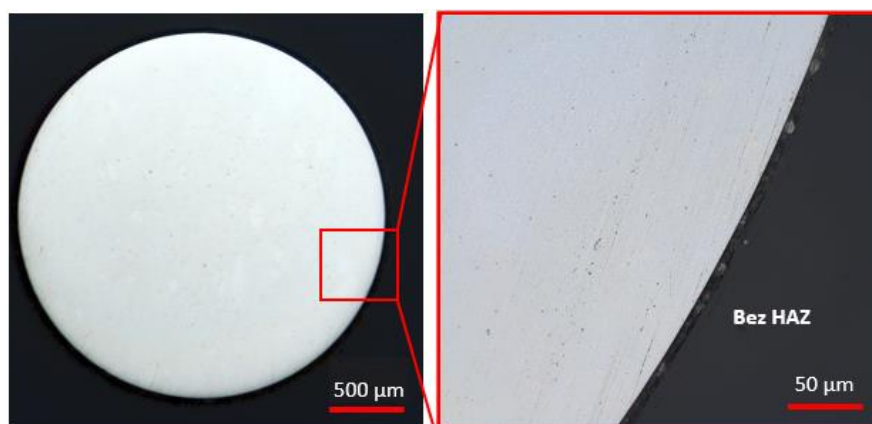
## Vyhodnocení tepelného ovlivnění

Stejně jako u tangenciálního laserového soustružení dle varianty A bylo tepelné ovlivnění pozorováno pouze při použití nanosekundového laserového zdroje s nastavením WF 0 a délkou pulzů  $\tau_P = 58$  ns. Na Obr. 61 je znázorněna největší tepelně ovlivněná oblast, která byla naměřena pro energii v pulzu 500  $\mu$ J. Z obrázku je patrné, že vznikají výrazně větší trhliny, jejichž délka dosahuje přibližně 70  $\mu$ m a hloubka tepelně ovlivněné oblasti se pohybuje mezi 40–50  $\mu$ m, což představuje značný nárůst oproti variantě A. U ostatních vzorků se velikost tepelně ovlivněné oblasti pohybovala v rozmezí od 3 do 45  $\mu$ m v závislosti na energii v pulzu, viz Příloha 3. Takto výrazné tepelné ovlivnění lze přisoudit dlouhé interakci laserového paprsku s obrobkem, vysoké energii v pulzu, a také umístění laserového paprsku na povrchu obrobku. Laserový paprsek nevstupuje postupně do materiálu, ale pohybuje se pouze v jedné dráze, což vede k větší ozářené ploše než v případě tangenciálního laserového soustružení dle varianty A, a tím i k vyšší akumulaci tepla.



Obr. 61 Ukázka tepelného ovlivnění po quasi-tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B pro nastavení nanosekundového laseru SPI WF0 s energií v pulzu 500  $\mu$ J [práce autora]

Nastavení s femtosekundovými pulzy s délkou pulzu  $\tau_P = 260$  fs nevykazovala žádný vznik tepelně ovlivněné oblasti vlivem atermální ablace viz Obr. 62.



Obr. 62 Ukázka vzorku bez tepelně ovlivněné oblasti po quasi-tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B pro nastavení IH bez burst módu s energií v pulzu 200  $\mu$ J [práce autora]

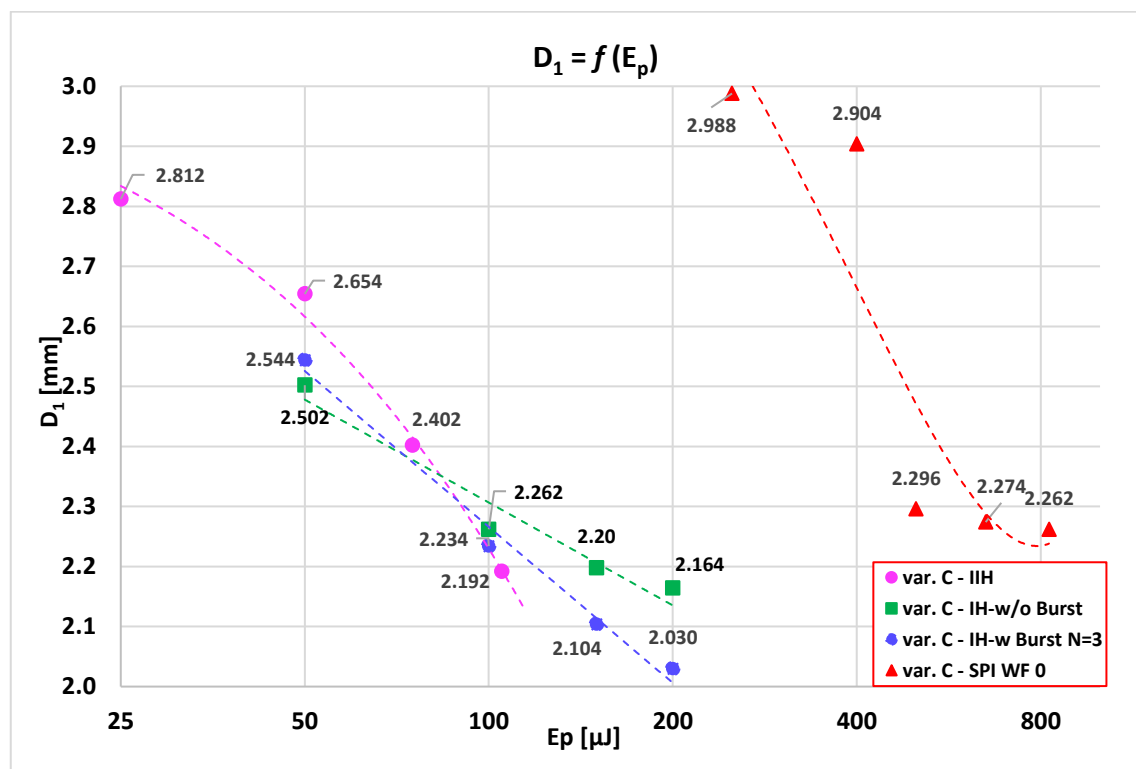


## 4.8 Vyhodnocení tangenciálního laserového soustružení- varianta C-vlastní řešení

Proces tangenciálního laserového soustružení dle varianty C (vlastní řešení) vychází ze schématu na Obr. 52. Použité procesní parametry jsou uvedeny v Tab. 13 a celý proces trval 389 sekund.

### Vyhodnocení dosažených průměrů po laserovém soustružení

V Graf 7 je prezentováno vyhodnocení naměřených průměrů při provedení vlastního řešení tangenciálního laserového soustružení. Analyzujeme-li naměřené hodnoty, je patrné, že minimální průměr, respektive největší úběr, byl dosažen při použití režimu IH s burst módem o třech pulzech, kdy byl při energii v pulzu 200  $\mu\text{J}$  naměřen průměr 2,030 mm. Pravděpodobným důvodem vysokého úběru je poloha laserového paprsku, který při prvním přejezdu interagoval s materiálem pod úhlem  $30^\circ$ . Následně se zdá, že proces přecházel z quasi-tangenciálního na radiální, což vedlo k vyšší efektivitě burst módu ve srovnání s ostatními nastaveními. Při nastavení IH bez použití burst módu byla naměřena nejmenší hodnota průměru 2,164 mm energií v pulzu 200  $\mu\text{J}$ . Zároveň bylo pozorováno, že s poklesem energie v pulzu docházelo k postupnému snižování množství odebraného materiálu, resp. zvyšování hodnoty průměru u obou těchto nastavení.



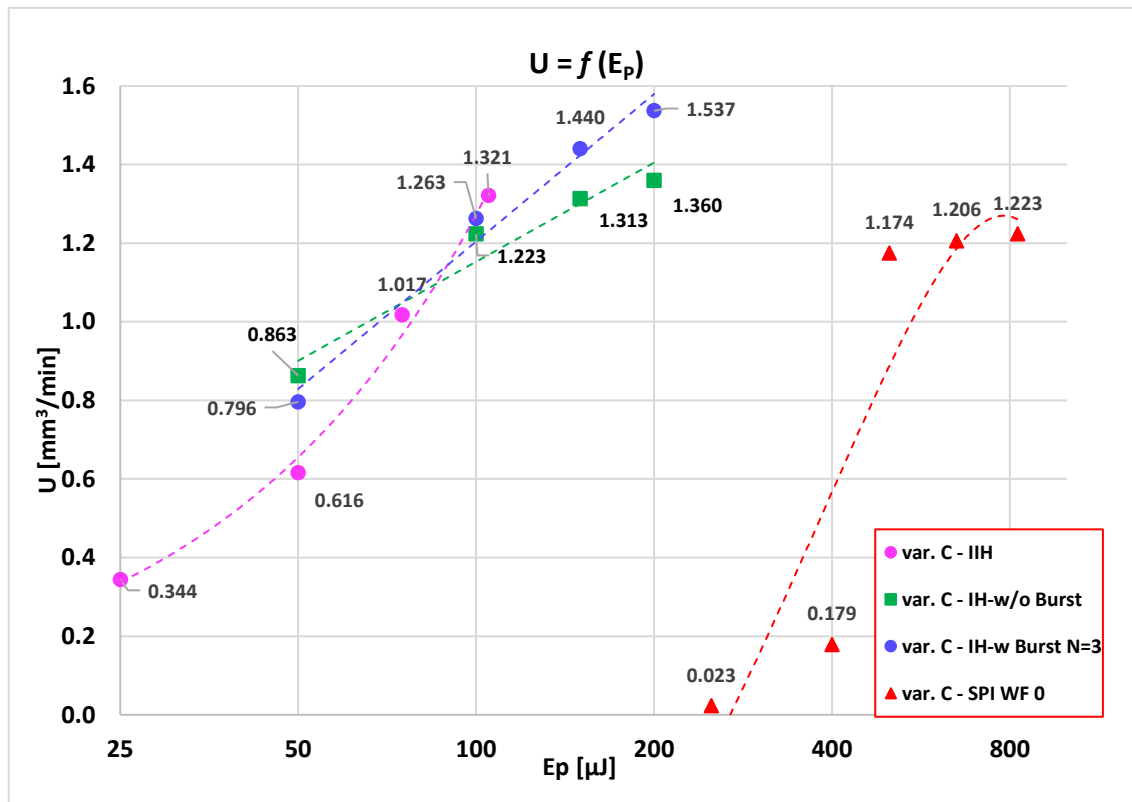
Graf 7 Závislost dosaženého průměru na použité energii v pulzu při – tangenciálním laserovém soustružení dle varianty C – vlastní řešení [práce autora]

Velice podobného minimálního průměru jako při použití IH bez burst módu bylo dosaženo i s použitím IIH s energií v pulzu 105  $\mu\text{J}$ , kdy byla naměřena hodnota 2,192 mm. V porovnání s ostatními nastaveními s pulzy o délce  $\tau_p = 260$  fs (IH bez burst módu a IH s burst módem o třech pulzech) lze u IIH pozorovat velký nárůst naměřených hodnot průměru s klesající energií v pulzu. Poněkud zajímavé chování vykazovalo

nastavení WF 0 s nanosekundovými pulzy o  $\tau_p = 58$  ns, kdy při energiích pulzu 250 a 400  $\mu\text{J}$  nedošlo téměř k žádné redukci průměru. Poté se však redukce průměru skokově zvýšila při energii v pulzu 500  $\mu\text{J}$  a mírně dále stoupala až do hodnoty energie v pulzu 825  $\mu\text{J}$ , kdy byla naměřena hodnota průměru 2,262 mm.

### Vyhodnocení minutového úběru

Při použití vlastního nastavení procesu tangenciálního laserového mikroobrábění, jak je znázorněno na Grafu 8, bylo dosaženo nejvyšších hodnot minutových úběrů ve srovnání s variantami laserového soustružení A nebo B. Tyto vysoké hodnoty jsou výsledkem značně vyšší redukce průměrů a zároveň díky kratší době trvání celého procesu, který byl o 25 % kratší než u varianty B a o 75 % kratší než u varianty A. Nejvyšší minutový úběr 1,537  $\text{mm}^3/\text{min}$  byl dosažen při použití IH s burst módem se třemi pulzy a energií v pulzu 200  $\mu\text{J}$ . Druhý nejvyšší minutový úběr 1,360  $\text{mm}^3/\text{min}$  byl dosažen při stejném nastavení energie v pulzu, ale s IH bez burst módu. Srovnatelné hodnoty jako IH bez burst módu byly dosaženy s IIH při energii v pulzu 105  $\mu\text{J}$ , kdy hodnota minutového úběru činila 1,321  $\text{mm}^3/\text{min}$ .

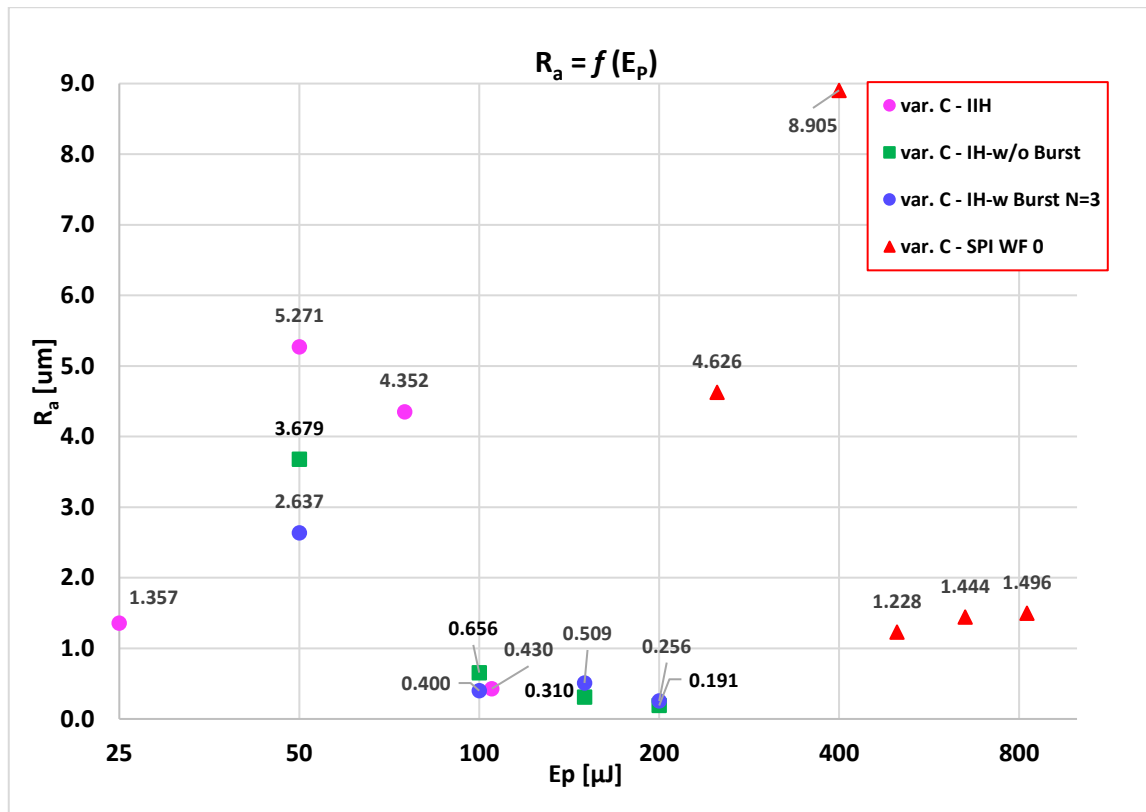


Graf 8 Závislost minutového úběrů  $U$  na použité energii v pulzu při tangenciálním laserovém soustružení dle varianty C – vlastní přístup [práce autora]

Vzhledem k tomu, že minutový úběr je závislý na dosaženém průměru, lze pozorovat, že při použití nanosekundových pulzů s délkou  $\tau_p = 58$  ns dosahuje nastavení WF 0 s energií v pulzu 250 a 400  $\mu\text{J}$  velmi nízkých hodnot minutového úběru. Teprve při zvýšení energie v pulzu na 500  $\mu\text{J}$  dochází k výraznému skokovému nárůstu minutového úběru, který dále mírně stoupá až do své maximální hodnoty 1,223  $\text{mm}^3/\text{min}$ . Všechny vypočítané hodnoty jsou poté uvedeny v Příloha 1.

## Vyhodnocení dosažené drsnosti povrchu

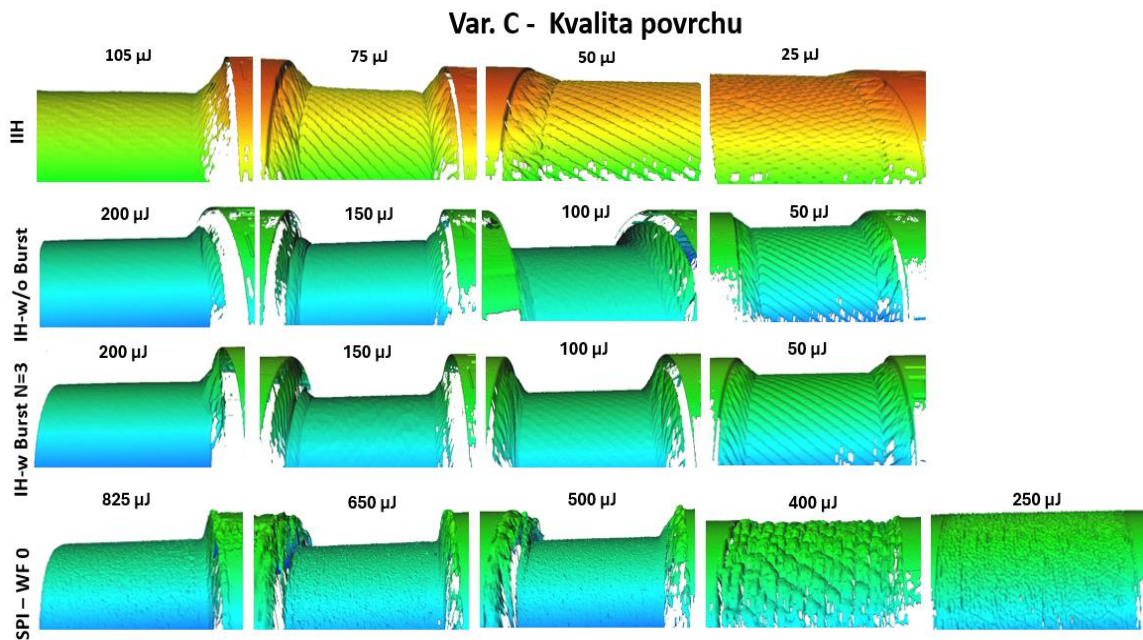
Na Graf 9 je znázorněna dosažená drsnost jednotlivých vzorků po laserovém soustružení podle vlastního řešení (varianta C). Z grafu vyplývá, že při použití femtosekundových pulzů o délce  $\tau_p = 260$  fs byly hodnoty drsnosti pod  $0,8 \mu\text{m}$  dosaženy při energii pulzu nad  $100 \mu\text{J}$ .



Graf 9 Dosažená drsnost v závislosti na použité energii v pulzu při tangenciálním laserovém soustružení dle varianty C – vlastní řešení [práce autora]

Nejnižší hodnota drsnosti povrchu  $0,191 \mu\text{m}$ , byla dosažena při energii pulzu  $200 \mu\text{J}$  nastavením IH bez použití burst módu. Při stejném nastavení energie, ale s použitím burst módu se třemi pulzy, byla dosažena drsnost povrchu  $0,256 \mu\text{m}$ . Při nastavení IIH s energií pulzu  $105 \mu\text{J}$  byla naměřena hodnota drsnosti povrchu  $0,310 \mu\text{m}$ . Z Graf 9 je patrné, že s klesající energií pulzu rostla naměřená hodnota drsnosti povrchu, přičemž při energii pulzu pod  $100 \mu\text{J}$  došlo k prudkému nárůstu drsnosti, což vedlo ke vzniku opakující se struktury na povrchu, jak je zobrazeno na Obr. 63. Tato struktura je nejvýraznější při nastavení IIH. Při nastavení IH bez burstu a IH s burst módem se třemi pulzy je tato struktura patrná i při  $100 \mu\text{J}$ , avšak při snížení energie pulzu na  $50 \mu\text{J}$  došlo k jejímu zvýraznění, viz Obr. 63. Při použití nanosekundového nastavení WF 0 s délkou pulzů  $\tau_p = 58$  ns se drsnost povrchu pro energie pulzu nad  $500 \mu\text{J}$  pohybovala pod hodnotou  $1,5 \mu\text{m}$ , přičemž nejnižší drsnost  $1,228 \mu\text{m}$  byla naměřena při použití energie v pulzu  $500 \mu\text{J}$ . Graf 9 ukazuje, že pokud je energie pulzu pro nanosekundové pulzy nižší než  $500 \mu\text{J}$ , dochází k prudkému nárůstu drsnosti povrchu až na hodnotu  $8,905 \mu\text{m}$  při  $400 \mu\text{J}$  a  $4,626 \mu\text{m}$  při  $250 \mu\text{J}$ , kdy při těchto energiích pulzu nedošlo téměř k žádné redukci průměru a povrch byl pouze nataven, což vedlo ke zhoršení drsnosti povrchu, viz Obr. 63. Všechny naměřené hodnoty drsnosti jsou uvedeny v Příloha 1.

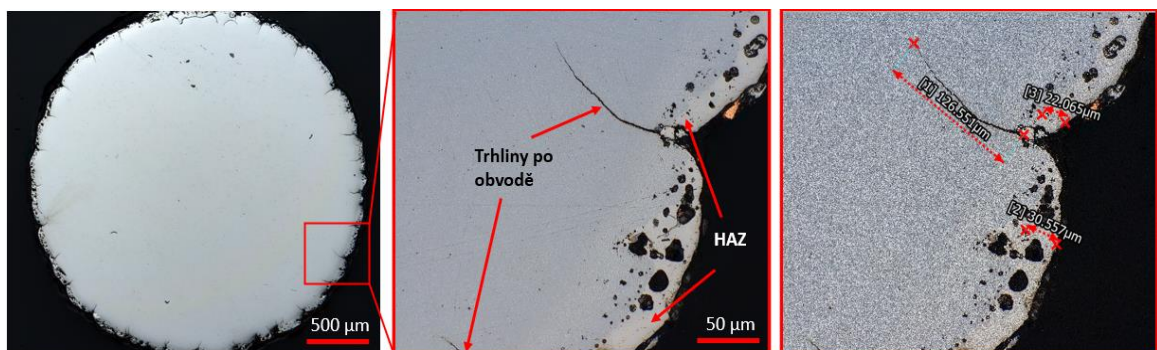




Obr. 63 Ukázka vývoje kvality povrchů po tangenciálním laserovém soustružení dle varianty C – vlastní řešení [práce autora]

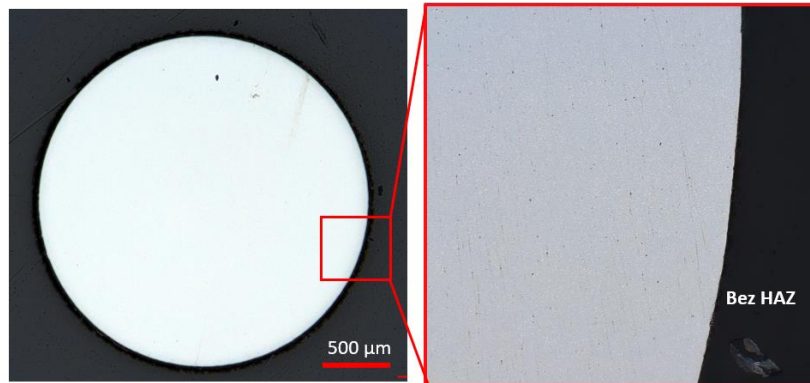
### Vyhodnocení tepelného ovlivnění

Vyhodnocení hloubky tepelně ovlivněné oblasti a délky trhlin bylo stejně jako u variant A a B pozorováno pouze při použití nanosekundových pulzů o délce  $\tau_p = 58$  ns s nastavením WF 0. Největší hloubka tepelně ovlivněné oblasti byla naměřena při energii pulzu 400  $\mu\text{J}$ , kdy se velikost tepelně ovlivněné oblasti pohybovala v rozmezí 20 až 35  $\mu\text{m}$  a velikost trhlin dosahovala až 126  $\mu\text{m}$ , jak je znázorněno na Obr. 64. Důvodem vzniku tepelně ovlivněné oblasti při relativně nízké energii pulzu bylo, že energie pulzu byla příliš nízká na efektivní úběr materiálu, což je patrné z Graf 7. Tím došlo převážně k přeměně energie na teplo, jeho akumulaci a následnému natavení povrchu vlivem termální ablace, jak je zobrazeno na Obr. 62. U ostatních energií pulzu při nastavení WF 0 se hloubka tepelně ovlivněné oblasti pohybovala v rozmezí 5-30  $\mu\text{m}$  a délka trhlin se pohybovala v rozmezí od 20 do 60  $\mu\text{m}$ , v závislosti na energii pulzu, jak je uvedeno v Příloha 3. Druhá největší tepelně ovlivněná oblast byla naměřena při energii pulzu 250  $\mu\text{J}$ .



Obr. 64 Ukázka tepelného ovlivnění po tangenciálním laserového soustružení dle varianty C nastavením WF 0 s energií v pulzu 250 $\mu\text{J}$  [práce autora]

Jak již bylo zmíněno, tepelně ovlivněná oblast a trhliny se objevovaly pouze při použití nanosekundových pulzů. U femtosekundových pulzů, jak je znázorněno na Obr. 65, se tento jev neprojevil díky ultrakrátkým pulzům  $\tau_p = 260$  fs, při kterých docházelo k odebrání materiálu atermální ablací, na rozdíl od termální ablace pozorované při nastavení WF 0.



Obr. 65 Ukázka vzorku bez tepelně ovlivněné oblasti po tangenciálním laserovém soustružení dle varianty C pro nastavení IH bez burst módu s energií v pulzu 200 μJ [práce autora]

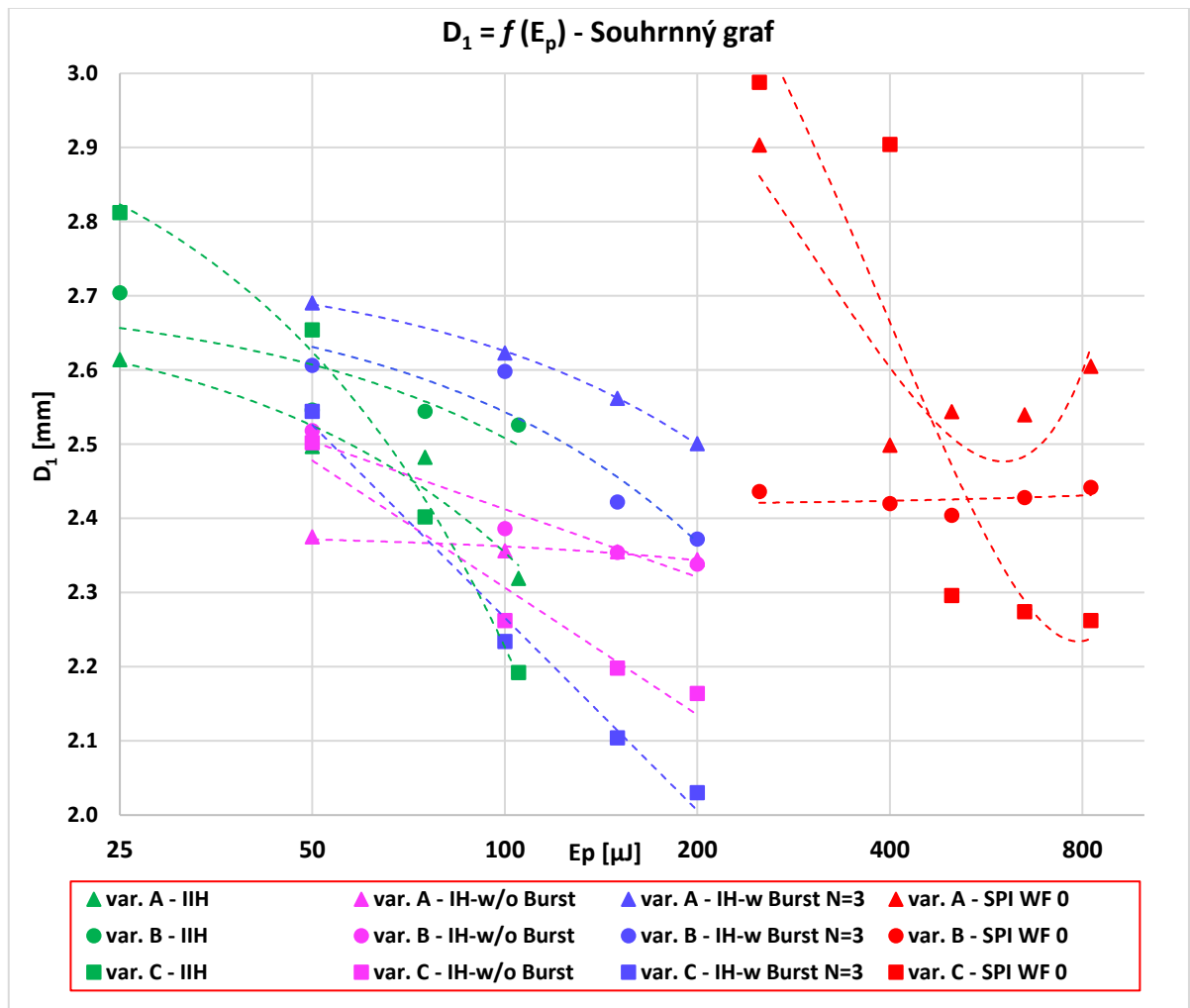
## 4.9 Shrnutí experimentu

V rámci experimentu bylo obrobena celkem 51 vzorků ve třech variantách přístupu k procesu laserového soustružení (A, B, C), kdy se energie v pulzu pohybovala pro nastavení s délkou pulzů  $\tau_p = 260$  fs od 25 do 200 μJ a pro nanosekundové pulzy délkou pulzu  $\tau_p = 58$  ns byly použity energie v pulzu v rozmezí 250–825 μJ. V této kapitole jsou shrnuty a porovnány výsledky jednotlivých přístupů.

Z Graf 10 lze odvodit, že nejmenšího úběru materiálu bylo dosaženo při aplikaci přístupu dle varianty A tangenciálního laserového soustružení, kdy proces laserového soustružení probíhal jako konvenční soustružení. Nejmenší průměr, 2,319 mm, byl naměřen při použití konfigurace IHH s energií v pulzu 105 μJ. Nastavení IH bez burst módu vykazovala zajímavé chování, kdy naměřené hodnoty průměru byly téměř totožné bez ohledu na velikost energie v pulzu. Při použití IH s burst módem o třech pulzech bylo pozorováno pozvolné snižování průměru s rostoucí energií v pulzu. U nastavení WF 0 s nanosekundovými pulzy při energii v pulzu 250 μJ nedošlo téměř k žádné redukci průměru, pravděpodobně kvůli přeměně energie na teplo. Při zvýšení energie v pulzu na 400 μJ došlo ke skokovému nárůstu odebraného materiálu (zmenšení průměru), avšak s dalším zvyšováním energie v pulzu se průměr opět zvětšoval.

Při použití quasi-tangenciálního přístupu laserového soustružení dle varianty B lze z Graf 10 vidět, že tímto přístupem bylo dosaženo nejmenší naměřené hodnoty průměru 2,338 mm pro IH bez burst módu. I když se jedná o nejvyšší úběr při tomto přístupu, ve srovnání s variantou A došlo ke zlepšení pouze o 6 μm při stejném nastavení laseru. Křivka IH s burst módem o třech pulzech ukazuje pozvolné snižování průměru s rostoucí energií v pulzu. Nastavení IHH vykazuje oproti variantě A menší redukci průměru, a to až o 200 μm, avšak délka procesu laserového soustružení dle varianty B byla o 66 % kratší. Největší nárůst odebraného materiálu oproti variantě A lze pozorovat u nastavení WF 0, kde se zvýšila hodnota odebraného materiálu až o 17 % zároveň hodnota

dosaženého průměru je téměř konstantní bez ohledu na velikost energie v pulzu, viz Graf 10.



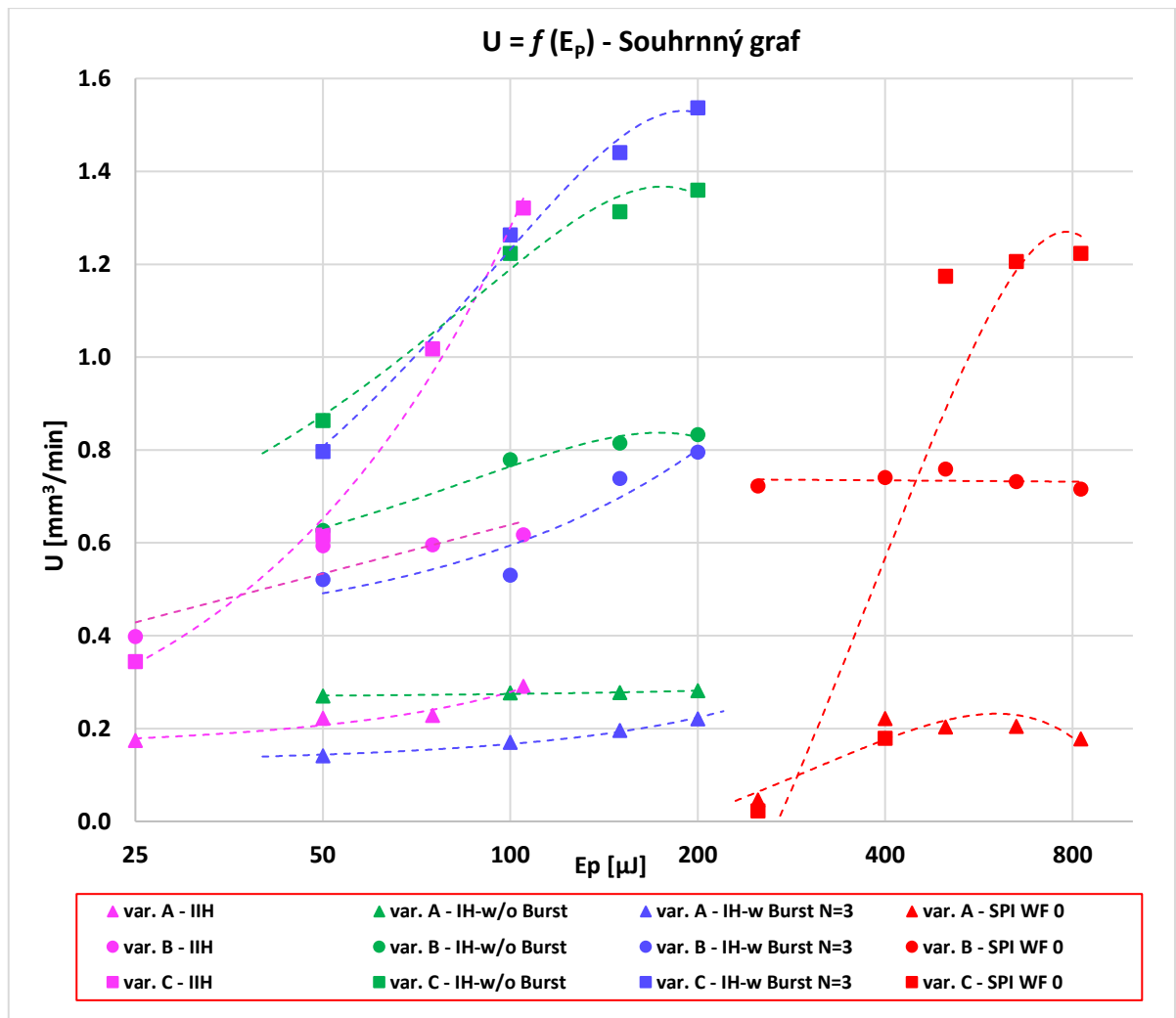
Graf 10 Souhrnný graf komparace dosažených průměrů po laserovém soustružení [práce autora]

Nejmenšího průměru, resp. nejvyššího úběru, bylo dosaženo při použití laserového soustružení variantou C, viz Graf 10, která je kombinací varianty A a B. Z Graf 10 je zřejmé, že při maximálních energiích v pulzu bylo dosaženo větších úběrů pro všechna nastavení ve srovnání s variantami A a B. Při IH s burst módem o třech pulzech a energii v pulzu 200  $\mu\text{J}$  byla naměřena nejmenší hodnota průměru 2,030 mm, což představuje zlepšení o 23 % oproti variantě A (17 % oproti variantě B). Při nastavení IH bez burst módu byla dosažena hodnota průměru 2,164 mm, což je zlepšení o 8 % oproti oběma variantám A a B. U nastavení IIH byl dosažen průměr 2,192 mm při energii v pulzu 105  $\mu\text{J}$ , což představuje zlepšení o 6 % oproti variantě A (15 % oproti variantě B). Pro nastavení s nanosekundovými pulzy WF 0 došlo k redukcí průměru na hodnotu 2,262 mm při energii v pulzu 825  $\mu\text{J}$ , což představuje zlepšení o 10 % oproti variantě A (8 % oproti variantám B). Důvodem, proč bylo použito burst módu nejefektivnější u varianty C, je teze, že se laserový paprsek po každém přejezdu přibližuje blíže k ose rotace obrobku, čímž se zvyšuje úhel dopadu paprsku a vzrůstá efektivita burst módu. Avšak, jak již bylo zmíněno, varianta C dosahuje lepších hodnot průměru pouze při maximálních energiích v pulzu. Z Graf 10 je zřejmé, že s klesající energií v pulzu hodnota průměru rychle narůstá

oproti variantám A a B, což je nejméně vidět u nastavení WF 0, kdy při 250 a 400  $\mu\text{J}$  nedošlo téměř k žádné redukci průměru, resp. úběru materiálu, a energie byla přeměněna na teplo.

Minutový úběr materiálu je závislý na dosaženém průměru a délce celého procesu laserového soustružení. Z Graf 11 je zřejmé, že nejmenších hodnot minutového úběru bylo dosaženo při tangenciálním přístupu laserového soustružení podle varianty A, přičemž rozdíly mezi vypočítanými hodnotami jsou minimální. Hlavními důvody nízkých minutových úběrů jsou délka procesu, která činila 1527 sekund a zároveň postupné zanořování laserového paprsku do materiálu vyplývající z nastavení procesu dle varianty A.

Quasi-tangenciální přístup laserového soustružení podle varianty B vykazuje lepší hodnoty minutového úběru ve srovnání s variantou A, viz Graf 11. Přestože po laserovém soustružení podle varianty B byly naměřeny podobné hodnoty průměrů jako u varianty A, tak významnou roli zde hrála délka procesu, která byla 520 sekund, což představuje redukci délky procesu o 66 %. V procentuálním vyjádření se velikost minutového úběru při nastavení IHH zlepšila v průměru o 120 %, při nastavení IH bez burst módu došlo ke zlepšení o 278 %, a při nastavení IH s burst módem o třech pulzech se minutový úběr zvýšil o 183 %. Nejvýraznější zvýšení hodnoty minutového úběru bylo zaznamenáno u nastavení WF 0, kde došlo ke zlepšení o 302 %.



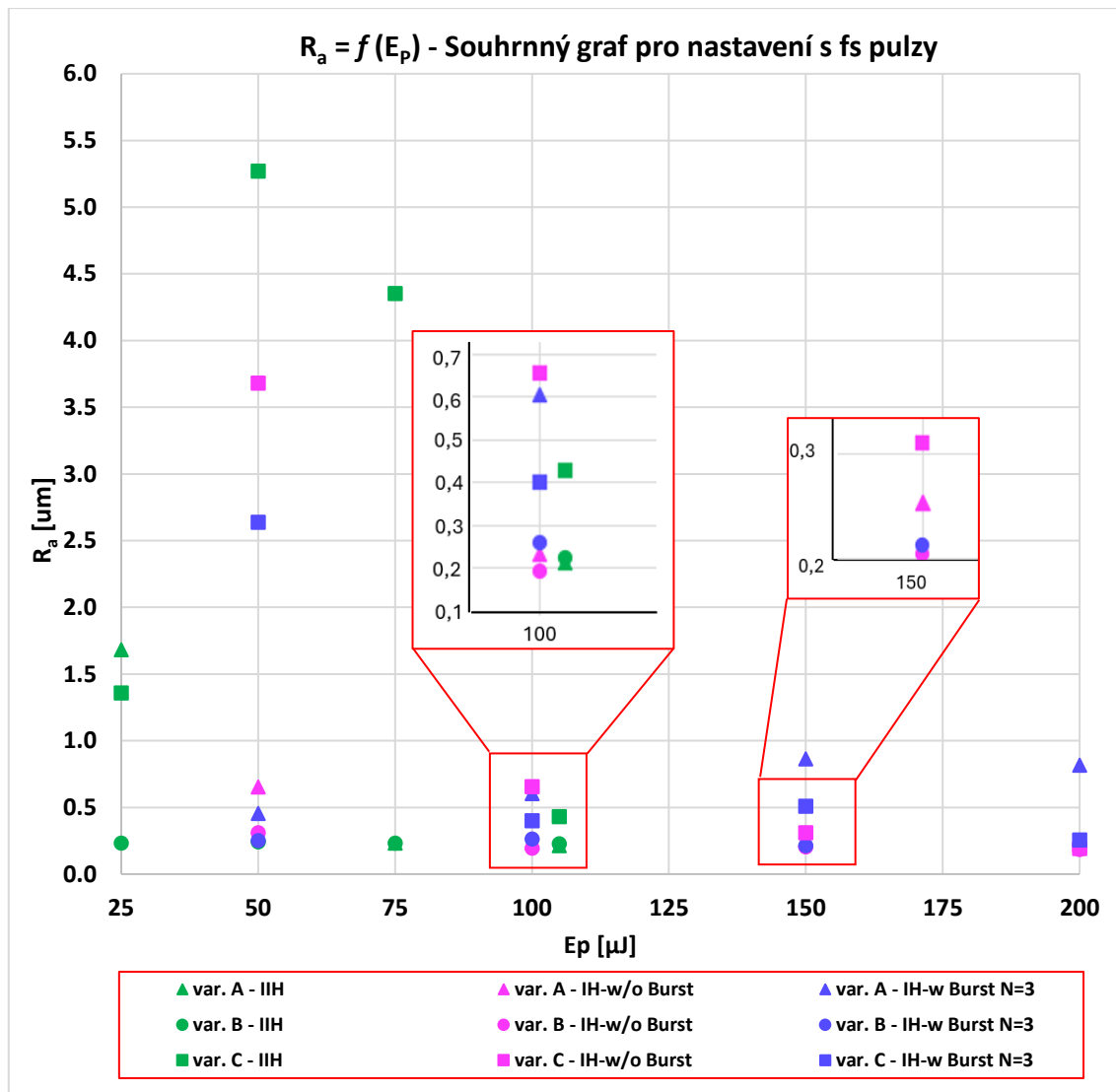
*Graf 11 Souhrnný graf komparace minutových úběrů [práce autora]*

Při použití tangenciálního laserového soustružení dle varianty C je z Graf 11 patrné, že tímto způsobem bylo dosaženo nejvyšších minutových úběrů. To je způsobeno jednak malými hodnotami dosažených průměrů, resp. velkým úběrem materiálu, a jednak délkou procesu, která byla 389 sekund, což představuje redukci času o 74 % oproti variantě A (25 % oproti variantě B). Z Graf 11 je rovněž patrné, že při variantě C docházelo k nejstrmějšímu nárůstu minutového úběru v závislosti na energii v pulzu. Při nastaveních IH bez burst módu a IH s burst módem bylo zjištěno, že při vyšších energiích pulzu nedochází k výraznému nárůstu minutového úběru, což naznačuje existenci horní limitní hodnoty energie v pulzu, při které nedochází k dalšímu výraznějšímu zvyšování úběru materiálu, resp. redukci průměru. Pro nastavení WF 0, při energiích v pulzu 250 a 400 μJ byla hodnota minutového úběru nejmenší, ale při energii v pulzu 500 μJ došlo ke skokové změně, avšak další zvyšování energie v pulzu vedlo spíše ke stagnaci minutového úběru. U nastavení IIH byl pozorován strmý nárůst minutového úběru v závislosti na energii v pulzu. Nejvyšší minutový úběr 1,537 mm<sup>3</sup>/min byl dosažen v závislosti na celkové délce procesu a naměřeném průměru po soustružení při IH s burst módem o třech pulzech, což představuje nárůst o 93 % oproti variantě B (447 % oproti variantě A). V průměru napříč jednotlivými variantami se minutový úběr zlepšil o 477 % ve srovnání s variantou A (85 % oproti variantě B), viz Graf 11.

Shrnutí dosažených drsností povrchu pro jednotlivé varianty laserového soustružení je rozděleno pro lepší přehlednost do dvou grafů. Na Graf 12 jsou znázorněny naměřené drsnosti povrchu pro nastavení s femtosekundovými pulzy o délce  $\tau_p = 260$  fs, a na Graf 13 je vidět naměřená drsnost povrchu pro nanosekundové pulzy s délkou  $\tau_p = 58$  ns.

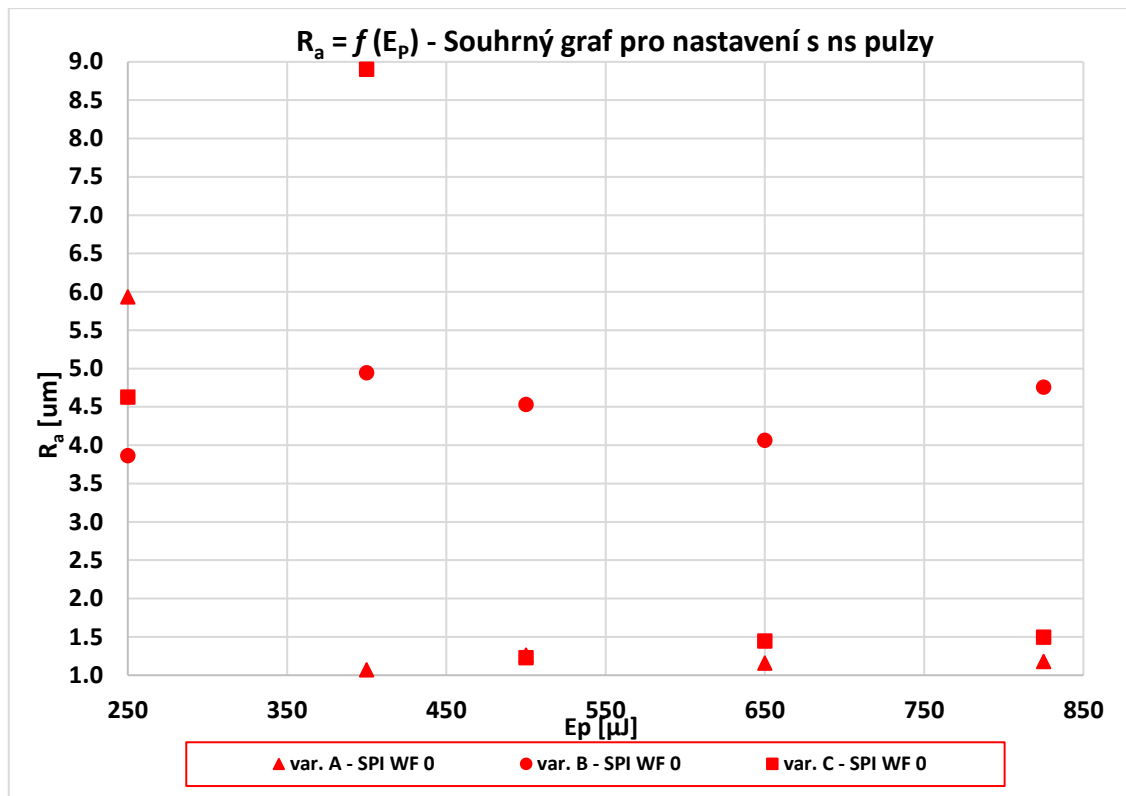
Z Graf 12 je patrné, že lepších hodnot drsnosti povrchu je obecně dosahováno při vyšších energiích v pulzu, což lze přičíst rovnoměrnější distribuci energie a zamezuje se tak tvorbě opakujících se struktur, viz Příloha 2. Tento jev je nejvíce pozorován u procesu laserového soustružení podle varianty C, kde při poklesu energie pod  $100 \mu\text{J}$  dochází ke skokovému nárůstu drsnosti povrchu u všech nastavení, jak je zřejmé z Graf 12. Při vyšších energiích v pulzu se naměřené hodnoty blíží drsnostem povrchu dosaženým ostatními variantami a nepřesahují  $0,7 \mu\text{m}$ . Z naměřených hodnot drsností povrchu v Graf 12 je vidět, že nejnižších drsností povrchu bylo dosaženo u varianty B, kde byla naměřena i nejnižší hodnota drsnosti povrchu  $0,185 \mu\text{m}$  při energii v pulzu  $200 \mu\text{J}$  s nastavením IH bez burst módu. Varianta B rovněž vykazovala nejmenší zhoršení drsností povrchu při poklesu energie v pulzu. U varianty C byla naměřena nejnižší drsnost povrchu  $0,191 \mu\text{m}$  při nastavení IH bez použití burst módu a s energií v pulzu  $200 \mu\text{J}$ . Při pohledu na výsledky varianty A je vidět, že naměřené hodnoty drsností povrchu byly téměř konstantní pro všechna nastavení, dokonce i při nízkých energiích v pulzu, až na výjimku při použití IIIH s energií v pulzu  $25 \mu\text{J}$ , kdy drsnost povrchu dosáhla hodnoty  $1,681 \mu\text{m}$ , což je důsledkem nízké energie v pulzu. Z Graf 12 je rovněž patrné, že při použití IH s burst módem o třech pulzech byly naměřené hodnoty vyšší než u ostatních variant, s hodnotami drsnosti povrchu kolem  $0,8 \mu\text{m}$ . Nejnižší drsnosti povrchu pro variantu A bylo dosaženo při nastavení IIIH s energií v pulzu  $105 \mu\text{J}$ , kdy byla naměřena hodnota  $0,214 \mu\text{m}$ . Celkově lze říci, že nejlepších hodnot drsností povrchu pro nastavení s femtosekundovými pulzy bylo dosaženo při použití vyšších energií v pulzu, které také vedly k největší redukci průměru.





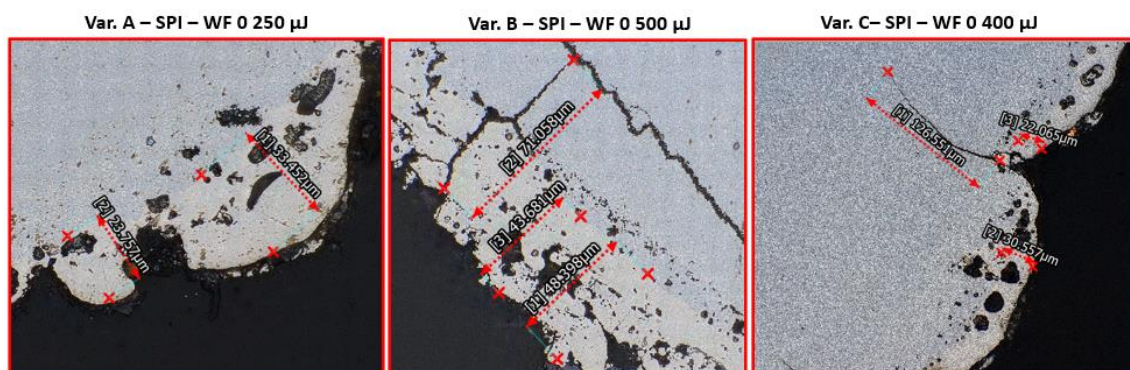
Graf 12 Souhrnný graf komparace dosažených drsností pro nastavení s fs pulzy [práce autora]

Graf 13 zobrazuje naměřené hodnoty drsností povrchu po laserovém soustružení s nanosekundovými pulzy WF 0. Hodnoty drsností povrchu naměřené po laserovém soustružení podle variant A a C vykazují podobné chování jako drsnosti dosažené femtosekundovými pulzy, kdy při nízkých energiích v pulzu 250 µJ u varianty A a při 250–400 µJ u varianty C dochází k výraznému nárůstu drsnosti. U varianty A se při vyšších energiích v pulzu naměřené hodnoty drsnosti povrchu pohybují pod 1,3 µm, přičemž nejnižší hodnota 1,068 µm byla naměřena pro energii v pulzu 400 µJ. Pro variantu C byla naměřena nejlepší hodnota drsnosti povrchu 0,228 µm naměřena při energii v pulzu 500 µJ; s dalším zvyšováním energie se hodnoty drsnosti povrchu mírně zvyšovaly, ale nepřekročily 1,5 µm. Poměrně zajímavé chování bylo pozorováno u naměřených hodnot drsnosti povrchu po laserovém soustružení dle varianty B. Nejen, že se zde neprojevil jev zhoršující se drsnosti se snižující se energií v pulzu, ale naopak nejnižší drsnost 3,861 µm byla paradoxně naměřena pro nastavení s nejnižší energií v pulzu 250 µJ. Dále se pak se zvyšující energií v pulzu hodnoty drsnosti pohybovali mezi hodnotami 3,861- 4,994 µm.



Graf 13 Souhrnný graf komparace dosažených drsností pro nastavení s ns pulzy [práce autora]

Tepelné ovlivnění bylo pozorováno pouze u nastavení s nanosekundovými pulzy o délce  $\tau_p = 58$  ns. Důvodem vzniku tepelně ovlivněné oblasti a trhlin je, že při této délce pulzů docházelo k odebrání materiálu pomocí termální ablace. To vedlo k přeměně části energie na teplo, které bylo absorbováno materiálem, což následně vytvořilo tepelně ovlivněnou oblast (HAZ). U nastavení s femtosekundovými pulzy nebyl pozorován vznik tepelně ovlivněné oblasti díky délce pulzů  $\tau_p = 260$  fs, při které dochází k odebrání materiálu procesem atermální ablace, při němž dochází pouze k minimální akumulaci tepla. Na Obr. 66 jsou zobrazeny nastavení pro jednotlivé varianty, při kterých byla naměřena největší hloubka tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 66 Shrnující obrázek jednotlivých nastavení, při kterých bylo dosaženo nejvyššího tepelného ovlivnění [práce autora]

Z Obr. 66 je zřejmé, že akumulace tepla vedla nejen ke vzniku tepelně ovlivněné oblasti, ale také způsobila vznik obvodových trhlin, které zasahovaly do materiálu mnohem hlouběji než samotná tepelně ovlivněná oblast. Největší hodnoty hloubky tepelně



ovlivněných oblastí byly pozorovány při energii v pulzu 500  $\mu\text{J}$  po laserovém soustružení dle varianty B, kde se hodnoty pohybovaly v rozmezí od nejnižší hodnoty 3  $\mu\text{m}$  do nejvyšší hodnoty 50  $\mu\text{m}$  a vzniklé trhliny po obvodě dosahovaly délky až 75  $\mu\text{m}$ . Důvodem těchto vysokých hodnot je skutečnost, že ačkoliv byly při této variantě realizovány pouze dva přejezdy, laserový paprsek se při obou přejezdech pohyboval po stejné dráze, což způsobilo vysokou akumulaci tepla v materiálu. U varianty C byly v průměru naměřeny druhé nejvyšší hodnoty tepelného ovlivnění, pohybující se v rozmezí od 4  $\mu\text{m}$  do 35  $\mu\text{m}$ , přičemž nejvyšší hodnota byla naměřena při energii v pulzu 400  $\mu\text{J}$ . Zároveň při této energii v pulzu byla naměřena trhlina o délce až 126  $\mu\text{m}$ . Po laserovém soustružení dle varianty A byly v průměru naměřeny nejnižší hodnoty tepelně ovlivněné oblasti ze všech variant. Velikost tepelně ovlivněných oblastí se pohybovala od 3  $\mu\text{m}$  do 35  $\mu\text{m}$  a délka trhlin byla naměřena až 65  $\mu\text{m}$  v závislosti na energii v pulzu viz Příloha 3. Nejvyšší hodnota tepelně ovlivněné oblasti byla naměřena při energii v pulzu 250  $\mu\text{J}$ . Vysoké hodnoty tepelně ovlivněné oblasti při nižších energiích v pulzu lze vysvětlit tím, že při takto nízkých energiích nedochází k významnému úběru materiálu, a tudíž je většina energie přeměněna na teplo, které se akumuluje v materiálu a tento jev iniciuje vznik tepelně ovlivněné oblasti spolu s trhlinami.

Z předchozích grafů je vidět, že i při použití nastavení s nanosekundovými pulzy, lze poměrně dobře odebírat materiál pomocí laserového soustružení. Nevýhodou však zůstává vznik tepelně ovlivněné oblasti a horší drsnost povrchu oproti použití nastavení s femtosekundovými pulzy. Výhoda je však v ceně laserového zdroje a jeho hodinové sazbě, která je nižší, než u femtosekundového zdroje. Naskytuje se tedy možnost prvotního obrobění nanosekundovými pulzy s přídavkem na možný vznik tepelně ovlivněné oblasti a obvodových trhlin, viz Tab. 14, a následně dokončení pomocí femtosekundových pulzů.

Tab. 14 Doporučené hodnoty přídavků na základě experimentu pro jednotlivé energie v pulzu pro nastavení s nanosekundovými pulzy SPI WF0 [práce autora]

SPI WF 0			
Energie v pulzu [ $\mu\text{J}$ ]	Var. A [ $\mu\text{m}$ ]	Var. B [ $\mu\text{m}$ ]	Var. C [ $\mu\text{m}$ ]
250	50	50	80
400	60	80	170
500	60	100	70
650	50	130	70
825	70	80	70

## 5 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá přístupů tangenciálního mikroobrábění. konkrétně tangenciálními přístupů laserového soustružení slinutého karbidu. V teoretické části byla popsána problematika laserové technologie, interakce laserového paprsku s materiálem, proces laserové ablace a její druhy. Dále jsou zde popsány jednotlivé pulzní lasery používané v mikroobrábění spolu se způsoby laserového mikroobrábění. Poslední částí je potom samotné laserové soustružení, u kterého jsou uvedeny možné přístupy k laserovému soustružení a zároveň jsou zde uvedeny i jednotlivé parametry, které proces laserového soustružení ovlivňují. Všechny informace byly poté použity k samotnému návrhu experimentu.

Vlastní experiment byl rozdělen do několika fází. První fází bylo vytvoření programů pro jednotlivé přístupy laserového soustružení, z nichž dvě (varianta A a B) byly inspirovány předchozími studii a třetí varianta byla navržena jako kombinace variant A a B. Dále se první fáze skládala ze samotného laserového soustružení, kdy bylo obrobena celkem 51 vzorků různými nastaveními (III, IH bez burst módu, IH s burst módem o třech pulzech a SPI-WF) na pětiosém laserovém zařízení MASTER 1. Během druhé fáze proběhlo měření dosaženého průměru a drsnosti povrchu jednotlivých vzorků na optickém mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5. Zároveň během této fáze byly pomocí laserového konfokálního mikroskopu Keyence VK-X 3000 změřeny velikosti tepelně ovlivněných oblastí a délky vzniklých trhlin. Na základě nashromážděných dat z jednotlivých měření průměrů byly následně vypočítány hodnoty minutových úběrů. Následně byly jednotlivé naměřené hodnoty průměrů spolu s drsnostmi povrchů a vypočítanými minutovými úběry pro jednotlivá nastavení procesu laserového soustružení převedeny do grafů a byla provedena diskuze dosažených výsledků.

Z naměřených výsledků je závěr takový, že každá z použitých variant laserového soustružení má své výhody a nevýhody. Nevýhodou procesu laserového soustružení dle varianty A je jeho délka, díky níž je minutový úběr velice nízký oproti ostatním variantám, avšak při tomto přístupu vzniká nejmenší tepelně ovlivněná oblast (pozorovaná pouze u nastavení s nanosekundovými pulzy) a drsnost povrchu je pro femtosekundová nastavení téměř konstantní. Varianta B má sice vyšší minutový úběr oproti variantě A a drsnost povrchu byla pro nastavení s femtosekundovými pulzy nejnižší ze všech variant, avšak při této variantě byla naměřena nejvyšší tepelná ovlivnění. Při variantě C byly vyšetřeny nejvyšší minutové úběr a z toho důvodu je nejvhodnější pro potřeby hrubovacích operací při laserovém soustružení, avšak drsnost povrchu zde byla u nízkých hodnot energií v pulzu velice vysoká v porovnání s ostatními variantami. Naměřené velikosti tepelných oblastí byly vyšší, než u varianty A, ale nižší než u varianty B. Jelikož proces laserového soustružení je celkem nová metoda tak je zde prostor pro další experimenty. Existuje hned několik cest, kterými by se experimenty mohly vydat, ať už je to testování různých materiálů, nebo optimalizaci procesních parametrů ke zvýšení efektivity celého procesu, nebo až po automatizaci celého procesu a zaručení opakovatelnosti pomocí různých měřících zařízení.

## 6 Reference

- [1] ASSEMCORP. *Microelectronics* [online]. ASSEMCORP. [cit. 2024-06-10]. Dostupné z: <https://www.assemcorp.com/en/products/microelectronics.html>
- [2] AHMMED, K., Colin GRAMBOW a Anne-Marie KIETZIG. Fabrication of Micro/Nano Structures on Metals by Femtosecond Laser Micromachining. *Micromachines* [online]. 2014, **5**(4), 1219-1253 [cit. 2024-06-10]. ISSN 2072-666X. Dostupné z: doi:10.3390/mi5041219
- [3] ORAZI, L., L. ROMOLI, M. SCHMIDT a L. LI. Ultrafast laser manufacturing: from physics to industrial applications. *CIRP Annals* [online]. 2021, **70**(2), 543-566 [cit. 2024-06-10]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2021.05.007
- [4] HÁLA, Matěj. *EFEKTIVNÍ MIKROBRÁBĚNÍ LASEREM S VYUŽITÍM BURST-MÓDU* [online]. Praha, 2022 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/103474/F2-BP-2022-Hala-Matej-Efektivni%20mikrobrabeni%20laserem%20s%20vyuzitim%20burst-modu.pdf?sequence=-1&isAllowed=y..> Bakalářská. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
- [5] KOŘÁN, Ing. Pavel. *Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení* [online]. 2013 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [6] PRIMUS, Bc. Tomáš. *Tvorba bionicky motivovaných povrchů laserem* [online]. 2019 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84774/F2-DP-2019-Primus-Tomas-Primus\\_diplomova\\_prace\\_final.pdf?sequence=-1&isAllowed=y..](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84774/F2-DP-2019-Primus-Tomas-Primus_diplomova_prace_final.pdf?sequence=-1&isAllowed=y..) Diplomová. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
- [7] PAVEL, Bc. Láznička. *Laserové mikroobrábění* [online]. Brno, 2014 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=85839](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85839). Diplomová. VUT. Vedoucí práce Doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.
- [8] RÜDIGER, Paschotta. *Four-level and Three-level Gain Media* [online]. In: . RP Photonics Encyclopedia [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/four\\_level\\_and\\_three\\_level\\_laser\\_gain\\_media.html](https://www.rp-photonics.com/four_level_and_three_level_laser_gain_media.html)
- [9] BUCHFINK, G. *The Laser as a Tool*. Wutzburg: Vogel Communications Group GmbH & Co., 2007. ISBN 978-3-8343-3072-7.
- [10] REICHEL, J. a M. VŠETEČKA. *Emise a absorpce světla* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/776-emise-a-absorpce-svetla>

- [11] *Úvod do laserové techniky*. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01108-9.
- [12] Průmyslové lasery (1) – princip laseru. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, 13.3.2012 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru>
- [13] LAPLAŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/2785566-Laserove-technologie-v-praxi.html>
- [14] SOCHOR, Václav. [online]. Praha: Academia, 1990 [cit. 2024-04-20]. ISBN 80-200-0354-1. Dostupné z: <https://doczz.cz/doc/58950/lasery-a-koherentn%C3%AD-svazky>
- [15] PASCHOTTA, Dr. *Polrazitation of Light* [online]. s. 1 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/polarization\\_of\\_light.html](https://www.rp-photonics.com/polarization_of_light.html)
- [16] PASCHOTTA, I. Dr. Rüdiger. *Hermite–Gaussian Modes* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/hermite\\_gaussian\\_modes.html](https://www.rp-photonics.com/hermite_gaussian_modes.html)
- [17] HLAVINKA, Bc. Josef. *Využití pokročilých funkcí laserového zařízení pro odstraňování povlaku* [online]. 2021, 2021 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/96770/F2-DP-2021-Hlavinka-Josef-DP\\_hlavinka\\_1794.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/96770/F2-DP-2021-Hlavinka-Josef-DP_hlavinka_1794.pdf?sequence=-1&isAllowed=y). Diplomová. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Zeman, PhD.
- [18] *Beam quality and strehl ratio* [online]. Edmund Optics [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/beamquality-and-strehl-ratio/>
- [19] *Why use a flat top laser beam: Edmund Optics* [online]. In: . [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledgecenter/application-notes/optics/why-use-a-flat-top-laser-beam/>
- [20] LEDNEV, V. Aser beam profile influence on LIBS analytical capabilities: single vs. multimode beam. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* [online]. **2010** [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1039/C0JA00017E>
- [21] SANNER, N., O. UTÉZA, B. BUSSIERE, G. COUSTILLIER, A. LERAY, T. ITINA a M. SENTIS. Measurement of femtosecond laser-induced damage and ablation thresholds in dielectrics. *Applied Physics A* [online]. 2009, **94**(4), 889-897 [cit. 2024-04-20]. ISSN 0947-8396. Dostupné z: doi:[10.1007/s00339-009-5077-6](https://doi.org/10.1007/s00339-009-5077-6)
- [22] ION, John C. *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application* [online]. Oxford: Butterworth-Heinemann, c2005 [cit. 2024-04-20]. ISBN 07-506-6079-1.
- [23] *Understanding laser beam parameters leads to better systém performance and can save money* [online]. 2012 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z:

[https://content.coherent.com/legacy-assets/pdf/Understanding-BeamParameters\\_FORMFIRST.pdf](https://content.coherent.com/legacy-assets/pdf/Understanding-BeamParameters_FORMFIRST.pdf)

- [24] SCHAEFFER, Ronald D. *Fundamentals of laser micromachining* [online]. Boca Raton: CRC Press, c2012 [cit. 2024-04-20]. ISBN 978-1439860557.
- [25] JOIGNANT, Alena N., Ying XI a David C. MUDDIMAN. Impact of wavelength and spot size on laser depth of focus: Considerations for mass spectrometry imaging of non-flat samples By Alena N. Joignant, Ying Xi and David C. Muddiman. *Journal of Mass Spectrometry* [online]. 2023, **58**(5) [cit. 2024-04-20]. ISSN 1076-5174. Dostupné z: doi:10.1002/jms.4845
- [26] MARTÍNEZ-CONDE, Alejandro, Thomas KRENKE, Stephan FRYBORT a Ulrich MÜLLER. Review: Comparative analysis of CO2 laser and conventional sawing for cutting of lumber and wood-based materials. *Wood Science and Technology* [online]. 2017, **51**(4), 943-966 [cit. 2024-04-20]. ISSN 0043-7719. Dostupné z: doi:10.1007/s00226-017-0914-9
- [27] CRIP, Annals. [online]. (51) [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61699-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61699-0)
- [28] MEIJER, J., K. DU, A. GILLER, D. HOFFMAN, V.S. KOVALENKO, T. MASUZAWA a A. OSTENDORF. Laser Machining by short and ultrashort pulses state of the art and new opportunities in the age of the photons. *CRIP Annals* [online]. 2, 2007, (51) [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607616990?via%3Dihub>
- [29] ČERMÁK, Ing. Adam. *LASER v procesech mikroobrábění monolitních řezných nástrojů* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/28413>. Dizertační. ZČU.
- [30] IPG TECHNOLOGY. *IPG PHOTONICS CORPORATION* [online]. 2017 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/whyIpg>
- [31] SCHAEFFER, R. a T. PFLANZ. *UV Micromachining: Shorter Pulses or Shorter Wavelength?* [online]. In: . Medical Device & Diagnostic Industry [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.mddionline.com/contract-manufacturing/uv-micromachining-shorter-pulses-or-shorter-wavelength->
- [32] PRIMUS, Ing. Tomáš. *Efektivní obrábění nástrojových materiálů laserem* [online]. Praha, 2023 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: : <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/111938>. Disertační. ČVUT. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. František Holešovský a doc. Ing. Pavel Zeman.
- [33] ZHANG, D. a L. GUAN. *Comprehensive Materials Processing* [online]. 4. 2014 [cit. 2024-04-23]. ISBN 9780080965338. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61699-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61699-0)

- [34] LEITZ, Karl-Heinz, Benjamin REDLINGSHÖFER, Yvonne REG, Andreas OTTO a Michael SCHMIDT. Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses. *Physics Procedia* [online]. 2011, **12**, 230-238 [cit. 2024-04-23]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2011.03.128
- [35] DAHOTRE, Narendra B. a Sandip P. HARIMKAR. *Laser fabrication and machining of materials* [online]. New York: Springer, 2008 [cit. 2024-04-23]. ISBN 978-0-387-72344-0.
- [36] RUDIGER, Paschotta. *Laser Ablation* [online]. 2020 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z [https://www.rp-photonics.com/laser\\_ablation.html](https://www.rp-photonics.com/laser_ablation.html)
- [37] SUGIOKA, Koji a Ya CHENG. *Ultrafast Laser Processing: From Micro- to Nanoscale* [online]. Taylor & Francis Group, 2013 [cit. 2024-04-23]. ISBN 9780429070846. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2012.06.037
- [38] CHENG, Jian, Chang-sheng LIU, Shuo SHANG, Dun LIU, Walter PERRIE, Geoff DEARDEN a Ken WATKINS. *A review of ultrafast laser materials micromachining* [online]. 2013, **46**, 88-102 [cit. 2024-04-25]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2012.06.037
- [39] LUCAS, Lonnie a Jim ZHANG. *Femtosecond laser micromachining: A back-to-basics primer* [online]. Laser Solutions for Manufacturing, 2012 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: : <https://www.industrial-lasers.com/micromachining/article/16485321/femtosecond-lasermicromachining-a-backtobasics-primer>
- [40] KELKAR, Girish. *Laser Basics: Interactions with Materials* [online]. 2007 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.mddionline.com/news/laser-basics-interactions-materials>
- [41] PASCHOTTA, Rudiger. Pulse energy. *RP Photonics AG* [online]. 2007 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/pulse\\_energy.html](https://www.rp-photonics.com/pulse_energy.html)
- [42] THORLABS, Rudiger. Pulsed laser or CW laser does it make a difference Pulsed laser or CW lasere. *RP Photonics AG* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/optical\\_intensity.html](https://www.rp-photonics.com/optical_intensity.html)
- [43] PASCHOTTA, Rudiger. *Optical intensity* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/optical\\_intensity.html](https://www.rp-photonics.com/optical_intensity.html)
- [44] AHMMED, K., Colin GRAMBOW a Anne-Marie KIETZIG. Fabrication of Micro/Nano Structures on Metals by Femtosecond Laser Micromachining. *Micromachines* [online]. 2014, **5**(4), 1219-1253 [cit. 2024-04-25]. ISSN 2072-666X. Dostupné z: doi:10.3390/mi5041219
- [45] ZHENG, Buxiang, Gedong JIANG, Wenjun WANG, Xuesong MEI a Fangcheng WANG. *Surface ablation and threshold determination of AlCu4SiMg aluminum*

- alloy in picosecond pulsed laser micromachining* [online]. 2017, **94**, 267-278 [cit. 2024-04-23]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2017.02.003
- [46] MANNION, Paul, Thomas J. GLYNN, Jonathan MAGEE, Edward COYNE a Gerard M. O'CONNOR. *Ablation thresholds in ultrafast laser micromachining of common metals in air* [online]. 2003, 2003-3-17, 470- [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: doi:10.1117/12.463744
- [47] RACIUKAITIS, Gediminas, Claude R. PHIPPS, Marijus BRIKAS, Paulius GECYS a Mindaugas GEDVILAS. *Accumulation effects in laser ablation of metals with high-repetition-rate lasers* [online]. 2008, 2008-5-8, 70052L- [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: doi:10.1117/12.782937
- [48] ORAZI, L., L. ROMOLI, M. SCHMIDT a L. LI. Ultrafast laser manufacturing: from physics to industrial applications. *CIRP Annals* [online]. 2021, **70**(2), 543-566 [cit. 2024-04-23]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2021.05.007
- [49] LAUER, Benjamin, Beat JÄGGI a Beat NEUENSCHWANDER. Influence of the Pulse Duration onto the Material Removal Rate and Machining Quality for Different Types of Steel. *Physics Procedia* [online]. 2014, **56**, 963-972 [cit. 2024-04-23]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2014.08.116
- [50] JAEGGI, B., B. NEUENSCHWANDER, M. SCHMID, M. MURALT, J. ZUERCHER a U. HUNZIKER. Influence of the Pulse Duration in the ps-Regime on the Ablation Efficiency of Metals. *Physics Procedia* [online]. 2011, **12**, 164-171 [cit. 2024-04-23]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2011.03.116
- [51] RUDIFER, Paschotta. 1. What's the difference between constant wave (CW) and pulsed lasers? *405nm.com* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://405nm.com/difference-between-cw-and-pulsed-lasers/>
- [52] PASCHOTTA, Rudiger. *Pulsed Laseres* [online]. 2020 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/pulsed\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/pulsed_lasers.html)
- [53] PASCHOTA, Rudiger. *Q-switching* [online]. 2020 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/q\\_switching.html](https://www.rp-photonics.com/q_switching.html)
- [54] KELLER, U. a L. GALLMANN. *Ultrafast Laser Physics, Chapter 6: Q-switching* [online]. Zurich, Physics Department [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: [https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/phys/quantumelectronics/ultrafast-laser-physics-dam/education/lectures/ultrafast\\_laser\\_physics/lecture\\_notes/6\\_Q-switching.pdf](https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/phys/quantumelectronics/ultrafast-laser-physics-dam/education/lectures/ultrafast_laser_physics/lecture_notes/6_Q-switching.pdf)
- [55] RUDIGER, Paschotta. *Ultrashort Pulses* [online]. 2020 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/ultrashort\\_pulses.html](https://www.rp-photonics.com/ultrashort_pulses.html)
- [56] RUDIGER, Paschotta. *Mode locking* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/mode\\_locking.html](https://www.rp-photonics.com/mode_locking.html)

- [57] KRUEGER, Arnd a Philippe FÉRU. *Getting practical* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://spie.org/news/getting-practical>
- [58] DITMIRE, T. *High-power Lasers* [online]. . American Scientist, 2010 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: doi:10.1511/2010.86.394
- [59] GIANNUZZI, Giuseppe. *Laser micromachining with bursts of ultrashort pulses* [online]. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BARI ALDO MORO [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://dottorato.fisica.uniba.it/wp-content/uploads/2018/11/GIANUZZIi.pdf>. Vedoucí práce Dott. Antonio Ancona, Prof. Vincenzo.
- [60] RUDDIGER, Paschotta. *Burst mode lasers* [online]. 2020 [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/burst\\_mode\\_lasers.html](https://www.rp-photonics.com/burst_mode_lasers.html)
- [61] 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. *Materials* [online]. 2021, **14**(12) [cit. 2024-04-23]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14123331
- [62] ŽEMAITIS, Andrius, Paulius GEČYS, Martynas BARKAUSKAS, Gediminas RAČIUKAITIS a Mindaugas GEDVILAS. Highly-efficient laser ablation of copper by bursts of ultrashort tuneable (fs-ps) pulses. *Scientific Reports* [online]. 2019, **9**(1) [cit. 2024-04-23]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-019-48779-w
- [63] BUTKUS, Simas, Vytautas JUKNA, Domas MARTYNAS, BARKAUSKAS a Valdas SIRUTKAITIS. *Micromachining of Invar Foils with GHz, MHz and kHz Femtosecond Burst Modes* [online]. Laser Technik Journal, Lithuania [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: doi:10.1007/s00339-019-2755-x
- [64] METZNER, D., P. LICKSCHAT a S. WEISSMANTEL. 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, **125**(7) [cit. 2024-04-23]. ISSN 0947-8396. Dostupné z: doi:10.1007/s00339-019-2755-x
- [65] KRAMER, Torsten. Increasing the Specific Removal Rate for Ultra Short Pulsed Laser-Micromachining by Using Pulse Bursts. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* [online]. 2017, **12**(2), 107-114 [cit. 2024-04-23]. ISSN 18800688. Dostupné z: doi:10.2961/jlmn.2017.02.0011
- [66] LASCAM. *Mikroobrábění* [online]. [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/mikroobrabeni/>
- [67] ZETTL, Julian, Stefan RUNG, Cemal ESEN a Ralf HELLMANN. *Tangential Laser Turning of Fused Silica Using Ultra-short Laser Pulses* [online]. LMN-



- Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2021 [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: doi:10.2961/jlmn.2021.01.2008.
- [68] ZETTL, Julian, Cemal ESEN a Ralf HELLMANN. LMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering. *Micromachines 2023* [online]. 2023 [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/mi14101838>
- [69] ZETTL, Julian, Maximilian KLAR, Stefan RUNG, Cemal ESEN a Ralf HELLMANN. Laser turning with ultrashort laser pulses. *Elsevier Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2021, (68) [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.025>
- [70] WARHANEK, M., P. BUTLER-SMITH, C. DOLD a J. BUCOURT. *Pulsed Laser Ablation Opens Up New Borders for the Manufacturing of Solid PCD Tools* [online]. Aerospace Innovation Forum [cit. 2024-04-27].
- [71] WARHANEK, M., C. WALTER, M. HIRSCHI a J. BOOS. *Comparative analysis of tangentially laser-processed fluted polycrystalline diamond drilling tools* [online]. Journal of Manufacturing Processes, **2016**(23), 157-164 [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.06.023>
- [72] NEUENSCHWANDER, B., B. JAEGGI, M. SCHMID a G. HENNIG. Surface Structuring with Ultra-short Laser Pulses: Basics, Limitations and Needs for High Throughput. *Physics Procedia* [online]. 2014, **56**, 1047-1058 [cit. 2024-04-23]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2014.08.017
- [73] REG, Yvonne, Christian KÄGELER a Michael SCHMIDT. Experimental studies on effects at micro-structuring of highly reflecting metals using nano- and picosecond-lasers. *Physics Procedia* [online]. 2010, **5**, 245-253 [cit. 2024-04-23]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2010.08.143
- [74] *RAYLASE Ultra High Speed Scanner* [online]. [cit. 2024-05-27]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=3CFs\\_0zR\\_gA](https://www.youtube.com/watch?v=3CFs_0zR_gA)
- [75] ERLIC, Mile. *Use Laser Wobble to Improve Welding, Cutting, Engraving & Marking* [online]. [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://pmdi.com/posts/use-laser-wobble-to-improve-welding-cutting-engraving-marking/>
- [76] SYROVATKA, Simon, Adam CERMAK, Pavel KOZMIN, Ondrej MARSALEK a Tomas ZATLOUKAL. Tangential Laser Machining Using Fs-pulsed Laser. *Proceedings of the 32nd International DAAAM Symposium 2021* [online]. DAAAM International Vienna, 2021, 0685-0691 [cit. 2024-06-06]. DAAAM Proceedings. ISBN 9783902734334. Dostupné z: doi:10.2507/32nd.daaam.proceedings.096
- [77] ZETTL, Julian, Christian BISCHOF, Stefan RUNG, Cemal ESEN, Andrés FABIÁN a Ralf HELLMANN. Laser turning using ultra-short laser pulses and intensity distribution techniques. *Lasers in Manufacturing Conference 2021*

- [online]. [cit. 2024-06-08]. Dostupné z: [https://wlt.de/sites/default/files/2021-10/ablation\\_drilling\\_cutting/Contribution\\_183.pdf](https://wlt.de/sites/default/files/2021-10/ablation_drilling_cutting/Contribution_183.pdf)
- [78] *MASTER1 PSGFRT Femtosecond Laser micromachining system for precise manufacturing: Návod k použití*. Litva, 2020.
- [79] *1. IntelliSCAN 14. SCANLAB* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.scanlab.de/en/products/scan-systems/intelliscan/standard-series/intelliscan-14>
- [80] *1. Light conversion: Carbide - Unibody-Design Femtosecond Lasers for Industry and Science* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://lightcon.com/product/carbide-femtosecond-lasers/>
- [81] *InfiniteFocus G5* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: [https://www.uphf.fr/sites/default/files/media/2022-11/alicona\\_if\\_g5.pdf](https://www.uphf.fr/sites/default/files/media/2022-11/alicona_if_g5.pdf)
- [82] *3D Laser Scanning Microscope VK-X3000 Series User's Manual* [online]. KEYENCE International Belgium [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: [https://www.keyence.eu/products/microscope/laser-microscope/vk-x3000/index\\_pr.jsp](https://www.keyence.eu/products/microscope/laser-microscope/vk-x3000/index_pr.jsp)
- [83] [online]. [cit. 2024-06-21]. Dostupné z: <https://penta-edm.cz/stroj/fanuc-robocut-%ce%b1-c600ic/>
- [84] *LaboSystem* [online]. [cit. 2024-07-09]. Dostupné z: <https://www.struers.com/en/Products/Grinding-and-Polishing/Grinding-and-polishing-equipment/LaboSystem#labosystembenefits>

## 7 Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 Schéma přechodu atomu mezi třemi energetickými hladinami (upraveno) [5] ..	12
Obr. 2 Proces generace laserového záření v optickém rezonátoru (upraveno) [5] .....	13
Obr. 3 Porovnání vlnových délek jednotlivých druhů záření [7] .....	14
Obr. 4 Nekoherentní záření (a) a koherentní laserové záření (b) [10] .....	14
Obr. 5 Schéma změny poloměru laserového paprsku na úhlu divergence (upraveno) [13] .....	14
Obr. 6 Příklady lineární polarizace a kruhové polarizace (upraveno) [9] .....	15
Obr. 7 Gaussovo rozložení ( $TEM_{00}$ ) (vlevo) a Multimode rozložení (vpravo) [20] .....	16
Obr. 8 Rozdíl mezi reálným svazkem (modrá) a ideálním laserovým svazkem dle Gausse (zelená)(upraveno) [23] .....	16
Obr. 9 Změna hloubky ostrosti v závislosti na fokusační optice (upraveno) [26] .....	18
Obr. 10 Závislost intenzity výkonu na délce pulzu pro jednotlivé laserové technologie (upraveno) [30] .....	18
Obr. 11 Graf absorptivity jednotlivých nástrojových materiálů (upraveno) [29] .....	20
Obr. 12 Rozložení energie v pulzu u krátkých (vlevo) a ultrakrátkých (vpravo) pulzů (upraveno) [29][34] .....	21
Obr. 13 Rozdíl mezi laserovým mikroobráběním a) ultrakrátkými pulzy ( $\tau P=200fs$ ) b) krátkými pulzy ( $\tau P=3,3ns$ ) [37] .....	22
Obr. 14 Graf znázorňující přesnost mikroobrábění v závislosti na délce pulzu [29] .....	22
Obr. 15 Závislost špičkového výkonu na čase [práce autora] .....	24
Obr. 16 Princip generace krátkých pulzů pomocí metody Q-switching (upraveno) [54] .....	27
Obr. 17 Princip generace ultrakrátkých pulzů pomocí metody mode-locking (upraveno) [57] .....	28
Obr. 18 Příklad časového průběhu burstů obsahující tři pulzy [práce autora] .....	28
Obr. 19 Schéma generace burstu o třech pulzech ( $N=3$ ) metodou pulse picking [práce autora] .....	29
Obr. 20 Ukázka radiálního mikroobrábění a) požadovaná geometrie; b) použit nízký počet vrstev; c) použit vysoký počet vrstev (upraveno)[29] .....	31
Obr. 21 Princip rozmítání laserového paprsku pomocí galvo-skeneru [práce autora] ...	31
Obr. 22 Princip rozmítání laserového paprsku pomocí polygonálního galvo-skeneru [práce autora] .....	32
Obr. 23 Ukázka rozmítání laserového paprsku a) bez korekce v ose X, b) s korekcí v ose X (upraveno) [74] .....	32
Obr. 24 Schéma a) konturového šrafování, b) liniové šrafování [práce autora] .....	33
Obr. 25 Parametry strategie šrafování $S_p$ (překrytí pulzů) a H (překrytí šrafování) [práce autora] .....	33
Obr. 26 Ukázka tangenciálního obrábění obecné plochy (upraveno)[29] .....	34
Obr. 27 Porovnání obrábění obecné plochy a) tangenciálním mikroobráběním; b) radiálním mikroobráběním (upraveno) [29] .....	35
Obr. 28 Druhy rozmítání laserového paprsku pomocí funkce wobble a) lineárně ve směru $X_{galvo}$ , b) lineárně s definovaným natočením $\phi_{wob}$ , c) kruhově, d) elipticky (upraveno)[29] .....	35
Obr. 29 Jednotlivé přístupy laserového mikroobrábění a) radiální, b) tangenciální, c) quasi-tangenciální [práce autora] .....	36

Obr. 30 Schématické zobrazení quasi-tangenciálního obrábění [práce autora].....	37
Obr. 31 Schéma procesu tangenciálního laserového soustružení dle konvenčního soustružení [práce autora] .....	37
Obr. 32 Schéma procesu quasi-tangenciálního soustružení [práce autora] .....	38
Obr. 33 Zobrazení ztrát intenzity Gaussovského paprsku a Top-hat paprsku (upraveno) [77].....	39
Obr. 34 Jednotlivá rozložení fokusovaných laserových paprsku a) Gaussův, b) Top hat, c) liniový Top hat (upraveno) [77] .....	40
Obr. 35 Z Vliv rozložení energie v pulzu na efektivitu ablace a) rozložení dle Gausse, b) liniové rozložení top hat (upraveno) [77] .....	40
Obr. 36 a) ukázka umělého zvětšení průměru laserového paprsku pomocí funkce wobble, b) ukázka distribuce intenzity výkonu s použitím posuvu (0,1 mm/s) a wobble funkce (kruh s průměrem 100 $\mu$ m) (upraveno) [67].....	41
Obr. 37 a) ukázka různých velikostí průměrů laserového paprsku s nulovým offsetem b) pracovní cyklus laserového paprsku v závislosti na průměru laserového paprsku a offsetu (upraveno) [69] .....	42
Obr. 38 Závislost hloubky ablace a drsnosti v závislosti na úhlu dopadu (upraveno) [69] .....	42
Obr. 39 Schéma laserového paprsku dopadajícího na válcový povrch obroku a jeho rozložení intenzity (upraveno) [68] .....	43
Obr. 40 Vliv fokusace na velikost ozářené plochy a efektivitě ablace: fokusace laserového paprsku do roviny osy rotace (nahore), rovina fokusace posunuta o 0,37mm směrem vzhůru od roviny osy rotace (dole) (upraveno) [68] .....	44
Obr. 41 Ukázka procesní limitace a) překročení $y_{crit}$ – tvorba závitové geometrie, b) dodržení $y_{crit}$ – správné obrobení válcové plochy [práce autora].....	45
Obr. 42 a) ukázka možných geometrií dosažitelných pomocí laserového soustružení, b) obrázek ze SEM , c) dosažitelný průměr laserovým soustružením [67] .....	45
Obr. 43 Schéma průběhu experimentu [práce autora] .....	48
Obr. 44 Laserové zařízení MASTER 1 PSGFRT (upraveno) [78].....	49
Obr. 45 Pracovní prostor laserového zařízení MASTER 1 PSGFRT [17] .....	50
Obr. 46 Optický mikroskop Alicona InfiniteFocus G5 [81].....	52
Obr. 47 Laserový konfokální mikroskop Keyence VK-X 3000 [82] .....	52
Obr. 48 a) Zařízení LaboPol-60, b) LaboForce-100 [84] .....	54
Obr. 49 Schéma rozdělení jednotlivých segmentů na válcovém polotovaru [práce autora] .....	55
Obr. 50 Schéma nastavení tangenciálního laserového soustružení dle varianty A [práce autora] .....	56
Obr. 51 Schéma nastavení quasi-tangenciálního obrábění dle varianty B [práce autora] .....	57
Obr. 52 Schéma nastavení procesu laserového soustružení dle varianty C [práce autora] .....	58
Obr. 53 Schéma způsobu měření hloubky odebraného materiálu [práce autora] .....	59
Obr. 54 a) segment po rozdělení pomocí 3D editoru, b) narovnaný segment pomocí funkce from removal, c) ukázka měření drsnosti [práce autora] .....	59
Obr. 55 Naskenované vzorky a) vzorek obrobený ns pulzy b) vzorek obrobený fs pulzy [práce autora] .....	60

Obr. 56 Příklad změřeného tepelného ovlivnění a délky trhliny po obrobení ns pulzy [práce autora] .....	60
Obr. 57 Ukázka vývoje kvality povrchů po tangenciálním laserovém soustružení dle varianty A [práce autora] .....	64
Obr. 58 Ukázka tepelného ovlivnění pro nastavení WF 0 s energií v pulzu 250μJ [práce autora] .....	64
Obr. 59 Ukázka vzorku bez tepelně ovlivněné oblasti pro nastavení IH bez burst módu s energií v pulzu 200 μJ [práce autora].....	65
Obr. 60 Ukázka vývoje kvality povrchů po quasi-tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B [práce autora] .....	68
Obr. 61 Ukázka tepelného ovlivnění po quasi-tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B pro nastavení nanosekundového laseru SPI WF0 s energií v pulzu 500 μJ [práce autora] .....	69
Obr. 62 Ukázka vzorku bez tepelně ovlivněné oblasti po quasi-tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B pro nastavení IH bez burst módu s energií v pulzu 200 μJ [práce autora] .....	69
Obr. 63 Ukázka vývoje kvality povrchů po tangenciálním laserovém soustružení dle varianty C – vlastní řešení [práce autora] .....	73
Obr. 64 Ukázka tepelného ovlivnění po tangenciálním laserového soustružení dle varianty C nastavením WF 0 s energií v pulzu 250μJ [práce autora].....	73
Obr. 65 Ukázka vzorku bez tepelně ovlivněné oblasti po tangenciálním laserovém soustružení dle varianty C pro nastavení IH bez burst módu s energií v pulzu 200 μJ [práce autora] .....	74
Obr. 66 Shrnující obrázek jednotlivých nastavení, při kterých bylo dosaženo nejvyššího tepelného ovlivnění [práce autora] .....	80
Obr. 67 Vývoj drsnosti v závislosti na energii v pulzu pro jednotlivá nastavení při tangenciálním laserovém soustružení dle varianty A [práce autora] .....	99
Obr. 68 Vývoj drsnosti v závislosti na energii v pulzu pro jednotlivá nastavení při quasi-tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B [práce autora] .....	99
Obr. 69 Vývoj drsnosti v závislosti na energii v pulzu pro jednotlivá nastavení při tangenciálním laserovém soustružení dle varianty C (vlastní řešení) [práce autora] ...	100
Obr. 70 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta A – IHH [práce autora] .....	101
Obr. 71 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta A – IH bez burst módu [práce autora] .....	102
Obr. 72 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta A– IH s burst módem o třech pulzech [práce autora].....	103
Obr. 73 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta A – SPI WF0 [práce autora] ...	104
Obr. 74 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta B – IHH [práce autora].....	105
Obr. 75 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta B – IH bez burst módu [práce autora] .....	106
Obr. 76 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta B – IH s burst módem o třech pulzech [práce autora].....	107
Obr. 77 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta B – SPI WF0 [práce autora] ...	108
Obr. 78 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta C – IHH [práce autora].....	109
Obr. 79 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta C – IH bez burst módu [práce autora] .....	110

Obr. 80 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta C – IH s burst módem o třech pulzech [práce autora].....	111
Obr. 81 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta C – SPI WF0 [práce autora] ....	112
Tab. 1 Charakteristika jednotlivých os zařízení MASTER 1 PSGFRT [78].....	49
Tab. 2 Vybrané parametry galvo-skenovací hlavy IntelliSCAN14 od firmy SCANLAB [79].....	50
Tab. 3 Vybrané parametry femtosekundového laserového zdroje Carbide light conversion [80]].....	51
Tab. 4 Parametry nanosekundového laserového zdroje SPI-200P-A-EP-Z-L-Y [32]....	51
Tab. 5 Vybrané parametry optického 3D mikroskopu Alinoca InfiniteFocus G5 [81]..	52
Tab. 6 Základní parametry laserového konfokálního mikroskopu Keyence VK-X 3000 [82].....	53
Tab. 7 Základní parametry zařízení Fanuc Robocut $\alpha$ -C600iC [83].....	53
Tab. 8 Chemické složení a vlastnosti slinutého karbidu s označením (K200) .....	54
Tab. 9 Konstantní parametry společné pro všechny přístupy během experimentu .....	54
Tab. 10 Proměnné parametry pro všechny použité přístupy během experimentu.....	55
Tab. 11 Procesní parametry pro nastavení tangenciálního laserového soustružení dle varianty A [práce autora] .....	56
Tab. 12 Procesní parametry pro nastavení quasi-tangenciálního laserového soustružení dle varianty B [práce autora] .....	57
Tab. 13 Procesní parametry pro nastavení tangenciálního laserového soustružení dle varianty C [práce autora] .....	58
Tab. 14 Doporučené hodnoty přísadků na základě experimentu pro jednotlivé energie v pulzu pro nastavení s nanosekundovými pulzy SPI WF0 [práce autora] .....	81
Tab. 15 Naměřené a vypočítané hodnoty odebraného materiálu tangenciálním laserovém soustružením – varianta A [práce autora].....	96
Tab. 16 Naměřené hodnoty drsnosti tangenciálním laserovým soustružením – varianta A [práce autora] .....	96
Tab. 17 Naměřené a vypočítané hodnoty odebraného materiálu po quasi-tangenciálním laserovém soustružením – varianta B [práce autora].....	97
Tab. 18 Naměřené hodnoty dosažené drsnosti segmentů po quasi-tangenciálním laserovém soustružením varianta B [práce autora].....	97
Tab. 19 Naměřené a vypočítané hodnoty odebraného materiálu po tangenciálním laserovém soustružením – varianta C (vlastní řešení) [práce autora].....	98
Tab. 20 Naměřené hodnoty drsnosti po laserovém soustružením vlastním přístupem – varianta C (vlastní řešení) [práce autora].....	98
Graf 1 Závislost dosaženého průměru na použité energii v pulzu při tangenciálním laserovém soustružením dle varianty A [práce autora].....	61
Graf 2 Závislost minutového úběrů u na použité energii v pulzu při tangenciálním laserovém soustružením dle varianty A [práce autora].....	62
Graf 3 Dosažená drsnost v závislosti na použité energii v pulzu při tangenciálním laserovém soustružením dle varianty A [práce autora].....	63

Graf 4 Závislost dosaženého průměru na použité energii v pulzu při quasi-tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B [práce autora].....	66
Graf 5 Závislost minutového úběru u na použité energii v pulzu při quasi-tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B [práce autora].....	67
Graf 6 Dosažená drsnost v závislosti na použité energii v pulzu při quasi – tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B [práce autora] .....	68
Graf 7 Závislost dosaženého průměru na použité energii v pulzu při – tangenciálním laserovém soustružení dle varianty C – vlastní řešení [práce autora].....	70
Graf 8 Závislost minutového úběru u na použité energii v pulzu při tangenciálním laserovém soustružení dle varianty C – vlastní přístup [práce autora].....	71
Graf 9 Dosažená drsnost v závislosti na použité energii v pulzu při tangenciálním laserovém soustružení dle varianty C – vlastní řešení [práce autora].....	72
Graf 10 Souhrnný graf komparace dosažených průměrů po laserovém soustružení [práce autora] .....	75
Graf 11 Souhrnný graf komparace minutových úběrů [práce autora] .....	77
Graf 12 Souhrnný graf komparace dosažených drsností pro nastavení s fs pulzy [práce autora] .....	79
Graf 13 Souhrnný graf komparace dosažených drsností pro nastavení s ns pulzy [práce autora] .....	80

# Příloha 1

Tab. 15 Naměřené a vypočítané hodnoty odebraného materiálu tangenciálním laserovým soustružením – varianta A [práce autora]

Vrainta A - Rychlost úběru											
II H, 515 nm, 260 fs											
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	$v_c$ [m/min]	$f_{ot}$ [mm/ot]	$a_p$ [mm]	$apn$ [-]	$t$ [s]	offset [mm]	$D_0$ [mm]	$D_1$ [mm]	$D_0-D_1$ [mm]	$U$ [mm <sup>3</sup> /min]
21	105	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,319	0,681	0,291
15	75	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,482	0,518	0,228
10	50	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,497	0,503	0,222
5	25	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,614	0,386	0,174
I H -w/o Burst mode , 1030 nm, 260 fs											
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	$v_c$ [m/min]	$f_{ot}$ [mm/ot]	$a_p$ [mm]	$apn$ [-]	$t$ [s]	offset [mm]	$D_0$ [mm]	$D_1$ [mm]	$D_0-D_1$ [mm]	$U$ [mm <sup>3</sup> /min]
40	200	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,344	0,656	0,281
30	150	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,355	0,645	0,277
20	100	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,356	0,644	0,277
10	50	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,375	0,625	0,270
I H -w Burst mode , 1030 nm, 260 fs											
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	$v_c$ [m/min]	$f_{ot}$ [mm/ot]	$a_p$ [mm]	$apn$ [-]	$t$ [s]	offset [mm]	$D_0$ [mm]	$D_1$ [mm]	$D_0-D_1$ [mm]	$U$ [mm <sup>3</sup> /min]
40	200	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,500	0,500	0,220
30	150	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,562	0,438	0,196
20	100	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,623	0,377	0,170
10	50	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,690	0,310	0,141
SPI - WF0, 1064 nm, 58 ns											
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	$v_c$ [m/min]	$f_{ot}$ [mm/ot]	$a_p$ [mm]	$apn$ [-]	$t$ [s]	offset [mm]	$D_0$ [mm]	$D_1$ [mm]	$D_0-D_1$ [mm]	$U$ [mm <sup>3</sup> /min]
165	825	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,605	0,395	0,178
130	650	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,540	0,460	0,205
100	500	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,544	0,456	0,203
80	400	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,498	0,502	0,221
50	250	0,65	0,05	0,01	37	1527	0,025	3	2,903	0,097	0,046

Tab. 16 Naměřené hodnoty drsnosti tangenciálním laserovým soustružením – varianta A [práce autora]

Vrainta A - Drsnost povrchu										
II H, 515 nm, 260 fs										
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	$R_a$ 1 [μm]	$R_a$ 2 [μm]	$R_a$ 3 [μm]	avg. $R_a$ [μm]	$R_z$ 1 [μm]	$R_z$ 2 [μm]	$R_z$ 3 [μm]	avg. $R_z$ [μm]	
21	105	0,224	0,181	0,236	0,214	1,251	0,941	1,300	1,164	
15	75	0,218	0,240	0,235	0,231	1,185	1,258	1,277	1,240	
10	50	0,304	0,250	0,316	0,290	1,670	1,414	1,494	1,526	
5	25	1,818	1,369	1,857	1,681	6,771	5,440	6,770	6,327	
I H -w/o Burst mode , 1030 nm, 260 fs										
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	$R_a$ 1 [μm]	$R_a$ 2 [μm]	$R_a$ 3 [μm]	avg. $R_a$ [μm]	$R_z$ 1 [μm]	$R_z$ 2 [μm]	$R_z$ 3 [μm]	avg. $R_z$ [μm]	
40	200	0,236	0,184	0,242	0,221	1,129	0,967	1,190	1,095	
30	150	0,269	0,232	0,262	0,254	1,505	1,142	1,436	1,361	
20	100	0,252	0,209	0,233	0,231	1,533	1,097	1,296	1,309	
10	50	0,653	0,637	0,670	0,653	2,813	3,003	3,013	2,943	
I H -w Burst mode , 1030 nm, 260 fs										
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	$R_a$ 1 [μm]	$R_a$ 2 [μm]	$R_a$ 3 [μm]	avg. $R_a$ [μm]	$R_z$ 1 [μm]	$R_z$ 2 [μm]	$R_z$ 3 [μm]	avg. $R_z$ [μm]	
40	200	0,848	0,771	0,830	0,816	3,610	4,145	3,948	3,901	
30	150	0,853	0,712	1,024	0,863	7,480	6,148	8,080	7,236	
20	100	0,637	0,530	0,643	0,603	2,882	2,304	2,770	2,652	
10	50	0,415	0,503	0,443	0,454	2,074	2,949	2,326	2,450	
SPI - WF0, 1064 nm, 58 ns										
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	$R_a$ 1 [μm]	$R_a$ 2 [μm]	$R_a$ 3 [μm]	avg. $R_a$ [μm]	$R_z$ 1 [μm]	$R_z$ 2 [μm]	$R_z$ 3 [μm]	avg. $R_z$ [μm]	
165	825	1,177	1,100	1,261	1,179	7,667	6,596	7,848	7,370	
130	650	1,220	0,992	1,265	1,159	7,287	5,377	7,973	6,879	
100	500	1,330	1,215	1,241	1,262	7,378	7,617	7,534	7,510	
80	400	1,097	1,083	1,023	1,068	6,884	6,392	5,745	6,340	
50	250	5,963	6,495	5,340	5,933	31,917	37,227	33,742	34,295	



Tab. 17 Naměřené a vypočítané hodnoty odebraného materiálu po quasi-tangenciálním laserovém soustružení – varianta B [práce autora]

Vrainta B - Rychlost úběru										
II H, 515 nm, 260 fs										
Výkon [W]	E <sub>p</sub> [μJ]	v <sub>c</sub> [m/min]	f <sub>ot</sub> [mm/ot]	apn [-]	t [s]	offset [mm]	D <sub>0</sub> [mm]	D <sub>1</sub> [mm]	D <sub>0</sub> -D <sub>1</sub> [mm]	U [mm <sup>3</sup> /min]
21	105	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,526	0,474	0,617
15	75	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,544	0,456	0,596
10	50	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,546	0,454	0,593
5	25	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,704	0,296	0,398
I H -w/o Burst mode , 1030 nm, 260 fs										
Výkon [W]	E <sub>p</sub> [μJ]	v <sub>c</sub> [m/min]	f <sub>ot</sub> [mm/ot]	apn [-]	t [s]	offset [mm]	D <sub>0</sub> [mm]	D <sub>1</sub> [mm]	D <sub>0</sub> -D <sub>1</sub> [mm]	U [mm <sup>3</sup> /min]
40	200	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,338	0,662	0,833
30	150	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,354	0,646	0,815
20	100	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,386	0,614	0,779
10	50	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,518	0,482	0,627
I H -w Burst mode , 1030 nm, 260 fs										
Výkon [W]	E <sub>p</sub> [μJ]	v <sub>c</sub> [m/min]	f <sub>ot</sub> [mm/ot]	apn [-]	t [s]	offset [mm]	D <sub>0</sub> [mm]	D <sub>1</sub> [mm]	D <sub>0</sub> -D <sub>1</sub> [mm]	U [mm <sup>3</sup> /min]
40	200	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,372	0,628	0,795
30	150	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,422	0,578	0,738
20	100	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,598	0,402	0,530
10	50	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,606	0,394	0,520
SPI - WF0, 1064 nm, 58 ns										
Výkon [W]	E <sub>p</sub> [μJ]	v <sub>c</sub> [m/min]	f <sub>ot</sub> [mm/ot]	apn [-]	t [s]	offset [mm]	D <sub>0</sub> [mm]	D <sub>1</sub> [mm]	D <sub>0</sub> -D <sub>1</sub> [mm]	U [mm <sup>3</sup> /min]
165	825	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,442	0,558	0,716
130	650	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,428	0,572	0,732
100	500	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,404	0,596	0,759
80	400	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,420	0,580	0,741
50	250	3,54	0,0012	2	520	0,3	3	2,436	0,564	0,722

Tab. 18 Naměřené hodnoty dosažené drsnosti segmentů po quasi-tangenciálním laserovém soustružení varianta B [práce autora]

Vrainta B - Drsnost povrchu										
II H, 515 nm, 260 fs										
Výkon [W]	E <sub>p</sub> [μJ]	R <sub>a</sub> 1 [μm]	R <sub>a</sub> 2 [μm]	R <sub>a</sub> 3 [μm]	avg. R <sub>a</sub> [μm]	R <sub>z</sub> 1 [μm]	R <sub>z</sub> 2 [μm]	R <sub>z</sub> 3 [μm]	avg. R <sub>z</sub> [μm]	
21	105	0,217	0,229	0,234	0,227	1,190	1,177	1,254	1,207	
15	75	0,221	0,258	0,216	0,232	1,221	1,154	1,384	1,253	
10	50	0,263	0,217	0,241	0,240	1,393	1,121	1,286	1,267	
5	25	0,239	0,195	0,262	0,232	1,201	1,025	1,374	1,200	
I H -w/o Burst mode , 1030 nm, 260 fs										
Výkon [W]	E <sub>p</sub> [μJ]	R <sub>a</sub> 1 [μm]	R <sub>a</sub> 2 [μm]	R <sub>a</sub> 3 [μm]	avg. R <sub>a</sub> [μm]	R <sub>z</sub> 1 [μm]	R <sub>z</sub> 2 [μm]	R <sub>z</sub> 3 [μm]	avg. R <sub>z</sub> [μm]	
40	200	0,191	0,156	0,209	0,185	1,036	0,746	1,050	0,944	
30	150	0,234	0,182	0,196	0,204	1,291	1,106	1,218	1,205	
20	100	0,189	0,181	0,214	0,195	0,932	0,943	1,192	1,022	
10	50	0,313	0,297	0,316	0,309	1,660	1,436	1,656	1,584	
I H -w Burst mode , 1030 nm, 260 fs										
Výkon [W]	E <sub>p</sub> [μJ]	R <sub>a</sub> 1 [μm]	R <sub>a</sub> 2 [μm]	R <sub>a</sub> 3 [μm]	avg. R <sub>a</sub> [μm]	R <sub>z</sub> 1 [μm]	R <sub>z</sub> 2 [μm]	R <sub>z</sub> 3 [μm]	avg. R <sub>z</sub> [μm]	
40	200	0,212	0,211	0,227	0,217	1,130	1,233	1,230	1,198	
30	150	0,198	0,203	0,237	0,213	1,030	1,179	1,487	1,232	
20	100	0,268	0,201	0,317	0,262	1,410	1,260	1,510	1,393	
10	50	0,240	0,233	0,279	0,251	1,142	1,139	1,634	1,305	
SPI - WF0, 1064 nm, 58 ns										
Výkon [W]	E <sub>p</sub> [μJ]	R <sub>a</sub> 1 [μm]	R <sub>a</sub> 2 [μm]	R <sub>a</sub> 3 [μm]	avg. R <sub>a</sub> [μm]	R <sub>z</sub> 1 [μm]	R <sub>z</sub> 2 [μm]	R <sub>z</sub> 3 [μm]	avg. R <sub>z</sub> [μm]	
165	825	3,690	5,287	5,288	4,755	20,837	30,426	30,788	27,350	
130	650	4,067	3,704	4,415	4,062	23,504	18,307	23,816	21,876	
100	500	5,957	3,489	4,149	4,532	29,273	17,946	21,669	22,963	
90	450	4,833	5,645	4,354	4,944	22,348	24,598	25,962	24,303	
50	50	3,823	3,946	3,814	3,861	18,252	23,893	22,301	21,482	

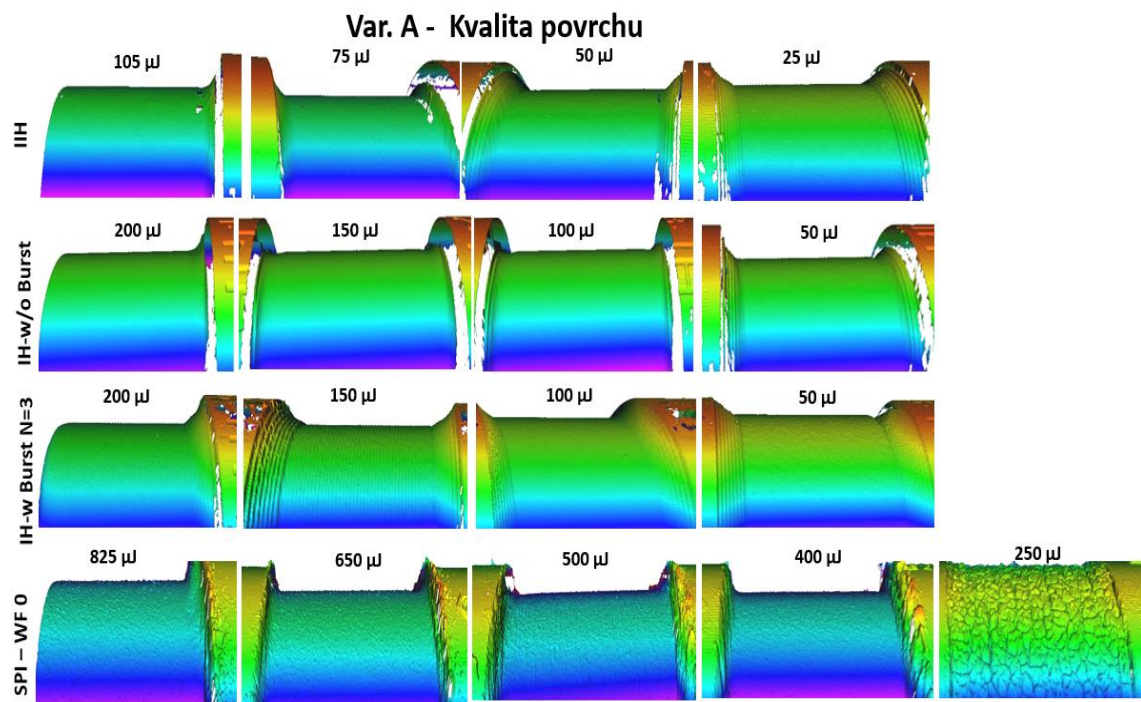
Tab. 19 Naměřené a vypočítané hodnoty odebraného materiálu po tangenciálním laserovém soustružení – varianta C (vlastní řešení) [práce autora]

<b>Vrainta C - Rychlost úběru</b>											
<b>II H, 515 nm, 260 fs</b>											
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	$v_c$ [m/min]	$f_{ot}$ [mm/ot]	$a_p$ [mm]	$apn$ [-]	$t$ [s]	offset [mm]	$D_0$ [mm]	$D_1$ [mm]	$D_0-D_1$ [mm]	$U$ [mm <sup>3</sup> /min]
21	105	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,192	0,808	1,321
15	75	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,402	0,598	1,017
10	50	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,654	0,346	0,616
5	25	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,812	0,188	0,344
<b>I H -w/o Burst mode , 1030 nm, 260 fs</b>											
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	$v_c$ [m/min]	$f_{ot}$ [mm/ot]	$a_p$ [mm]	$apn$ [-]	$t$ [s]	offset [mm]	$D_0$ [mm]	$D_1$ [mm]	$D_0-D_1$ [mm]	$U$ [mm <sup>3</sup> /min]
40	200	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,164	0,836	1,360
30	150	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,198	0,802	1,313
20	100	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,262	0,738	1,223
10	50	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,502	0,498	0,863
<b>I H -w Burst mode , 1030 nm, 260 fs</b>											
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	$v_c$ [m/min]	$f_{ot}$ [mm/ot]	$a_p$ [mm]	$apn$ [-]	$t$ [s]	offset [mm]	$D_0$ [mm]	$D_1$ [mm]	$D_0-D_1$ [mm]	$U$ [mm <sup>3</sup> /min]
40	200	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,030	0,970	1,537
30	150	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,104	0,896	1,440
20	100	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,234	0,766	1,263
10	50	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,544	0,456	0,796
<b>SPI - WF0, 1064 nm, 58 ns</b>											
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	$v_c$ [m/min]	$f_{ot}$ [mm/ot]	$a_p$ [mm]	$apn$ [-]	$t$ [s]	offset [mm]	$D_0$ [mm]	$D_1$ [mm]	$D_0-D_1$ [mm]	$U$ [mm <sup>3</sup> /min]
165	825	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,262	0,738	1,223
130	650	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,274	0,726	1,206
100	500	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,296	0,704	1,174
80	400	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,904	0,096	0,179
50	250	3,54	0,006	0,05	5	389	0,2	3	2,988	0,012	0,023

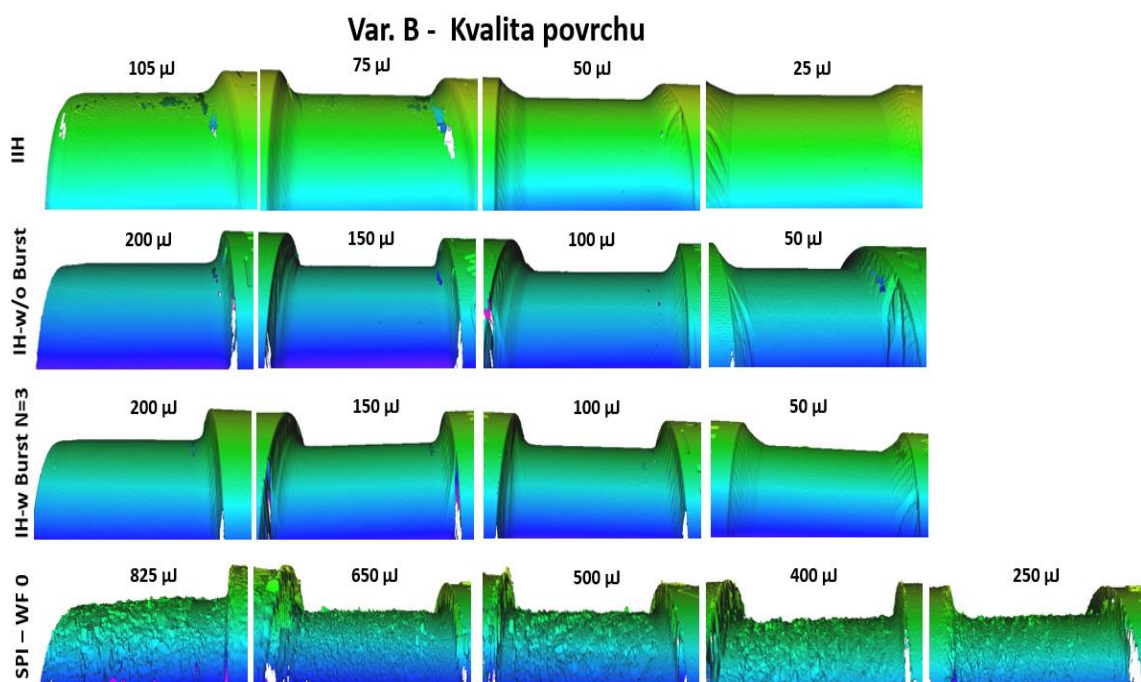
Tab. 20 Naměřené hodnoty drsnosti po laserovém soustružení vlastním přístupem – varianta C (vlastní řešení) [práce autora]

<b>Vrainta C - Drsnost povrchu</b>									
<b>II H, 515 nm, 260 fs</b>									
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	Ra 1 [μm]	Ra 2 [μm]	Ra 3 [μm]	avg. Ra [μm]	Rz 1 [μm]	Rz 2 [μm]	Rz 3 [μm]	avg. Rz [μm]
21	105	0,449	0,441	0,399	0,430	2,003	2,064	1,938	2,002
15	75	4,562	4,563	3,930	4,352	16,162	16,002	14,363	15,509
10	50	5,467	5,342	5,004	5,271	19,057	20,902	18,295	19,418
5	25	1,358	1,325	1,388	1,357	6,642	6,758	5,659	6,353
<b>I H -w/o Burst mode , 1030 nm, 260 fs</b>									
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	Ra 1 [μm]	Ra 2 [μm]	Ra 3 [μm]	avg. Ra [μm]	Rz 1 [μm]	Rz 2 [μm]	Rz 3 [μm]	avg. Rz [μm]
40	200	0,160	0,214	0,198	0,191	1,000	1,312	1,277	1,196
30	150	0,313	0,276	0,340	0,310	1,827	1,564	1,967	1,786
20	100	0,655	0,629	0,684	0,656	4,045	3,940	3,801	3,929
10	50	3,629	3,721	3,688	3,679	12,859	13,467	12,719	13,015
<b>I H -w Burst mode , 1030 nm, 260 fs</b>									
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	Ra 1 [μm]	Ra 2 [μm]	Ra 3 [μm]	avg. Ra [μm]	Rz 1 [μm]	Rz 2 [μm]	Rz 3 [μm]	avg. Rz [μm]
40	200	0,267	0,275	0,225	0,256	1,395	1,394	1,171	1,320
30	150	0,461	0,575	0,492	0,509	2,430	2,754	2,178	2,454
20	100	0,391	0,399	0,411	0,400	1,897	2,519	2,185	2,200
10	50	2,672	2,686	2,554	2,637	10,200	9,638	9,436	9,758
<b>SPI - WF0, 1064 nm, 58 ns</b>									
Výkon [W]	$E_p$ [μJ]	Ra 1 [μm]	Ra 2 [μm]	Ra 3 [μm]	avg. Ra [μm]	Rz 1 [μm]	Rz 2 [μm]	Rz 3 [μm]	avg. Rz [μm]
165	825	1,437	1,559	1,492	1,496	8,073	8,044	8,424	8,180
130	650	1,252	1,577	1,502	1,444	6,691	8,022	9,779	8,164
100	500	1,086	1,186	1,413	1,228	7,038	7,614	8,045	7,566
90	450	9,392	8,479	8,843	8,905	49,637	42,172	47,338	46,382
50	50	4,826	4,651	4,402	4,626	28,038	25,110	25,450	26,199

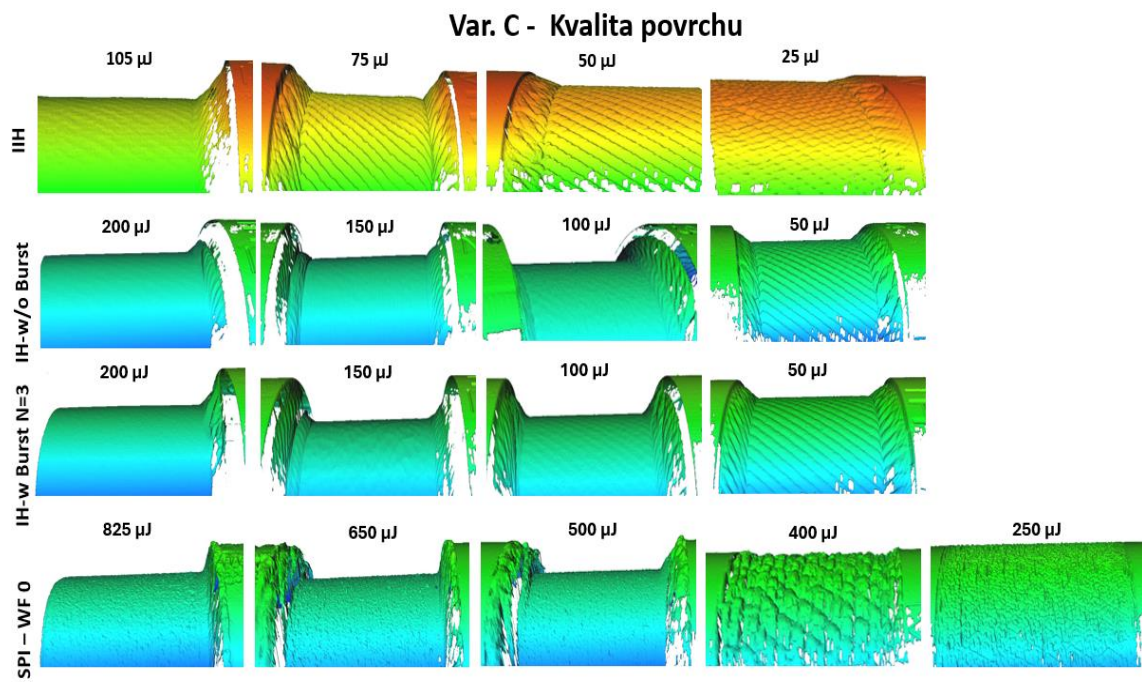
## Příloha 2



Obr. 67 Vývoj drsnosti v závislosti na energii v pulzu pro jednotlivá nastavení při tangenciálním laserovém soustružení dle varianty A [práce autora]



Obr. 68 Vývoj drsnosti v závislosti na energii v pulzu pro jednotlivá nastavení při quasi-tangenciálním laserovém soustružení dle varianty B [práce autora]

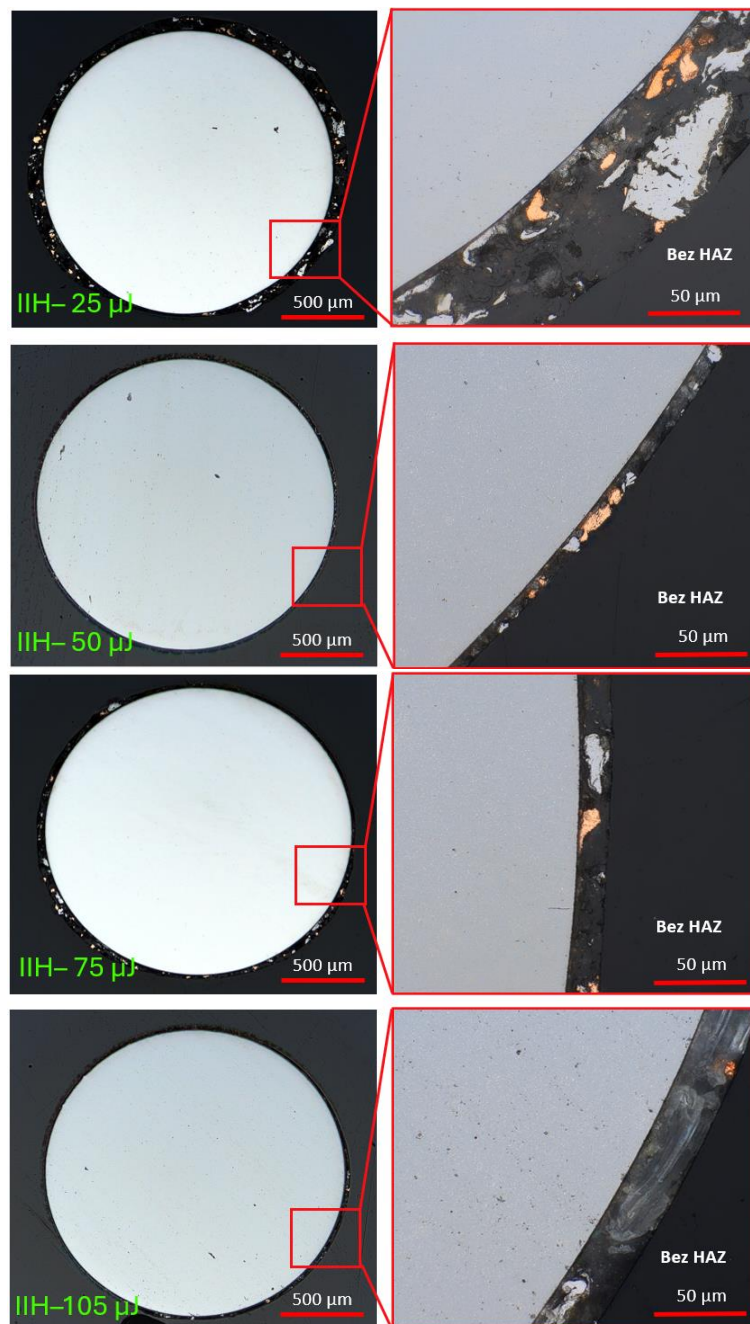


*Obr. 69 Vývoj drsnosti v závislosti na energii v pulzu pro jednotlivá nastavení při tangenciálním laserovém soustružení dle varianty C (vlastní řešení) [práce autora]*

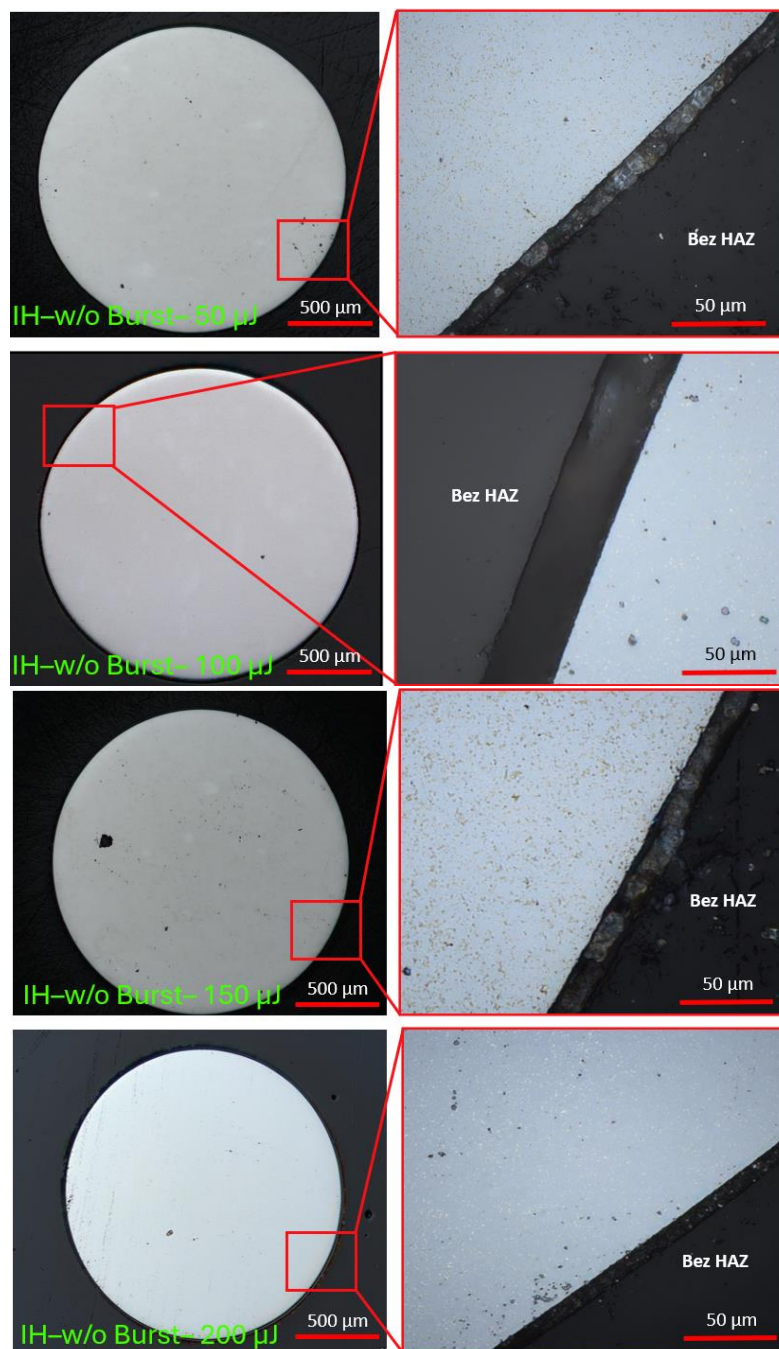


## Příloha 3

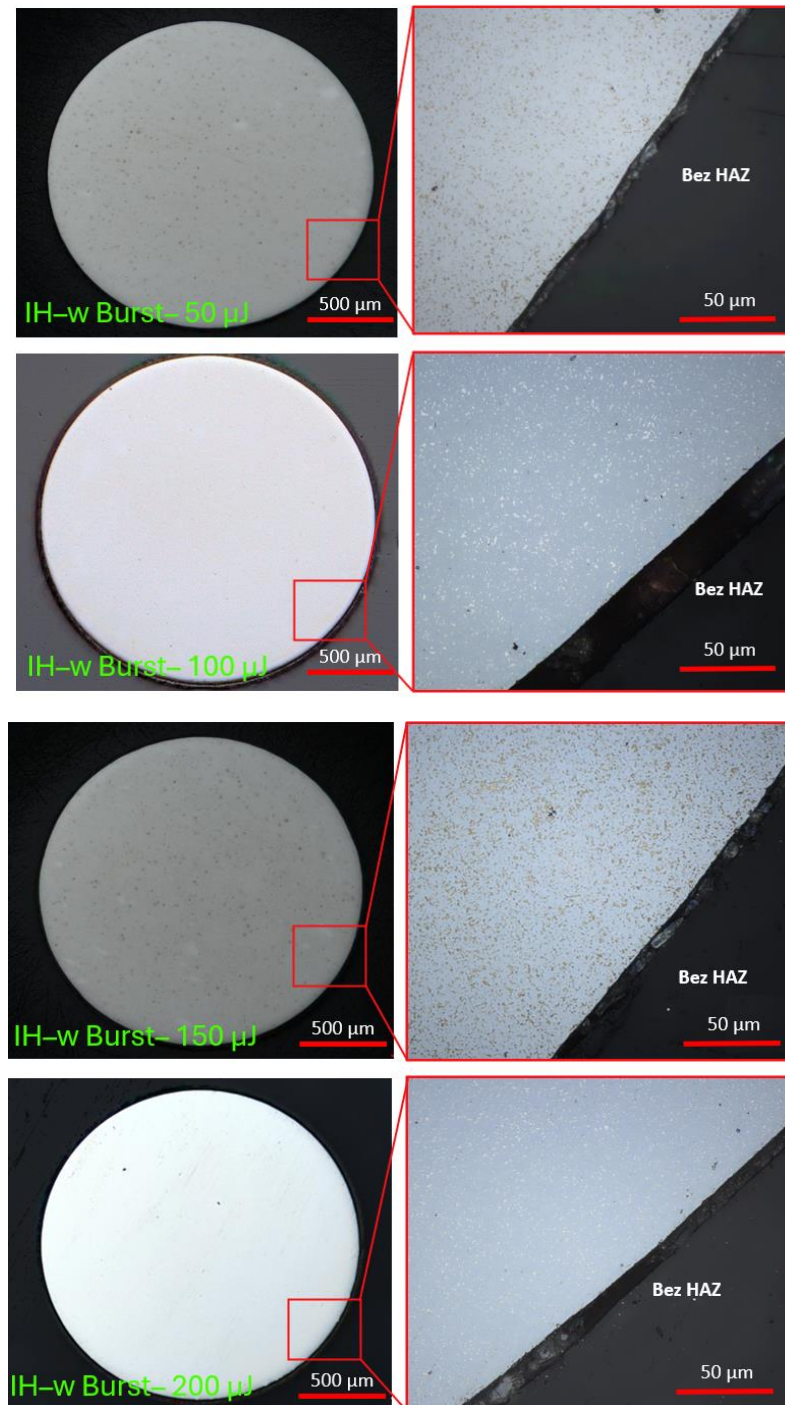
### Vyhodnocení teplého ovlivnění pro laserové soustružení variantou A



Obr. 70 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta A – IIH [práce autora]

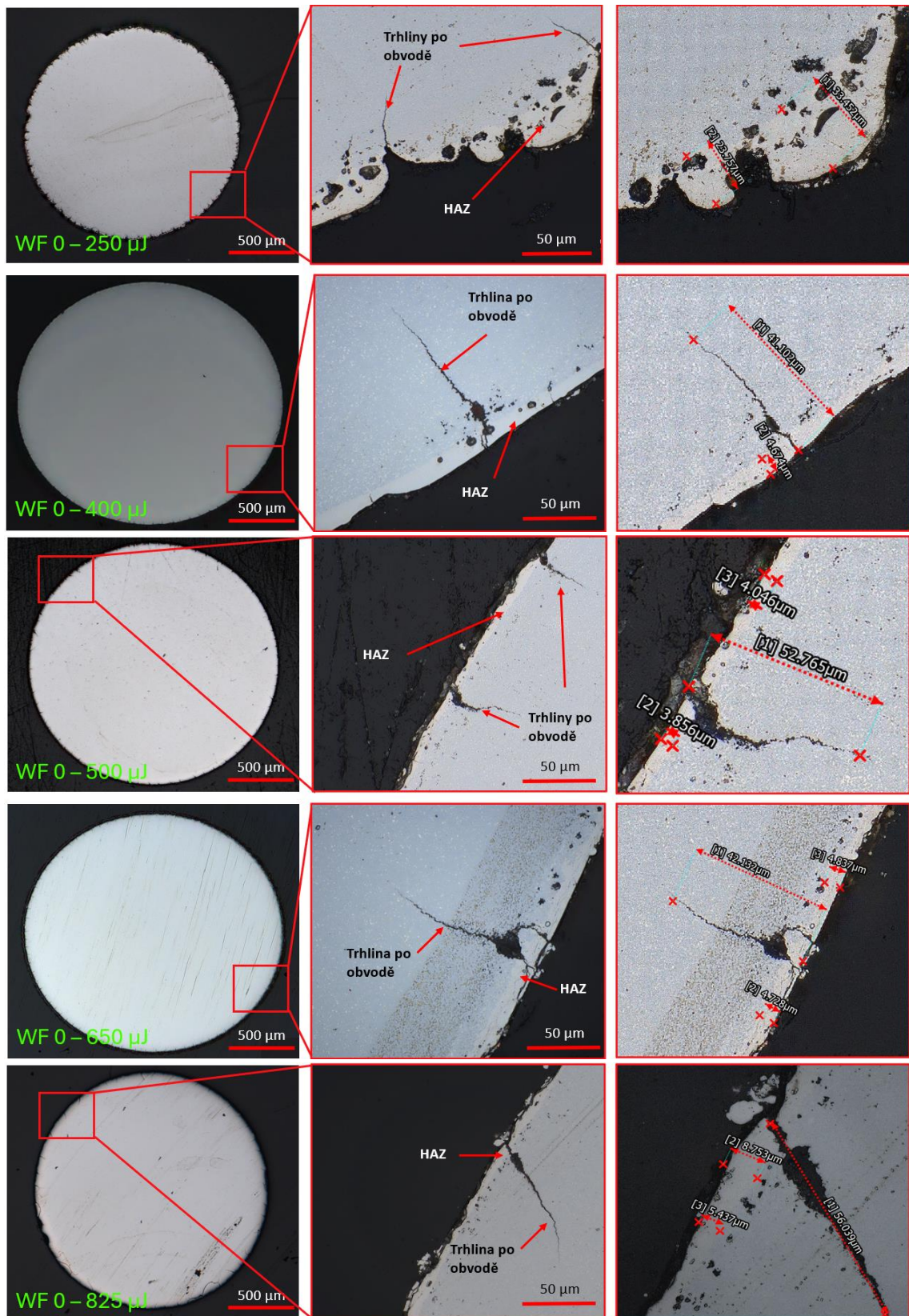


Obr. 71 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta A – IH bez burst módu [práce autora]



Obr. 72 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta A– IH s burst módem o třech pulzech [práce autora]

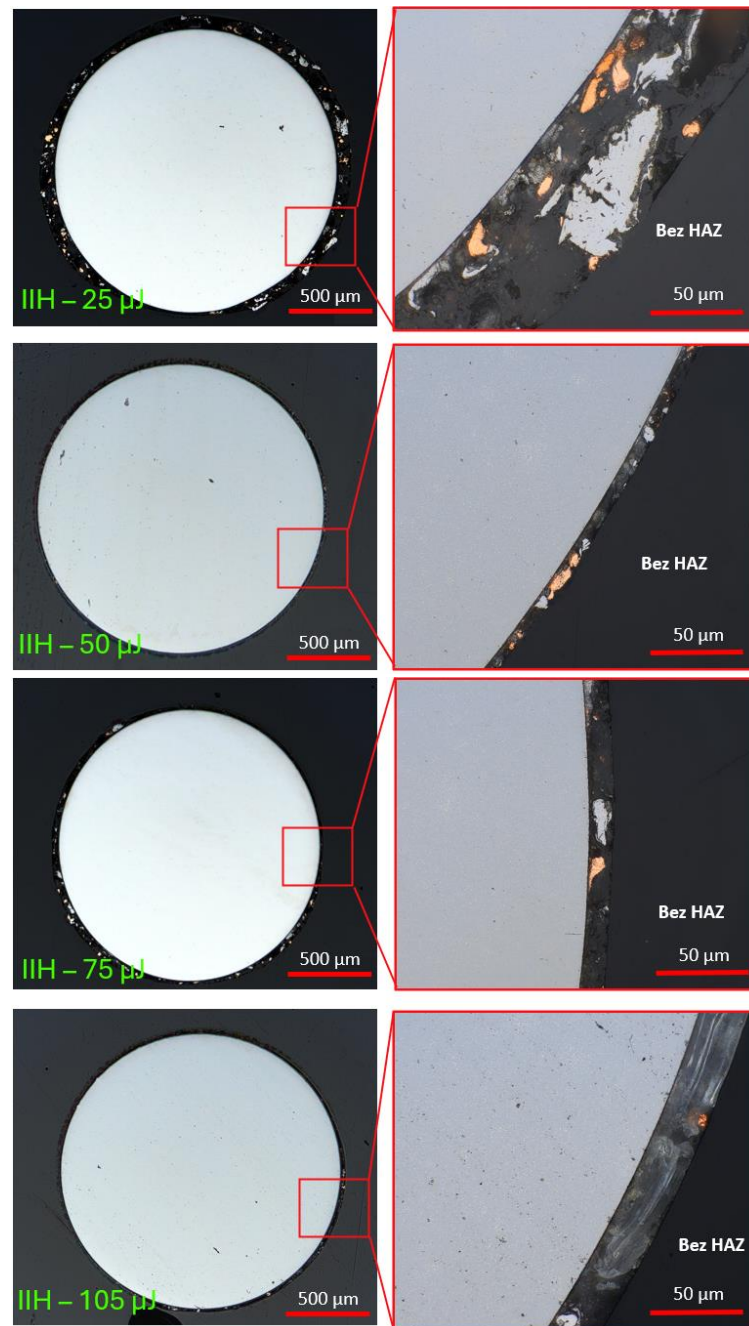




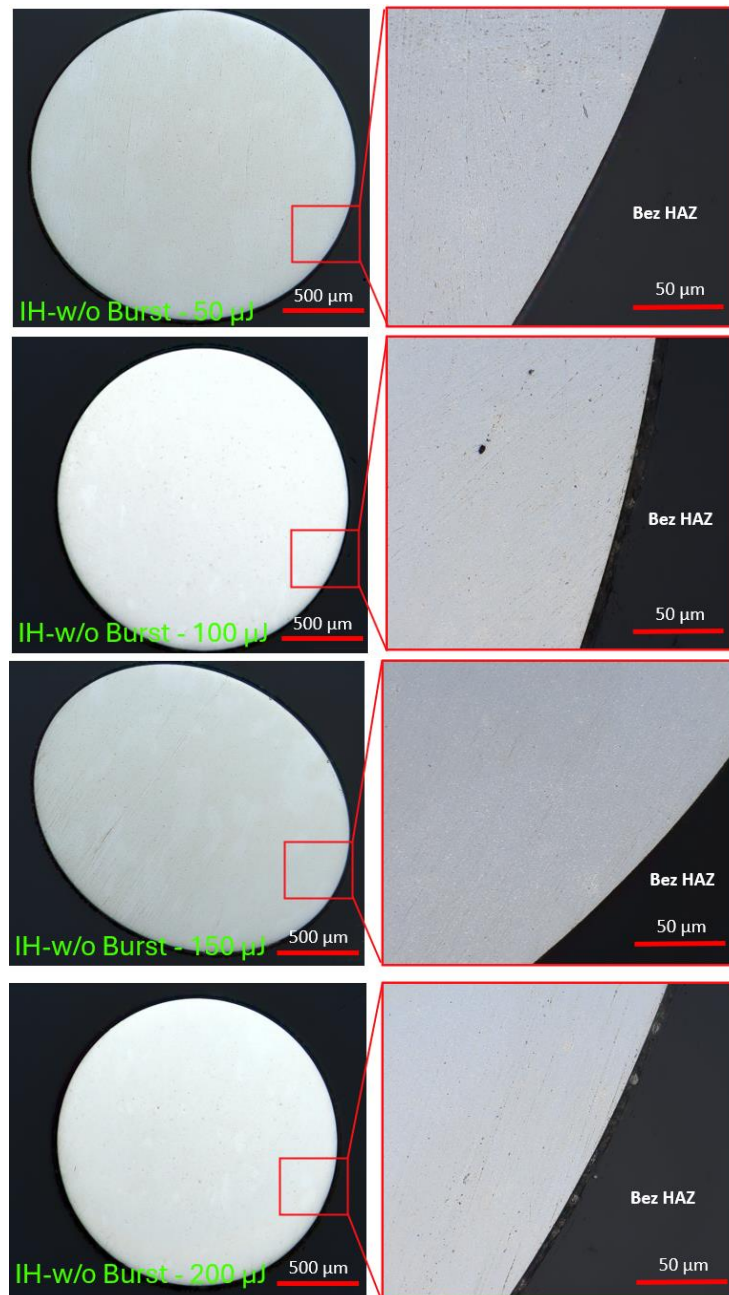
Obr. 73 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta A – SPI WF0 [práce autora]



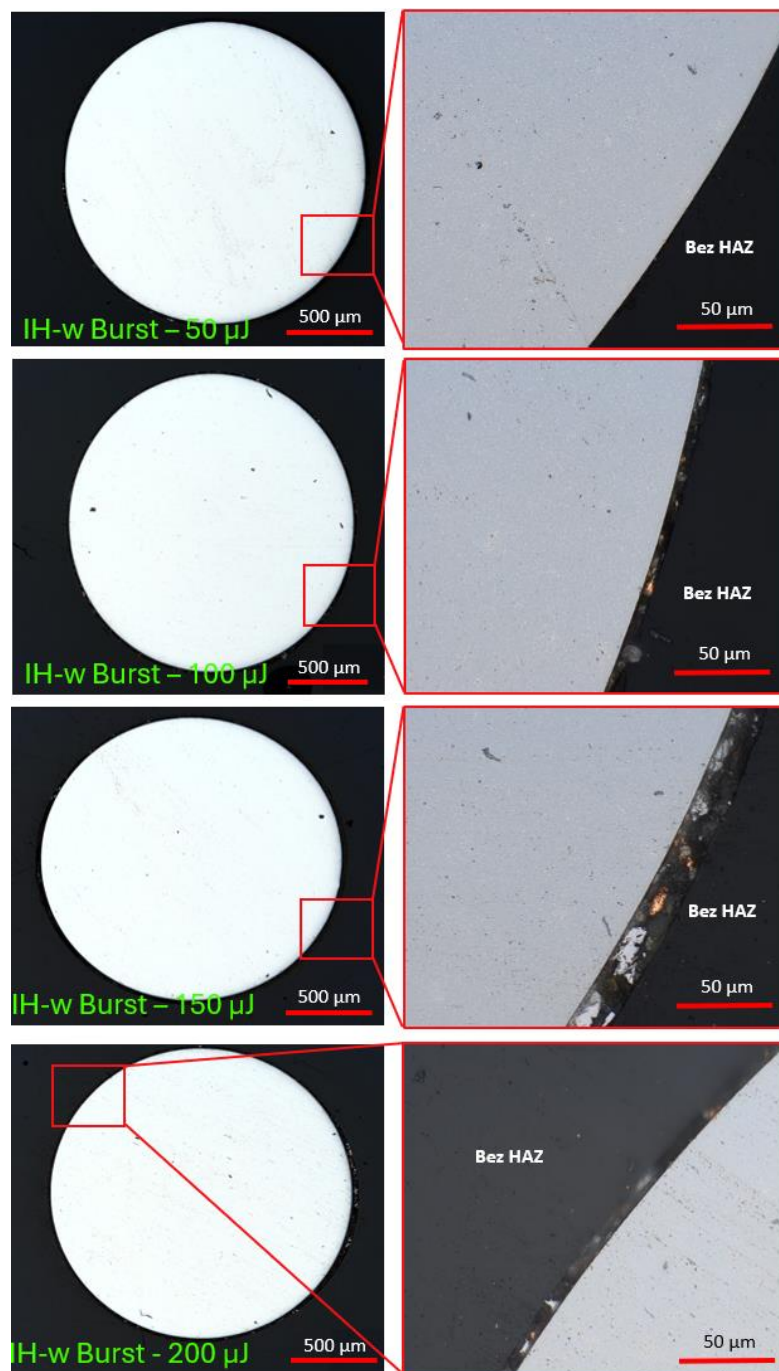
## Vyhodnocení teplého ovlivnění pro laserové soustružení variantou B



Obr. 74 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta B – I IH [práce autora]

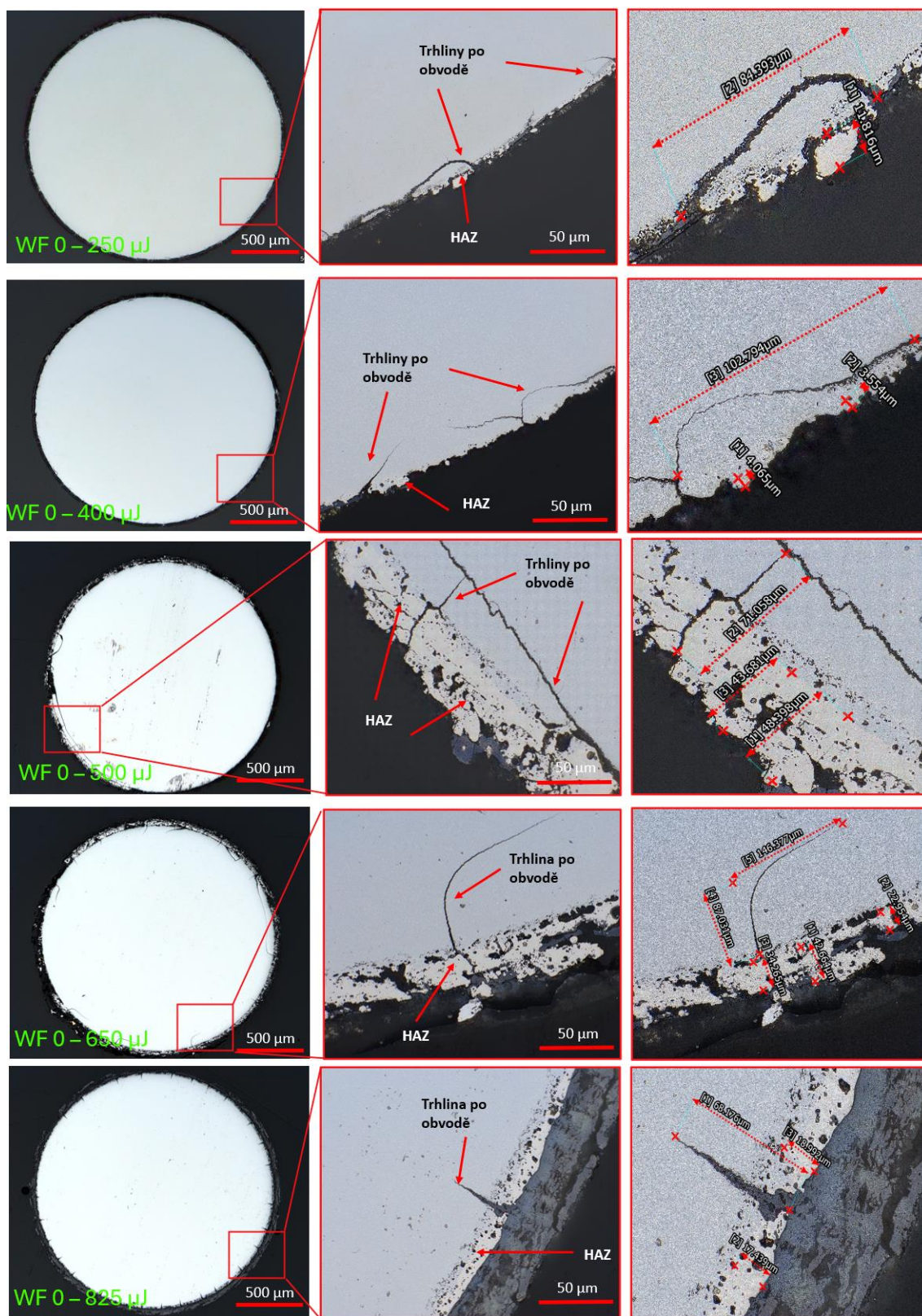


Obr. 75 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta B – IH bez burst módu [práce autora]



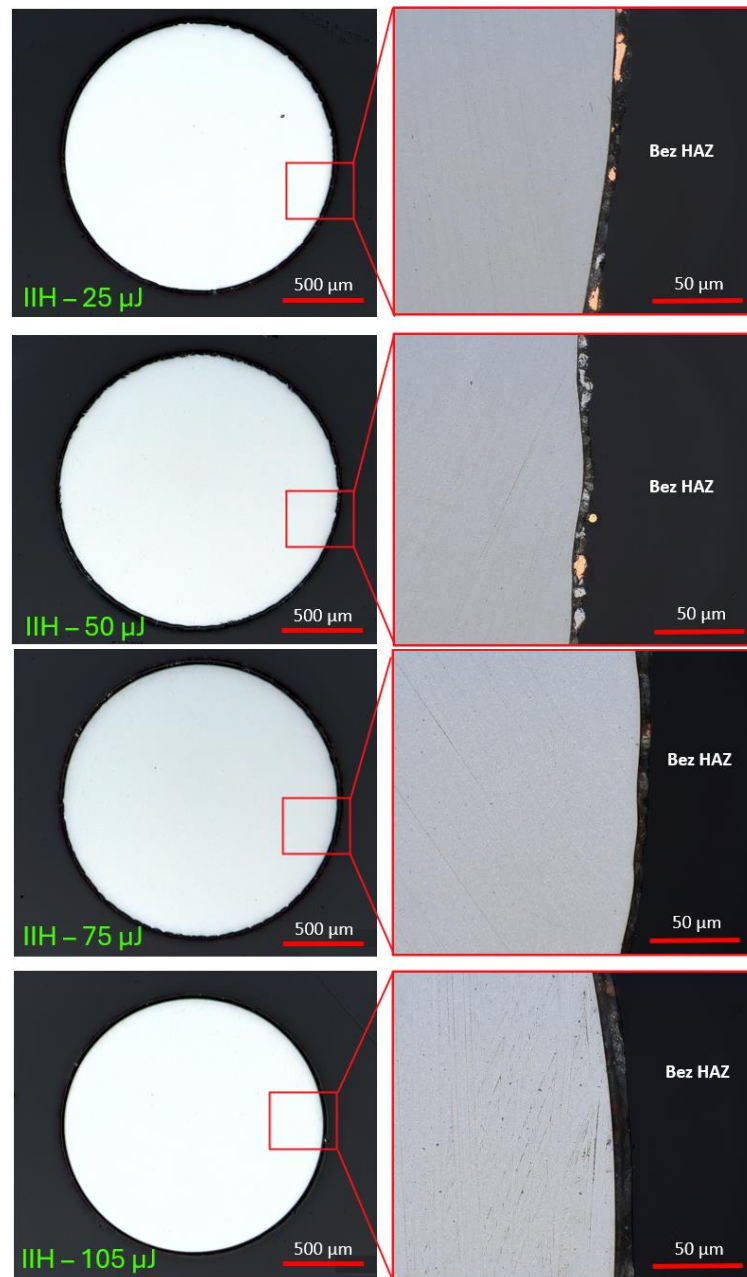
Obr. 76 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta B – IH s burst módem o třech pulzech [práce autora]



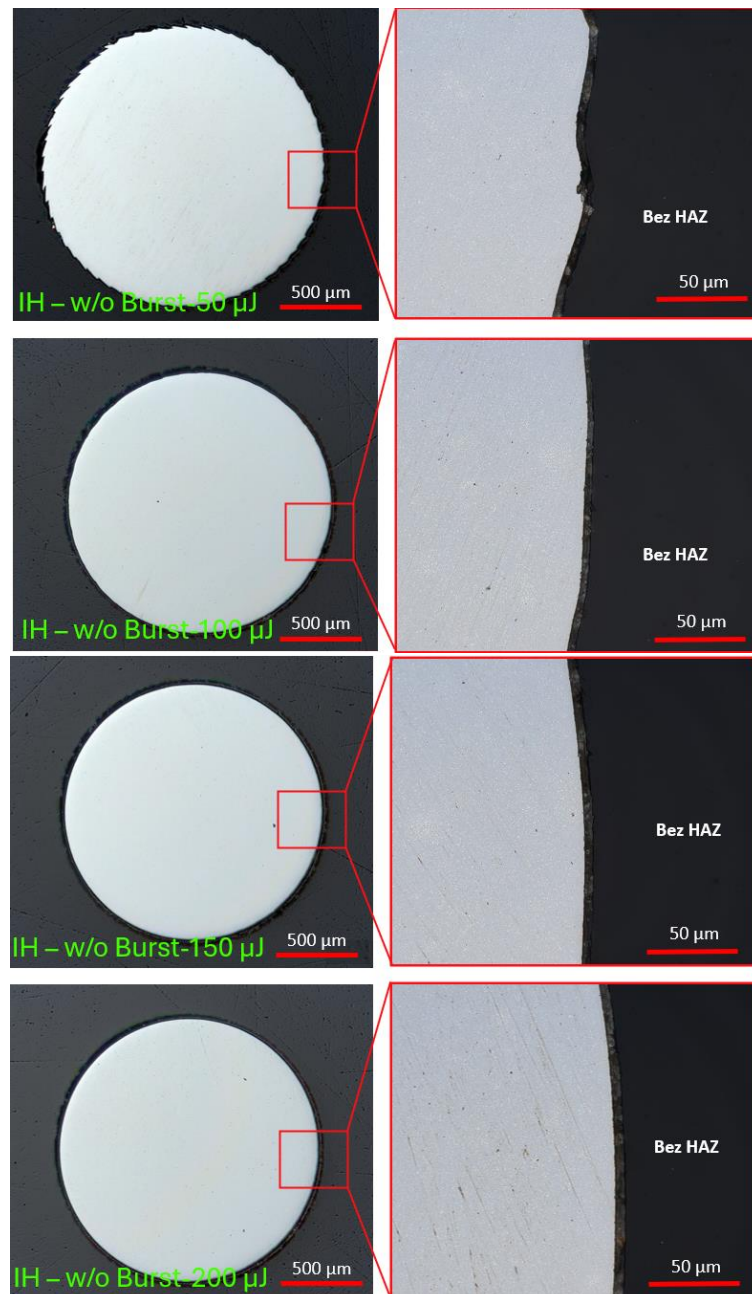


Obr. 77 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta B – SPI WF0 [práce autora]

## Vyhodnocení teplého ovlivnění pro laserové soustružení variantou C

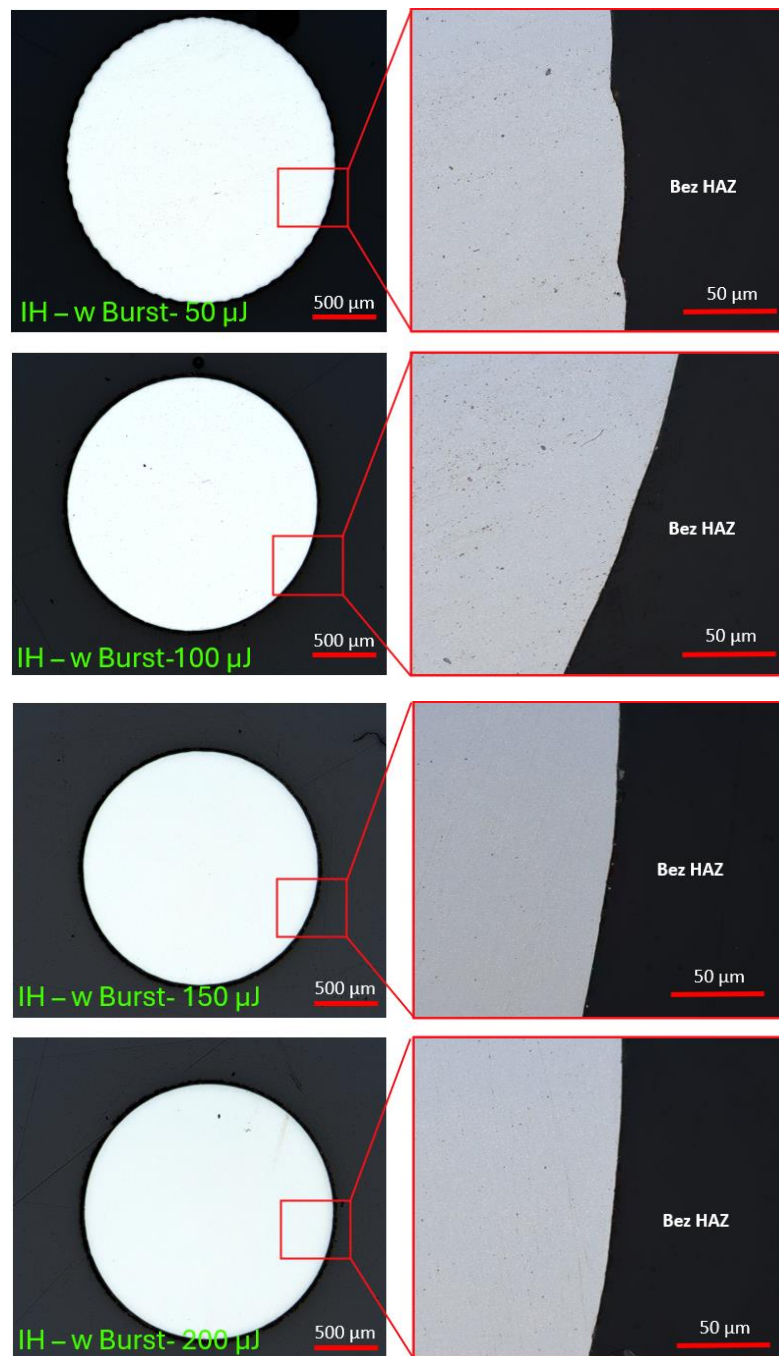


Obr. 78 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta C – IIH [práce autora]

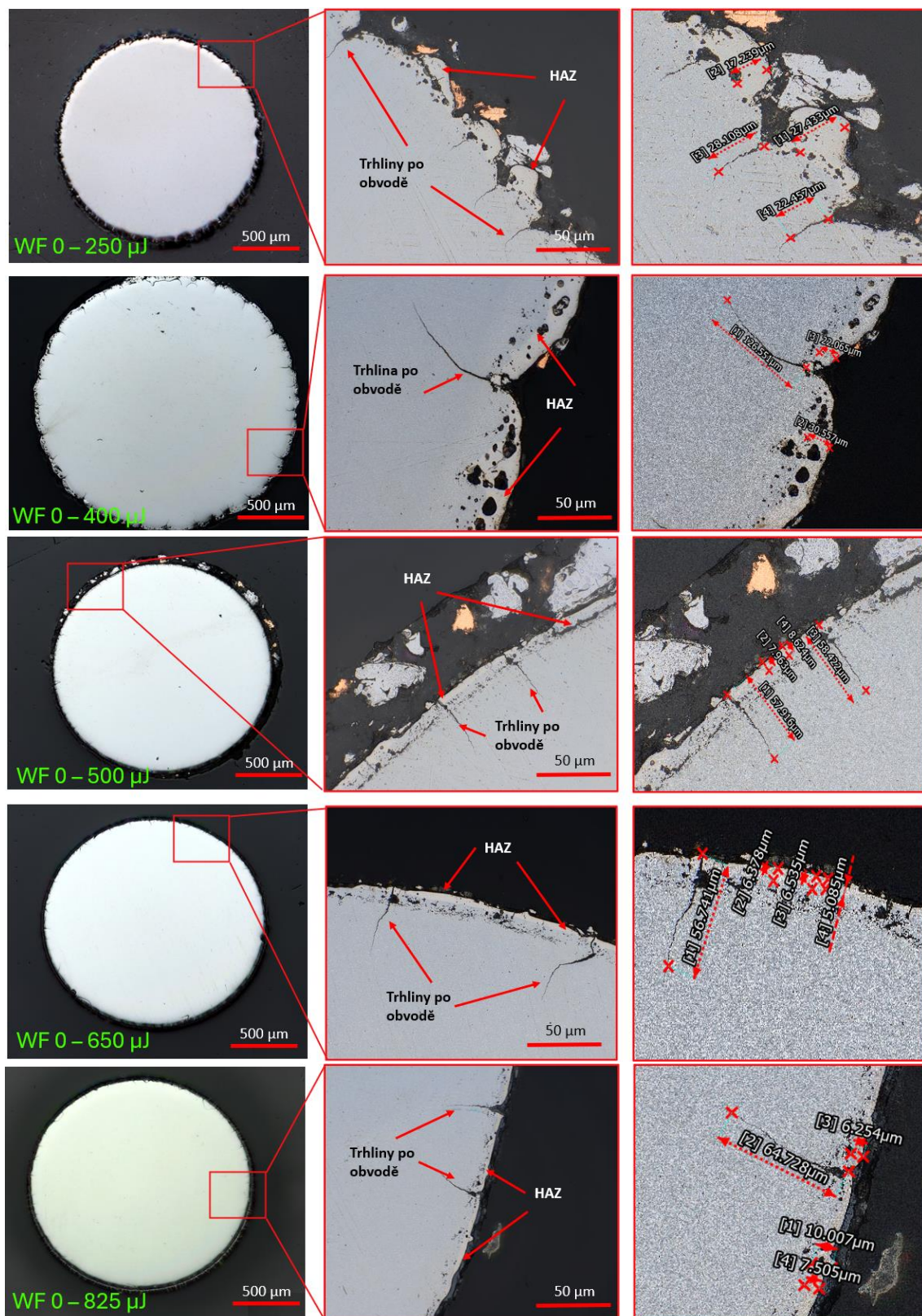


Obr. 79 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta C – IH bez burst módu [práce autora]





Obr. 80 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta C – IH s burst módem o třech pulzech [práce autora]



Obr. 81 Vyhodnocení tepelného ovlivnění – varianta C – SPI WF0 [práce autora]