

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv tepelné akumulace na laserové mikroobrábění

Autor: **Bc. Lucie Prokešová**

Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Martan, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Lucie PROKEŠOVÁ
Osobní číslo:	S17N0046P
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie – technologie obrábění
Téma práce:	Vliv tepelné akumulace na laserové mikroobrábění
Zadávací katedra:	Katedra technologie obrábění

Zásady pro vypracování

1. Rešerše problematiky akumulace tepla při laserovém mikroobrábění.
2. Provedení experimentů laserového mikroobrábění pulzním laserem s různými parametry procesu.
3. Měření teploty povrchu při mikroobrábění pomocí termokamery nebo rychlých infračervených detektorů.
4. Stanovení objemu odebraného materiálu a hodnocení kvality obrábění s využitím 3D profilometru a mikroskopu.
5. Korelace teploty materiálu při procesu s rychlostí/efektivitou odebrání materiálu.

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

Seznam doporučené literatury:

- Vědecké články z databází Elsevier/Scopus
- Laser-Beam Interactions with Materials – Physical Principles and Applications, Martin von Allmen, Springer Series in Materials Science Volume 2 (1987).
- The Laser as a Tool, Gabriela Buchfink, Vogel Buchverlag, Wurzburg, (2007) 280 p. ISBN-10 3-8343-3072-8

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jiří Martan, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Jiří Martan, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



L.S.



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

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Martanovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Poděkování patří také výzkumnému centru Nové Technologie Západočeské univerzity v Plzni, kde v rámci projektu LabIR-PAV (reg. č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/18 069/0010018) diplomová práce vznikla. Mé poděkování patří též kolegům z výzkumného centra za spolupráci při získávání údajů pro výzkumnou část práce a také za pomoc při řešení různých problémů během zpracování této práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Prokešová	Jméno Lucie	
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Martan, Ph.D.	Jméno Jiří	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vliv tepelné akumulace na laserové mikroobrábění		

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	66	TEXTOVÁ ČÁST	43	GRAFICKÁ ČÁST	23
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato diplomová práce se zabývá vlivem tepelné akumulace při procesu laserového mikroobrábění na rychlost/efektivitu obrábění a výslednou drsnost obrobené drážky. V práci je změřena tepelná akumulace jako napět'ový signál pomocí rychlého infračerveného měřicího systému a je převedena na teplotu pomocí kalibrace. Při nízkých skenovacích rychlostech dochází k natavení, zdrsňení a degradaci materiálu díky vysoké tepelné akumulaci. Při vysokých rychlostech dochází k jemnému obrábění bez nepříznivého ovlivnění tepelnou akumulací. Pro nízkou energii v pulzu je nejefektivnější odběr materiálu a nejstabilnější teplota povrchu.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Tepelná akumulace, laserové mikroobrábění, pulzní laser, infračervené záření, měřicí systém, drsnost povrchu, množství odebraného materiálu</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Prokešová	Name Lucie	
FIELD OF STUDY	N2301 „Manufacturing Processes – Technology of Metal cutting“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Martan, Ph.D.	Name Jiří	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Influence of heat accumulation on laser micromachining		

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

NUMBER OF PAGES (A4 and eg. A4)

TOTALLY	66	TEXT PART	43	GRAPHICAL PART	23
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This diploma thesis deals with the influence of heat accumulation in the process of laser micromachining on the speed/efficiency of machining and the resulting of the roughness of machined groove. In this work, heat accumulation is measured as a voltage signal using a fast infrared measuring system and it is converted to temperature by calibration. At low scanning speeds, the material melts, roughens and degrades due to high heat accumulation. At high scanning speeds, fine machining takes place without being adversely affected by heat accumulation. For low pulsed energy, material removal is the most efficient and surface temperature is the most stable.</p>
KEY WORDS	<p>Heat accumulation, laser micromachining, ultrashort pulsed laser, infrared radiation, measuring system, roughness, amount of removed material</p>

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Laser.....	13
2.1	Struktura laseru.....	13
2.2	Vlastnosti laseru	14
2.3	Kvalita laserového paprsku	15
2.4	Druhy laserů	15
3	Interakce laseru s materiálem.....	17
4	Laserové mikroobrábění	20
5	Tepelná akumulace při laserovém mikroobrábění.....	22
6	Měření v laserových technologiích.....	26
6.1	Planckův zákon.....	27
6.2	Detektory	28
7	Shrnutí současného stavu.....	29
8	Experiment.....	30
8.1	Provedení experimentu	30
8.2	Vyhodnocení experimentu.....	31
8.2.1	Tepelná akumulace.....	32
8.2.2	Drsnost obrobené drážky.....	36
8.2.3	Množství odebraného materiálu	37
8.3	Výsledky experimentu.....	39
8.3.1	Tepelná akumulace.....	39
8.3.2	Drsnost obrobené drážky.....	43
8.3.3	Množství odebraného materiálu	45
8.4	Diskuze dosažených výsledků	55
9	Závěr	58
10	Reference.....	60
11	Přílohy	64

Seznam obrázků

Obrázek 1: Struktura laseru [3]	13
Obrázek 2: Schéma principu čtyřhladinového systému laseru [5]	14
Obrázek 3: Ukázka klasického zdroje světla a laserového záření [1]	14
Obrázek 4: Absorpce laserového paprsku [11]	17
Obrázek 5: Interakce laserového paprsku s materiálem [13]	17
Obrázek 6: Fyzikální a chemické procesy během laserového zpracování [9]	18
Obrázek 7: Interakce laseru s materiálem s nanosekundovými a pikosekundovými pulzy [15]	19
Obrázek 8: Metody laserového mikroobrábění [17]	20
Obrázek 9: Obrázky ze skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) a) mikrostruktura na povrchu hliníkové slitiny pro tepelný postřík, b) hydrofobní struktura na povrchu hliníkové slitiny [18]	20
Obrázek 10: Překryv pulzů [20]	21
Obrázek 11: Strategie šrafování [21]	21
Obrázek 12: Vliv opakovací frekvence na teplotu na povrchu vzorku [27]	22
Obrázek 13: Závislost teploty materiálu na čase s viditelnou změnou kvality povrchu při různých rychlostech skenování [29]	23
Obrázek 14: Závislost drsnosti, opakovací frekvence a odebraného materiálu, měď [33]	24
Obrázek 15: Materiálové přeměny skupenství během zpracování [38]	26
Obrázek 16: Planckův zákon [39]	27
Obrázek 17: Ukázka obrobeného materiálu	31
Obrázek 18: Schéma měřicího systému	32
Obrázek 19: Konfigurace měřicího systému	32
Obrázek 20: Osciloskop Teledyne LeCroy WavePro 404HD [50]	33
Obrázek 21: Základní hladina signálu	33
Obrázek 22: IR signál tepelné akumulace s parametry 2 m/s a 30 μ J	34
Obrázek 23: IR signál tepelné akumulace s parametry 0,2 m/s a 30 μ J	34
Obrázek 24: IR signál tepelné akumulace s parametry 0,1 m/s a 30 μ J	34
Obrázek 25: Kalibrace, a) černé těleso, b) schéma sestavení pro kalibraci, c) reálný obrázek konfigurace	35
Obrázek 26: Kalibrační křivka pro detektor PV-11-1 s průměrem díry 51 μ m ve cloně před černým tělesem	36
Obrázek 27: 3D měřicí laserový mikroskop Olympus LEXT OLS5000 [51]	36
Obrázek 28: Vyznačená linie pro hodnocení drsnosti obrobené drážky	37
Obrázek 29: Ukázka vyhodnocení množství odebraného materiálu, skenovací rychlost 0,1 m/s, energie v pulzu 10 μ J	37
Obrázek 30: Skenovací elektronový mikroskop FEI Quanta 200 SEM [54]	38
Obrázek 31: Snímky obrobených drážek ze skenovacího elektronového mikroskopu	39
Obrázek 32: Závislost tepelné akumulace jako napěťového signálu na skenovací rychlosti ..	40
Obrázek 33: Závislost tepelné akumulace jako hodnoty teploty na skenovací rychlosti	43
Obrázek 34: Závislost drsnosti obrobené drážky na skenovací rychlosti	45
Obrázek 35: Výsledný profil drsnosti povrchu materiálu s parametry 0,2 m/s a 10 μ J	45
Obrázek 36: Ukázka profilu drážky se skenovací rychlostí 0,1 m/s	46

Obrázek 37: Ukázka profilu drážky se skenovací rychlostí 0,2 m/s	47
Obrázek 38: Ukázka profilu drážky se skenovací rychlostí 2 m/s	47
Obrázek 39: Závislost množství odebraného materiálu z plochy 258 x 258 μm^2 na skenovací rychlosti	49
Obrázek 40: Závislost množství odebraného materiálu na pulz na skenovací rychlosti.....	51
Obrázek 41: Závislost efektivity ablace na skenovací rychlosti	52
Obrázek 42: Závislost efektivity odběru materiálu na skenovací rychlosti	54
Obrázek 43: Závislost drsnosti obrobené drážky na hodnotě teploty tepelné akumulace.....	55
Obrázek 44: Závislost efektivity ablace na hodnotě teploty tepelné akumulace	57
Obrázek 45: Závislost efektivity odběru materiálu na hodnotě teploty tepelné akumulace	57

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti laserového systému	30
Tabulka 2: Parametry experimentu	31
Tabulka 3: Výsledné hodnoty signálu tepelné akumulace U_{TA} [mV]	40
Tabulka 4: Výsledné hodnoty teploty tepelné akumulace t_{TA} [°C]	42
Tabulka 5: Výsledné hodnoty drsnosti obrobené drážky Ra [μm].....	44
Tabulka 6: Výsledné hodnoty množství odebraného materiálu V [μm^3] naměřené z plochy 258 x 258 μm^2	48
Tabulka 7: Vzdálenost středů mezi laserovými stopami (μm).....	49
Tabulka 8: Počet pulzů p na vzdálenosti 258 μm	50
Tabulka 9: Výsledné hodnoty množství odebraného materiálu na pulz V_{pulz} [$\mu\text{m}^3/\text{pulz}$].....	50
Tabulka 10: Výsledné hodnoty efektivity ablace V_{ef} [$\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$].....	52
Tabulka 11: Výsledné hodnoty efektivity odběru materiálu V_{eft} [mm^3/min]	54

Seznam zkratk, symbolů a jednotek

UV	Ultraviolet	Ultrafialové
IR	Infrared	Infračervené
MRR	Material removal rate	Rychlost odbírání materiálu
NTC	New technologies – Research centre	Nové technologie – výzkumné centrum
SEM	Scanning electron microscope	Skenovací elektronový mikroskop
M^2	Kvalita laserového paprsku	[-]
R_{overlap}	Překryv pulzů	[μm]
D	Průměr laserové stopy	[μm]
x	Vzdálenost mezi dvěma po sobě jdoucími pulzy	[μm]

v	Skenovací rychlost	[m/s]
f	Opakovací frekvence pulzů	[Hz]
ℓ	Délka zpracované čáry	[mm]
d_ℓ	Vzdálenost mezi čarami	[mm]
H_λ	Spektrální hustota intenzity vyzařování	[-]
h	Planckova konstanta	[Js]
k	Boltzmannova konstanta	[J/K]
c	Rychlost světla	[m/s]
λ	Vlnová délka	[μm]
T	Absolutní teplota	[K]
λ_{max}	Vlnová délka maximální intenzity záření	[μm]
EFL	Efektivní ohnisková vzdálenost	[mm]
U_{TA}	Signál tepelné akumulace	[mV]
t_{TA}	Teplota tepelné akumulace	[$^\circ\text{C}$]
R_a	Aritmetický průměr absolutních hodnot skutečného profilu	[μm]
V	Množství odebraného materiálu	[μm^3]
V_{pulz}	Množství odebraného materiálu na pulz	[$\mu\text{m}^3/\text{pulz}$]
V_{ef}	Efektivita ablace	[$\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$]
V_{eft}	Efektivita odběru materiálu	[mm^3/min]
p	Počet pulzů	[-]
Q	Energie v pulzu	[μJ]
P	Výkon	[W]

1 Úvod

Laserové technologie jsou velice používanými nekonvenčními metodami při obrábění různých materiálů, a to i těžko obrobitelných (diamant, kevlar, karbon, keramika, sklo, křemík, aj). V určitých případech mohou nahradit metody konvenčního obrábění, jako je frézování, vrtání, řezání a další. V dnešní době jsou požadavky na obrábění velice přísné a musí splňovat určenou kvalitu a rychlost procesu, které si klade zákazník. Vysokou důležitost má faktor ekologie. Mezi laserové technologie patří 3D tisk, čištění, značení, kalení, navařování, řezání, svařování, vrtání a také laserové mikroobrábění, kterým se tato diplomová práce zabývá.

Laserové mikroobrábění je moderní technologií, která se využívá v průmyslu a stále se rychle vyvíjí. Je to velice užitečná technologie, která je rozšířena mezi všechna odvětví v průmyslu. Od technických oborů, optického průmyslu, letectví, šperkařství až po medicínu. Mezi laserové mikroobrábění lze zařadit strukturování, úběr materiálu a mikrovrátání.

Předpokládá se, že zvýšená teplota při procesu ovlivňuje laserové mikroobrábění z pohledu drsnosti a efektivity obrábění. Vhodná teplota při laserovém mikroobrábění může vést ke zvýšení efektivity obrábění. Cílem této práce je zjistit souvislost mezi efektivitou obrábění, drsností obrobené drážky a tepelnou akumulací.

Diplomová práce je rozdělena na dvě části. První teoretická část je zaměřena na popis současného stavu problematiky. Druhá část se zabývá experimentálním výzkumem pulzního laserového mikroobrábění. V první části jsou popsány základy laserové technologie, interakce laserového paprsku s materiálem, laserové mikroobrábění a aktuální poznatky týkající se tepelné akumulace při laserovém mikroobrábění. V praktické části diplomové práce jsou popsány experiment s pulzním pikosekundovým laserem, přístroje použité k určení zkoumaných vlastností a principy vyhodnocení jednotlivých zkoumaných vlastností (tepelná akumulace, drsnost obrobené drážky a množství odebraného materiálu). K detekci tepelné akumulace byl použit vyvinutý citlivý měřicí systém, který využívá infračervené záření. Nakonec jsou shrnuty výsledky experimentu: naměřené hodnoty tepelné akumulace, drsnosti, odebraného materiálu, efektivity laserového mikroobrábění a jejich korelace.

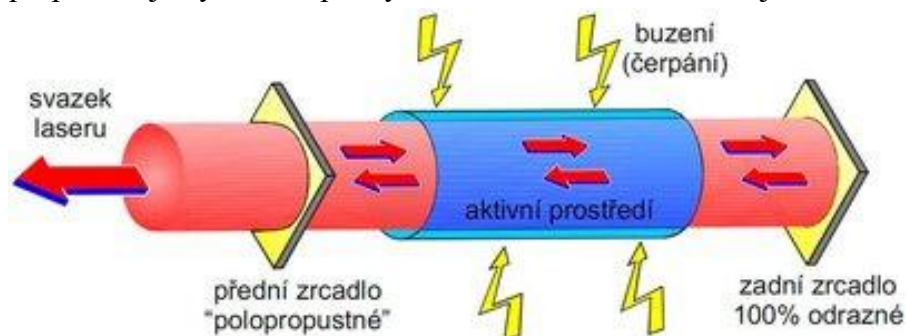
2 Laser

Historie laseru se datuje od roku 1916, kdy Albert Einstein vyslovil teorii o světelné emisi (stimulovaná emise). Předchůdcem dnešních laserů byl tzv. MASER. V roce 1951 ho vytvořil Ch. H. Townes. Bylo to zařízení, které fungovalo na principu zesilování radiovln. Vynálezce prvního funkčního laseru byl T. H. Maiman. Laser byl představen v roce 1960 na konferenci v Manhattanu. Slovo LASER je zkratka z anglických slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. V překladu to znamená: zesílení světla pomocí vynucené emise záření [1].

Pro vznik laserového záření je potřeba splnit určité podmínky – absorpce, stimulovaná emise a populační inverze. V kovech je světlo absorbováno pomocí přechodů elektronů z nižších na vyšší energetické stavy ve vodivostním pásu [2].

2.1 Struktura laseru

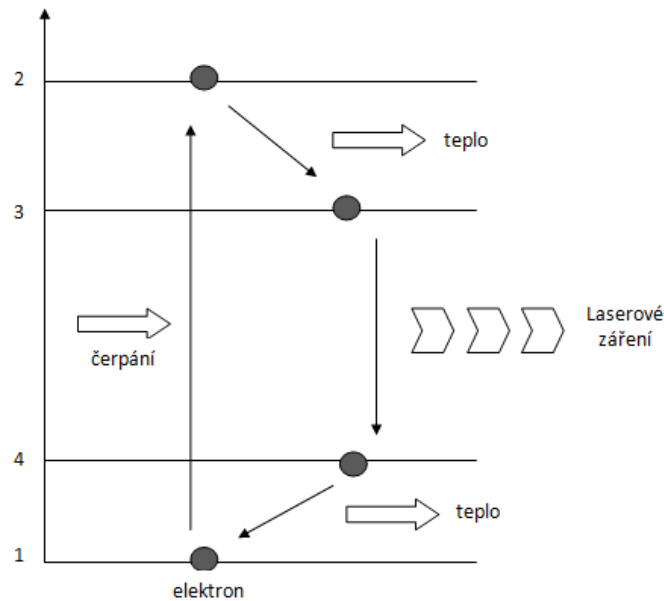
Základem laseru je aktivní prostředí, které je buzeno (elektricky, opticky nebo dalšími způsoby). Tím je do laseru dodána energie, která je pomocí stimulované (vynucené) emise vyzářena v podobě laserového svazku. Pomocí dvou zrcadel, přičemž jedno je 100% odrazné a druhé polopropustné, je vytvořen optický rezonátor. Obrázek 1 ukazuje schéma laseru [3].



Obrázek 1: Struktura laseru [3]

Stimulovaná emise pracuje na následujícím principu. Elektrony jednotlivých atomů aktivního média jsou dodanou energií stimulovány k přechodu do vyšší energetické vrstvy. Pokud foton se správnou energií dopadne na excitovaný atom, potom elektron spadne na nižší energetickou úroveň a emituje druhý foton, který je naprosto totožný s prvním. V laseru jsou excitované atomy umístěny mezi dvě zrcadla. První foton stimuluje atom, který emituje druhý foton, a tak dále díky zrcadlům. Výsledné fotony jsou všechny identické. Mají stejnou energii, která jim dává stejnou barvu a stejný směr [3].

Toto vše se nejnázve vytváří ve čtyřhladinovém laserovém systému. Na tomto principu fungují lasery typu Nd:YAG. Princip pro čtyřhladinový systém je znázorněn na obrázku (Obrázek 2). Ze základního stavu (1) dochází k excitaci elektronů do excitovaného stavu (2). Následně probíhá relaxace (2) -> (3), velmi rychlý přechod, kde se uvolňuje teplo. Laserové záření vzniká při přechodu z (3) na (4). Poté dochází k relaxaci do základního stavu (1) [4].



Obrázek 2: Schéma principu čtyřhladinového systému laseru [5]

Snahou je vytvořit nerovnovážený stav, kde bude více atomů na vyšších energetických hladinách než na hladinách nižších – populační inverze [3].

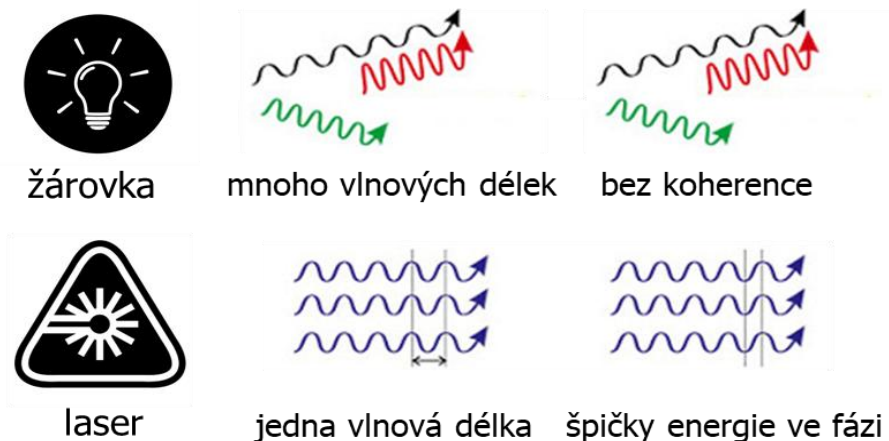
2.2 Vlastnosti laseru

Laserový paprsek je výjimečný díky svým vlastnostem. Laserové světlo je velmi monochromatické a koherentní a málo divergentní. Tyto vlastnosti jsou důvodem, proč může být laserový paprsek používán v tak široké škále aplikací. Obrázek 3 ukazuje rozdíl mezi laserovým zářením a zářením ze žárovky [5].

Monochromatické - všechny fotony mají stejnou vlnovou délku

Malá divergence – fotony mají stejný směr a pohybují se téměř paralelně, stejným směrem, nízká rozbíhavost

Koherentní - všechny fotony jsou spolu ve fázi nebo mají stejný fázový posun



Obrázek 3: Ukázka klasického zdroje světla a laserového záření [1]

2.3 Kvalita laserového paprsku

Kvalita laserového paprsku velmi ovlivňuje kvalitu dané aplikace. Tato veličina se označuje M^2 a je bezrozměrná. Udává rozbíhavost paprsku a může i určovat rozprostření energie v laserové stopě. Ovlivňuje možnost zaostření paprsku do stopy určitého průměru při použití dané zaostřovací optiky. Hodnota M^2 je větší nebo se rovná 1. Díky malé rozbíhavosti schopné zaostřovat paprsek do velmi malých oblastí s velkou hustotou energie je možné se přiblížit k 1 [6].

2.4 Druhy laserů

V dnešní době existuje mnoho typů laserů a také mnoho možností, jak je dělit. Tato kapitola je zaměřena na obecné rozdělení laserů. Podrobněji se bude zabírat pulzními lasery. Lasery můžeme rozdělit podle několika kritérií: [7]

- *Podle aktivního prostředí*
 - Plynové lasery (CO₂, excimerní lasery KrF)
 - Pevnolátkové lasery (tyčové Nd:YAG, diskové Yb:YAG, vláknové)
 - Kapalinové (fluorescein, rhoadmin)
 - Polovodičové (GaAs, InAsSb)

- *Podle vlnových délek optického záření*
 - Ultrafialové (10 – 360 nm)
 - Viditelné pásmo (360 – 780 nm)
 - Infračervené (780 nm – 1 mm)

- *Podle typu buzení*
 - Opticky
 - Elektrickým výbojem
 - Elektronovým svazkem
 - Chemicky
 - Tepelnými změnami

- *Podle časového provozu*
 - Kontinuální lasery (ms)
 - Pulzní lasery (μs, ns, ps, fs)

Pulzní lasery se využívají pro laserové mikroobrábění. Generují pulzy s vysokou opakovací frekvencí a mohou mít různou dobu trvání pulzu. Patří sem lasery s krátkými pulzy v řádech mikrosekund, nanosekund a s velmi krátkými pulzy v řádech pikosekund, femtosekund.

Nanosekundové lasery

Lasery s optickými impulsy s délkou trvání pulzu v nanosekundovém režimu jsou používány pro mnoho aplikací. Pomocí nanosekundových laserů je materiál rychle obroběn, ale může vznikat tepelně ovlivněná oblast, tepelná akumulace a velké ovlivnění materiálu při zpracování. Výhodou je velká flexibilita elektronického nastavení rychlosti opakování pulzů, délky trvání pulzu a nižší náklady na zařízení. Tyto lasery většinou využívají techniku Q – spínání, která slouží k produkci velmi vysokého výstupního impulsu. Rychlost opakování pulzů se může pohybovat v rozmezí 1 – 100 kHz [8].

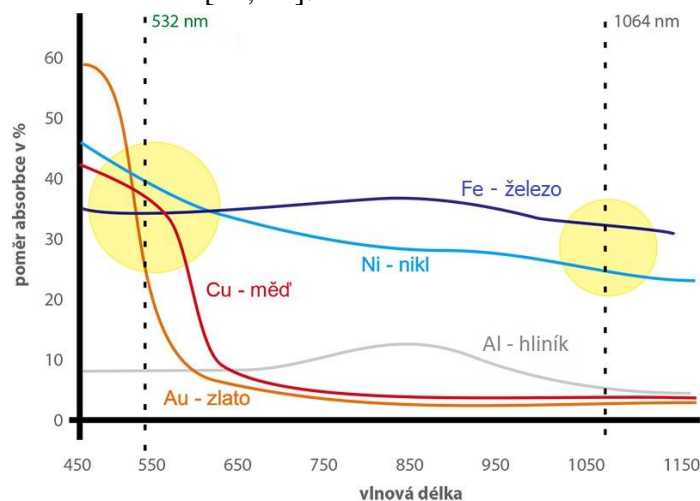
Pikosekundové a femtosekundové lasery

Tyto lasery pracují v pikosekundových a femtosekundových režimech. Výhodou těchto laserů je, že materiál obrábí velmi jemně a kvalitně. Během procesu zpracování téměř nevzniká tepelně ovlivněná oblast. Femtosekundové lasery používají režim zamykání „mode locking“ [9].

3 Interakce laseru s materiálem

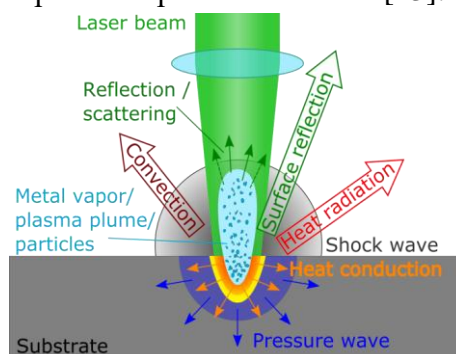
Porozumění interakci laserového paprsku s materiálem je velmi důležité, protože je to složitý fyzikálně-chemický proces. Když laserový paprsek zasáhne povrch materiálu, přednostně reaguje s valenčními a vodivostními elektrony. K tepelné difuzi absorbované energie do materiálu dochází prostřednictvím vazebných efektů elektron-mřížka [10].

Interakce laserového paprsku s materiálem závisí na absorpci laserového paprsku v materiálu. Absorpci určuje: druh materiálu, stav jeho povrchu, teplota a vlnová délka laseru. Obrázek 4 znázorňuje, jak různé materiály absorbují laserový paprsek o různých vlnových délkách. Obecně kovy absorbují velmi silně ultrafialové (UV) záření, v infračerveném (IR) je to méně. Materiál musí absorbovat energii dodanou ve formě elektrických výbojů nebo světla, aby mohlo dále dojít k ablaci materiálu. Absorpci lze zvětšit zvýšením teploty materiálu, anebo úpravou povrchu materiálu. Výhodná je malá tepelná vodivost materiálu, protože v místě interakce laserového paprsku s materiálem je dosažena vysoká teplota. Divergence laserového paprsku významně rozhoduje o velikosti odevzdané energie laseru do materiálu. Při ztotožnění ohniska laserového paprsku s povrchem materiálu dojde k největšímu energetickému ovlivnění materiálu [11, 12].



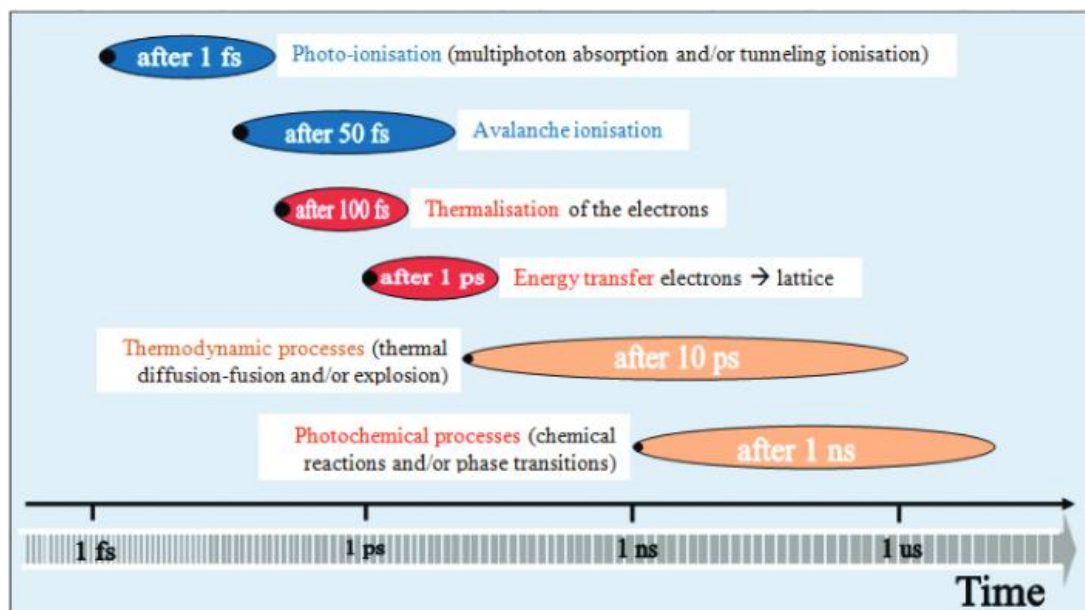
Obrázek 4: Absorpce laserového paprsku [11]

Během dopadu laserového paprsku na materiál se část záření pohltí materiálem a využije se na ablaci, část záření se odrazí a část se převede na teplo. Obrázek 5 znázorňuje, co se děje s laserovým paprskem, když dopadne na povrch materiálu [13].



Obrázek 5: Interakce laserového paprsku s materiálem [13]

Když se materiál zpracovává, dějí se uvnitř materiálu tepelné a fotochemické procesy. Mezi tepelné děje lze zařadit ablaci, tavení materiálu, šíření tepla materiálem, vypařování materiálu a vznik plazmatu. Během těchto procesů se zvyšuje teplota ve vzorku. Pro tepelné procesy je důležité, aby čas relaxace byl kratší než délka trvání pulzu. U fotochemických dějů se teplota vzorku nezvyšuje, ale čas relaxace by měl být delší než délka trvání pulzu pro průběh daných procesů. Obrázek 6 znázorňuje, v jakých časech dochází k určitým procesům během laserového zpracování materiálu. Například po 1 nanosekundě dochází k fotochemickým procesům, mezi které řadíme chemickou reakci nebo fázovou přeměnu. V řádech pikosekund dochází k přenosu energie mezi elektrony a mřížkou a k tepelné difúzi [9].



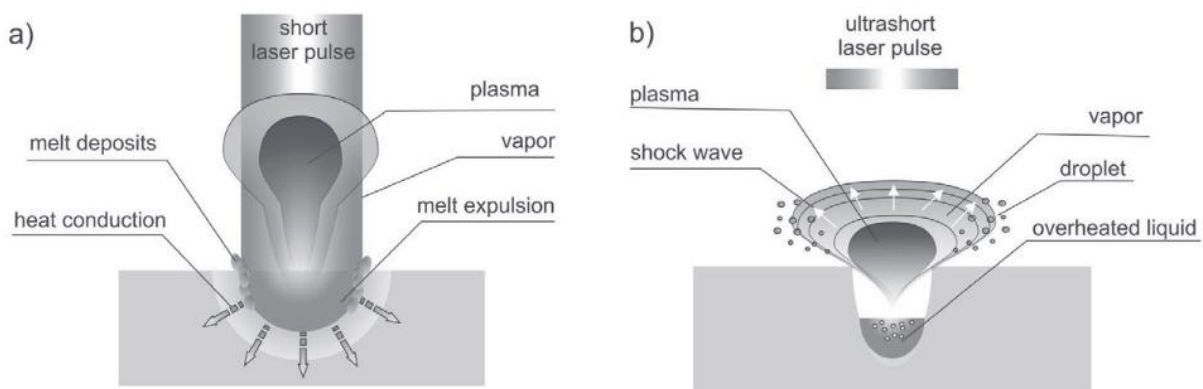
Obrázek 6: Fyzikální a chemické procesy během laserového zpracování [9]

Laserová ablace je proces odstraňování (odpařování) materiálu pomocí laserového paprsku. Z důvodu rozdílných procesů během ablace materiálu při krátkých a velmi krátkých pulzech je potřeba tento proces více rozepsat. Ablace materiálu začíná vždy absorpcí fotonů, jak už bylo uvedeno dříve [14].

Pokud na kovový vzorek dopadají krátké pulzy v řádech nanosekund, po absorpci fotonů následuje zahřívání a fotoionizace oblasti, kam směřuje laserový paprsek. Poté se ablatovaný materiál uvolní z cílového povrchu jako pevné částice, páry, kapky kapaliny nebo jako expandující plazmatický oblak. Množství ablatovaného materiálu závisí na absorbované energii materiálu. Při zpracování se v materiálu generuje poměrně významná tepelně ovlivněná oblast, protože délka trvání pulzu je delší než doba difúze tepla. Energie laserového pulzu je šířena v materiálu pomocí vedení tepla do oblasti mimo velikost laserové stopy. Ozařovaný terč se bude vařit a vypařovat. Vaření a odpařování materiálu vede k vytvoření nekontrolovatelné vrstvy taveniny. V případě dlouhotrvajícího zahřívání materiálu může dojít k nepřesnému obrábění nebo značení [10].

Velmi krátké pulzy (řády pikosekund a femtosekund) interagují pouze s elektrony a ne s krystalickou mřížkou obráběného materiálu, protože délka trvání pulzu je podstatně

kratší než čas potřebný pro přenos energie mezi volnými elektrony materiálu a mřížkou. Díky krátké iterační době se materiál nemůže odpařovat kontinuálně, ale je převeden do stavu přehřáté kapaliny. Sloučí se ve vysokotlakou směs složenou z kapiček kapaliny a rychle expandující páry. Tento proces je nazýván fázovým výbuchem. Vznikají extrémní tlaky, hustoty a teploty, které urychlují ionizovaný materiál na obrovské rychlosti a dochází k nelineárním procesům. Vedení tepla v materiálu je tímto způsobem omezeno. Důsledkem toho je, že materiál bude ablatován v prostorově definované oblasti s minimalizovaným mechanickým a tepelným poškozením ablační oblasti na terči. Dochází ke studené ablacii materiálu a neprobíhají téměř žádné změny povrchových vlastností materiálu. Obrázek 7 ukazuje rozdíl mezi interakcí materiálu s nanosekundovými pulzy (a) a s pikosekundovými pulzy (b) [10].



Obrázek 7: Interakce laseru s materiálem s nanosekundovými a pikosekundovými pulzy [15]

Efektivitu obráběcího procesu lze vyhodnotit pomocí množství odebraného materiálu podle 2 modelů: [9, 12, 13]

- Model založený na klasické interakci paprsek-materiál. Ablací rychlost je odhadována z energie za předpokladu, že všechna energie z laserového pulzu vede k odpaření materiálu. Energie laserového pulzu zahřeje materiál na teplotu odpařování a jsou překonány teplota tavení, odpařování a latentní teplo. Materiál je ve stavu páry odpařen. Model předpokládá 100% absorpci energie a zanedbává účinky vedení tepla.
- Model založený na neklasické interakci paprsku s materiálem. Základem je model dvou teplot (teplota elektronů a mřížky), který lze využít pro pikosekundové a femtosekundové systémy.

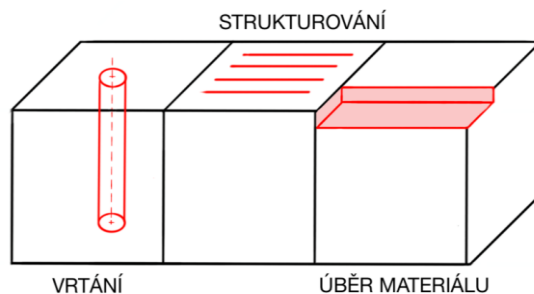
Pro vyšší přesnost se při laserovém mikroobrábění používají lasery s velmi krátkými pulzy, protože poskytují lepší výsledky vhodné pro výrobu vysoce přesných mikrostruktur a nanostruktur. Typické trvání laserového pulzu pro přesné zpracování materiálu je 10 ps a méně.

4 Laserové mikroobrábění

Laserové mikroobrábění je nekonvenční metoda obrábění, která pracuje na bezkontaktním principu. Úběr materiálu je zajištěn pomocí tepelného účinku vysoce fokusovaným paprskem. Absorbované paprsky lokálně ohřejí materiál, nataví jej a poté se materiál začne odpařovat a v místě dopadu paprsku se vytváří otvor. Nevzniká velké tepelné ovlivnění materiálu. Laserové mikroobrábění se používá ve strojírenství, v oblasti mikroelektroniky, ale i v lékařství, kde už běžný způsob výroby (např. frézování nebo jiné klasické metody) nestačí z důvodu tvarové složitosti nebo nemožnosti výroby jiným způsobem.

Velkými výhodami mikroobrábění jsou velmi krátké pulzy, minimální tepelně ovlivněná oblast, přesnost, řízené odebrání objemu materiálu. Nemusí se zde řešit problémy s opotřebením nástrojů, vzniku otřepů [17].

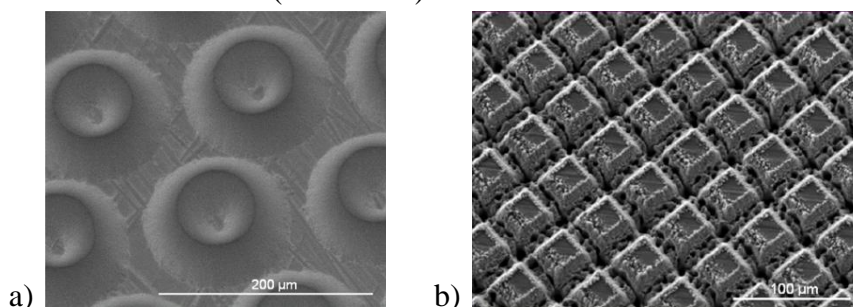
Mezi metody laserového obrábění lze zařadit povrchové strukturování, mikrovrtání a úběr materiálu (Obrázek 8).



Obrázek 8: Metody laserového mikroobrábění [17]

Pomocí strukturování je na povrchu vytvářena libovolná geometrie. Hloubka struktury se pohybuje v rozmezí několika jednotek až desítek mikrometrů. Používá se na tvorbu hydrofobních a hydrofilních struktur, na struktury pro různé nástřiky, pro solární panely, články a pro zlepšení kluzných (tribologických) vlastností (schopnost udržet mazivo).

Pro laserové mikroobrábění se používají nanosekundové, pikosekundové a femtosekundové lasery, které využívají pulzní režim s vysokým špičkovým výkonem. Díky tomu vytvářejí tak vysokou hustotu energie, že se materiál převážně odpařuje. Po zpracování materiálu se drsnost povrchu pohybuje kolem $Ra = 0,5 \mu\text{m}$ [17]. Na obrázku jsou zobrazeny příklady laserového strukturování (Obrázek 9).



Obrázek 9: Obrázky ze skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) a) mikrostruktura na povrchu hliníkové slitiny pro tepelný postřik, b) hydrofobní struktura na povrchu hliníkové slitiny [18]

Strategie mikroobrábění

Pro laserové mikroobrábění můžeme použít různé strategie obrábění. Základním a nejdůležitějším principem, kterému je třeba porozumět, je překryv pulzů v linii. Překryv pulzů je závislý na rychlosti skenování a frekvenci pulzů (Obrázek 10). Zvyšující se frekvencí se překrývání stop zvyšuje [19]. Překryv pulzů $R_{overlap}$, anglicky overlap, lze vypočítat ze vztahu (1): [20]

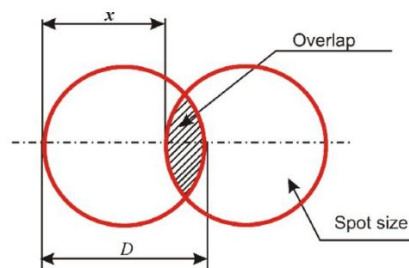
$$R_{overlap} = \frac{D - x}{D} \cdot 100\%; \quad x = \frac{v}{f} \quad (1)$$

D – průměr laserové stopy [μm]

x – vzdálenost mezi dvěma po sobě jdoucími pulzy [μm]

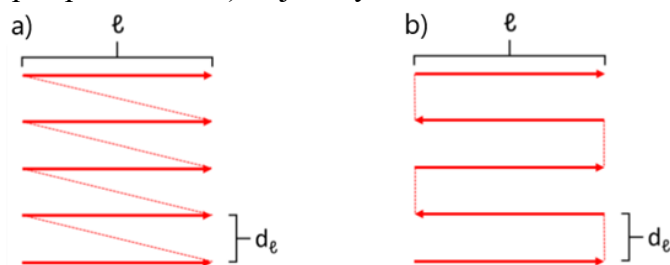
v – skenovací rychlost [m/s]

f – opakovací frekvence [Hz]



Obrázek 10: Překryv pulzů [20]

Také je možné obrábět materiál pomocí vyplňování po křivkách (path filling). Objekty můžeme také tzv. šrafovat (hatch). Existuje mnoho způsobů, jak šrafovat. Například jedním směrem, obousměrně nebo změnou úhlu šrafování. Obrázek 11a schématicky ilustruje skenovací strategie po řádkách. Plná čára symbolizuje pohyb laserového paprsku během zpracování materiálu, čárkovaná čára znázorňuje přemístění paprsku (když je laser vypnutý). ℓ je délka zpracované čáry a d_ℓ je vzdálenost mezi čarami. Proces začíná na levé straně od spodu nahoru. Další skenovací strategií je, že laserový paprsek se pohybuje „cik-cak“, (Obrázek 11b) [21]. Existují i další strategie (úhlové šrafování, vyplňování po Lissajous křivkách, vyplňování po spirále a další). Jejich využití závisí na složitosti obráběné plochy.



Obrázek 11: Strategie šrafování [21]

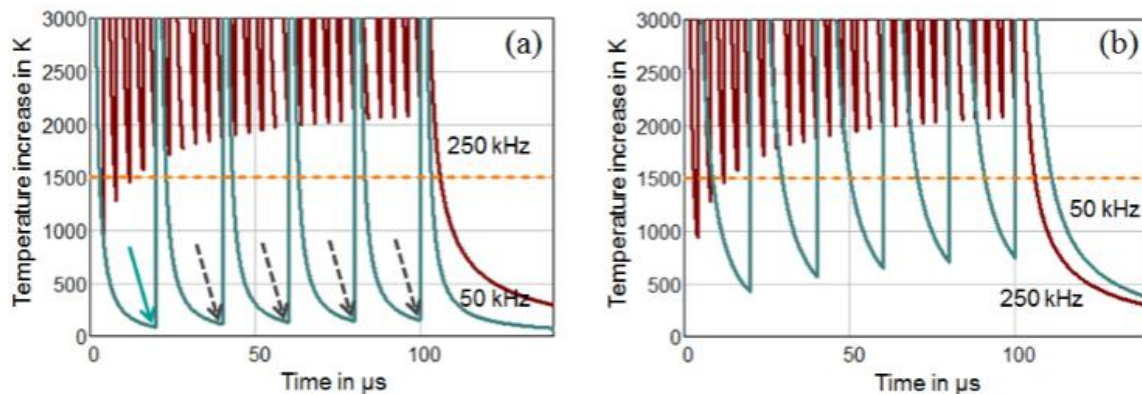
Sky writing umožňuje udržet během celého procesu stejnou vzdálenost mezi pulzy. Překrýváním linií je také možné obrábět materiál.

Pro nejúčinnější obrábění s dobrou kvalitou povrchu a nízkou drsností se používá vzdálenost mezi dvěma pulzy přibližně polovina poloměru stopy. Překrývání pulzů se doporučuje okolo 75 % [22].

5 Tepelná akumulace při laserovém mikroobrábění

Při obrábění materiálu laserovými pulzy dochází k absorpci dodané energie materiálem. V materiálu se ukládá zbytkové teplo. Zbytkové teplo se postupně hromadí od pulzu k pulzu a nepřetržitě zvyšuje teplotu materiálu, dokud nemá možnost vychladnout. Tento proces se nazývá tepelná akumulace. Nárůst teploty však velmi závisí na časovém intervalu mezi po sobě jdoucími laserovými pulzy, který je určen opakovací frekvencí. Čím vyšší je opakovací frekvence, tím menší je doba pro ochlazení povrchu vzorku a tím další laserový pulz interaguje s teplejším povrchem. Zvýšení povrchové teploty může navíc snížit povrchovou odrazivost a tím zvýšit absorpci. Naproti tomu stínění částic může výrazně snížit pulzní energii dopadající na povrch, protože může být absorbována částicemi a kapičkami emitovanými z povrchu předchozím pulzem [22]. V těchto případech je dobré znát počet pulzů, po kterých je potřeba zařadit pauzu, protože je překročena kritická teplota. Podle vzorce lze vypočítat pauzy mezi pulzy na ochlazení vzorku [17, 18]. Tepelná akumulace se objevuje během laserového strukturování, mikrovrtání a v dalších aplikacích [18, 25].

Obrázek 12 uvádí závislost mezi časem, teplotou a frekvencí v průběhu zpracování CrNi oceli a) dvě různé opakovací frekvence a stejná energie zdroje tepla 5 uJ na jeden impuls, b) stejný průměrný výkon 1,25 kW s pulzní energií 25 uJ při 50 kHz a 5 uJ při 250 kHz. Akumulaci tepla a zvýšení povrchové teploty lze teoreticky ověřit pomocí simulace uvedené v [26]. V [23] jsou schematicky znázorněny oblasti ovlivněné teplem s použitím různých opakovacích frekvencí.

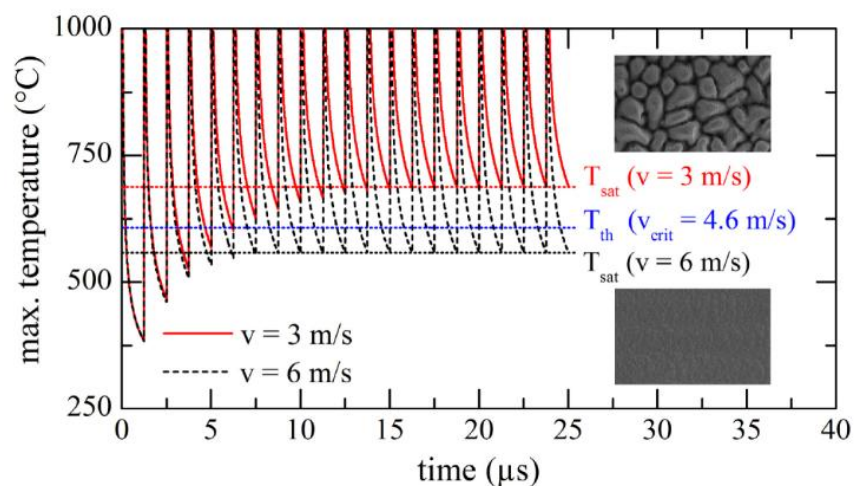


Obrázek 12: Vliv opakovací frekvence na teplotu na povrchu vzorku [27]

Porozumět akumulaci tepla a řídit ji je hlavní výzvou materiálového zpracování s vysokým průměrným výkonem a opakovací frekvencí pulzních laserů. Akumulace tepla závisí na materiálových vlastnostech (tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, absorpce záření), procesních parametrech (energie v pulzu, délka trvání pulzu, hustota výkonu, intenzita, frekvence laseru, rozložení intenzity) a na samotném procesu (energetická vazba, ablace, plazma) [10]. Hodnocení akumulace tepla může být provedeno mnoha způsoby. V článku [27] je akumulace tepla hodnocena jako zbytkové teplo v materiálu a je uvažováno, že většina absorbované energie je použita pro ablaci materiálu. Dále je možné spočítat množství ablatovaného materiálu. Ve [28] se počítá rychlost odstraňování materiálu MRR

(material removal rate). A v [10] je ablace materiálu kvantifikována hloubkou dutiny, která byla vytvořena jedním skenem na povrchu vzorku.

Rozeznávají se dva vlivy akumulace tepla, lišící se v kvalitě obrobení materiálu. Pozitivní vliv – režim vysoké kvality, který způsobí hladký a odrazivý povrch obrobeného materiálu. Vyšší povrchovou teplotou dojde k tomu, že je potřeba méně energie k odpařování materiálu, a proto se zvyšuje účinnost odstraňování materiálu. A negativní vliv – režim nízké kvality, při kterém se dosahuje nižší odrazivosti, materiál je zoxidován a pokryt malými hrboly, které zvyšují drsnost povrchu materiálu. Změny povrchu materiálu znázorňuje Obrázek 13. Když následující pulz dopadne na úplně roztavený povrch obráběného materiálu, je potřeba přibližně 10% energie pro odpaření materiálu. Z tohoto hlediska je akumulace tepla poněkud nežádoucím účinkem, protože by mohla ovlivnit kvalitu obrábění v důsledku nežádoucích účinků tání. Přechod z hrbolatého povrchu na hladký je možno dosáhnout zvýšením skenovací rychlosti vkrít. Jedná se o minimální rychlost skenování, při které dosáhneme velice kvalitního povrchu. Při různých skenovacích rychlostech vznikají odlišné povrchové struktury (vlnky, mikrodrážky, hroty). Kritická skenovací rychlost se zvyšuje s teplotou vzorku a pro vyšší hustoty energie laseru. Pro ocel ČSN 10088-1 1.4301 (X5CrNi 18-10) je určena kritická teplotní hranice pro změnu kvality ablace 607 °C. Tato hodnota je zjištěna experimentálně. Nad touto hodnotou vzniká hrbolatý povrch [21, 29, 30].



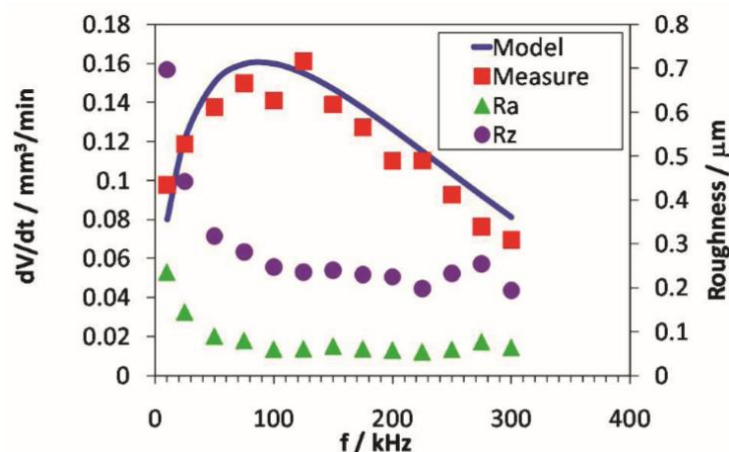
Obrázek 13: Závislost teploty materiálu na čase s viditelnou změnou kvality povrchu při různých rychlostech skenování [29]

Následkem akumulace tepla může být tvorba strukturálních defektů na povrchu materiálu [19]. Defekty ovlivňují hlavní parametr laserového zpracování – ablační práh. Ablací práh je důležitým parametrem, který definuje minimální požadavky na energetické požadavky laseru. Ablací práh závisí na druhu materiálu a na počtu pulzů, které ovlivňují stejnou oblast. Mnohonásobné ozařování laserem s vysokou opakovací frekvencí významně sníží práh ablace a vede ke zvýšení ablační rychlosti. Průměrná objemová ablační rychlost je nelineární funkcí pulzní energie. Pro zvýšení efektivity laserového zpracování je možné snížit práh ablace a tím dosáhnout snazšího odstranění materiálu s nižší energií v pulzu a odstranění více materiálu pomocí jednoho pulzu se stejnou hustotou výkonu. Aby účinnost zpracování materiálu nanosekundovým laserem byla co nejvyšší, je potřeba zvýšit opakovací frekvenci držící pulzní energii pod prahovou hodnotou pro tvorbu plazmatu. Zpracování materiálu

pikosekundovým laserem je omezeno stíněním plazmatu, které vzniká na povrchu vzorku v průběhu ozařování. Přímé zvýšení pulzní energie může být neefektivní způsob, jak dosáhnout vyšší ablační rychlosti. Rozdělením paprsku na vícero paprsků je možné vyhnout se akumulaci tepla při laserovém zpracování s vysokou pulzní energií [19]. Obecně je lepší použít jednotlivé pulzy pro ablaci při dvojnásobné opakovací frekvenci, což má rovněž za následek dvojnásobnou rychlost skenování [31].

Vlivem akumulace tepla je pozorován nárůst hloubky ablace při frekvenci 1 MHz. Hloubka ablace se zvětšuje zmenšující se vzdáleností pulzů. Čím rychleji dojde k vytlačení materiálu, tím se také odvede pryč více energie. Kratší vzdálenosti mezi pulzy způsobené vyšší opakovací frekvencí s kombinací vyšší dodané energie v pulzu zvyšují celkově průměrnou teplotu ablačního místa (povrch obráběného materiálu). To snižuje práh ablace a zvýhodňuje absorpci, čímž lze dosáhnout celkově vyšších ablačních rychlostí [10]. Při experimentech s nerezovou ocelí byla dosažena nejvyšší detekovaná účinnost odstraňování $1,67 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ při hustotě energie $0,69 \text{ J/cm}^2$ [32].

Drsnost povrchu materiálu je závislá na několika parametrech. Patří mezi ně hloubka drážky, hustota energie, počet opakování, délka pulzu a další. Tímto tématem se zabýval článek [33]. Experimenty spočívaly v obrobení drážky s různou délkou pulzu a frekvencí opakování. Byla také zjišťována hloubka drážky a následně byla hodnocena její drsnost (Obrázek 14).



Obrázek 14: Závislost drsnosti, opakovací frekvence a odebraného materiálu, měď [33]

V závislosti na typu materiálu se mohou při různých teplotách objevit různá žíhání (zbarvení) materiálu, což vede k výrazným spektrálním změnám odrazivosti i při mírných povrchových teplotách několika $100 \text{ }^\circ\text{C}$ [22].

Pro zefektivnění zpracování se zvyšují výkony laserů, ale to vede k nežádoucím účinkům jako je stínění částicemi, saturace a poškození materiálu vlivem akumulace tepla. Proto se začalo zkoumat ablační chlazení. Aplikují se ultra rychlé posloupnosti laserových pulzů, aby se materiál odstranil před tím, než zbytkové teplo uložené z předešlých pulzů difunduje z oblasti zpracování. Extrémně vysoké opakovací frekvence (GHz), které umožňují ablační chlazení, snižují energii laserového pulzu potřebnou k ablaci a zvyšují efektivitu procesu. Protože ablatovaný materiál je fyzicky odstraněn, tepelná energie obsažena v ablatovaném

množství materiálu je také odstraněna. Tím se snižuje průměrná teplota zbývajících materiálu. U laserové ablace toto neprobíhá nepřetržitě. Během dopadajícího laserového pulzu a velmi krátce po něm. Aby docházelo k ablačnímu chlazení, musí být časové zpoždění mezi pulzy zkráceno tak, aby část materiálu, která má být odstraněna, nevychladla [14]. Pomocí nízkého překrývání pulzů, které bylo možné díky ultra rychlým skenovacím rychlostem, lze laserové systémy s vysokým průměrným výkonem velmi efektivně použít při obrábění a zároveň zamezit tepelné akumulaci [32].

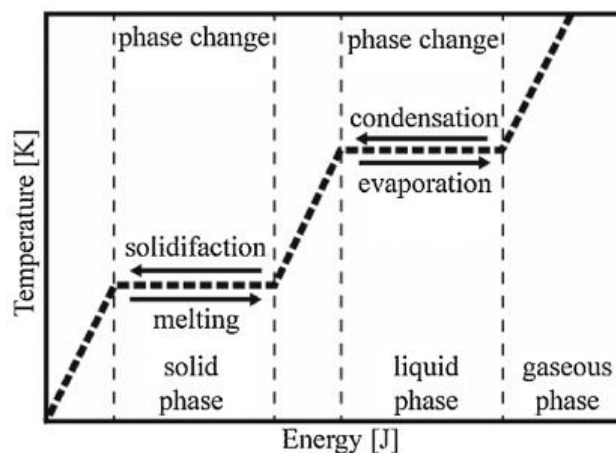
6 Měření v laserových technologiích

Měření v laserových technologiích je velice složitá problematika. Znalost teplot na povrchu materiálu během laserového ozařování je důležitá pro pochopení procesů během laserového zpracování materiálu. Pro měření teplot během pulzního laserového zahřívání povrchu materiálu se používají různé experimentální metody založené na různých fyzikálních principech. Často se používají postupy, které kombinují několik metod pro porovnání a ověření výsledků [34]. Metody můžeme rozdělit na kontaktní a bezkontaktní. Mezi kontaktní metody lze zařadit například měření elektrické vodivosti. Mezi bezkontaktní metody měření patří: [35]

- Časově rozlišená pyrometrie
- Časově rozlišené měření odrazivosti
- Časově rozlišené měření teploty plazmatu
- RTG difrakce
- Spektrální pyrometrie
- CCD kamera
- Kombinace mikro RTG difrakce a vysokorychlostní CCD kamery
- Ramanova spektroskopie

Teplotní měřicí systémy se obvykle skládají z IR detektoru a optického systému. Optický systém se může skládat z čoček, z optického vlákna nebo ze systému dvou parabolických zrcadel nebo jiných konkávních zrcadel. K určení teploty povrchu je nezbytné znát optické vlastnosti vyšetřovaného materiálu (emisivita). Pro tato měření je nutná kalibrace odezvy detektoru. Lze použít následující dvě možnosti kalibrace:

- Vzorek je zahříván a napěťový výstup detektoru je měřen. Hodnoty napětí vynesené proti teplotě vzorku dávají kalibrační křivku [36].
- Během chlazení materiálu vzniká plato tuhnutí. Teplota plata je blízko k rovnovážné teplotě tavení [37]. Obrázek 15 znázorňuje fázovou přeměnu materiálu závislou na teplotě a energii.



Obrázek 15: Materiálové přeměny skupenství během zpracování [38]

Metoda založená na infračervené pyrometrii bude využita pro experimentální část této diplomové práce. Pyrometrie pracuje na základě Planckova zákona. Teplotu lze získat pomocí kalibrace na základě IR záření popsaného Planckovým zákonem. Podrobnější informace o měření v pulzních laserových technologiích lze dohledat v [35].

6.1 Planckův zákon

Německý fyzik a jeden ze zakladatelů kvantové teorie Max Planck odvodil Planckův zákon na přelomu 19. a 20. století. Planckův zákon je jedním z nejvýznamnějších zákonů. Udává rozdělení energie ve spektru záření v závislosti na teplotě. Popisuje závislost mezi vlnovou délkou a intenzitou tepelného záření (Obrázek 16).

Ze vztahu (2) lze vypočítat spektrální hustotu intenzity vyzařování H_λ jako množství energie připadající na určitou vlnovou délku [31, 32].

$$H_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1 \right)} \quad (2)$$

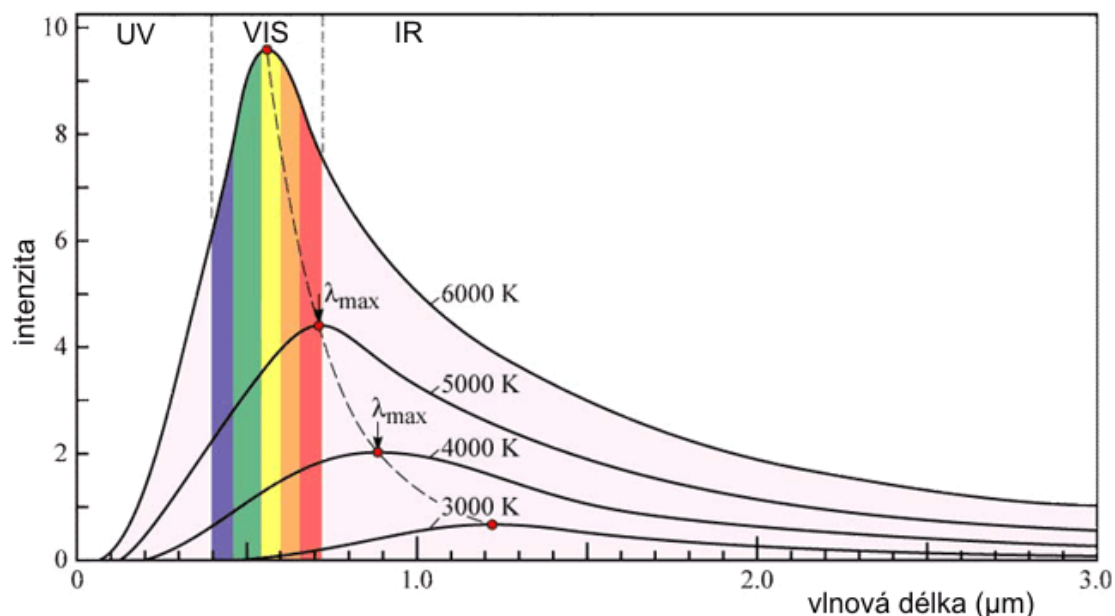
h – Planckova konstanta [$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js]

k – Boltzmannova konstanta [$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K]

c – rychlost světla ve vakuu [$c = 3 \cdot 10^8$ m/s]

λ – vlnová délka [μm]

T – absolutní teplota [K]



Obrázek 16: Planckův zákon [39]

Pro určitou teplotu lze získat vlnovou délku maximální intenzity záření λ_{max} z Wienova zákona [41]. Např. 25 °C odpovídá 9,7 μm, 500 °C odpovídá 3,7 μm a 1000 °C odpovídá 2,3 μm.

6.2 Detektory

Detektory slouží k detekci světla nebo jiného elektromagnetického záření. IR detektory jsou polovodičová elektrooptická zařízení, která přeměňují infračervené záření na elektrický signál. [38, 42, 43] Na trhu je velké množství IR detektorů. Rozlišují se podle citlivosti na vlnovou délku:

- Mercury Cadmium Telluride MCT (HgCdTe) 2 – 12 μm
- Indium Antimonide (InSb) 2 – 6 μm
- Indium Gallium Arsenide (InGaAs) 1 – 1,7 μm
- Silicon (Si) 0,2 – 1,1 μm

Pro experiment v této práci je vhodné použít detektor s citlivostí na vlnovou délku 10 μm , protože 10 μm odpovídá nejvyšší citlivosti při pokojové teplotě. Dále je možné detektory dělit podle rychlosti odezvy detektoru, tzn. rychlost, s jakou probíhá přeměna energie v detektoru a podle dalších charakterizujících vlastností. Čím je detektor menší, tím je schopen snímat vyšší rychlosti. Na druhou stranu, když je snaha detekovat oblast záření v desítkách mikrometrů, je lepší pro nastavení největšího signálu větší plocha detektoru. Citlivost je možné zlepšit přídatnou čočkou přímo na detektoru (imerzní čočka) [44].

7 Shrnutí současného stavu

Tepelná akumulace je známým jevem a současně zkoumaným tématem při zpracování materiálů laserovými technologiemi. Je charakterizována jako zvýšená teplota materiálu v důsledku zbytkového tepla, které zůstává v materiálu z předchozích pulzů. Teplota roste v závislosti na čase mezi laserovými pulzy, které jsou určeny opakovací frekvencí, dokud nemá materiál čas vychladnout. Tepelná akumulace ovlivňuje proces během laserového mikroobrábění [19, 21, 29, 30] a je závislá na mnoha faktorech (např. energie v pulzu, doba trvání pulzu, hustota energie a opakovací frekvence a další). Následkem tepelné akumulace může dojít ke strukturálním defektům na povrchu materiálu. Rozeznávají se dva vlivy tepelné akumulace, které se liší v kvalitě obrobení materiálu. K tepelné akumulaci může docházet u laserového strukturování, mikrovrtání a dalších aplikacích. Jsou provedeny experimenty na různých laserech (nanosekundové, pikosekundové, femtosekundové a další). Jsou experimentálně stanoveny procesní parametry, při kterých dochází k tepelné akumulaci během zpracování materiálu a kdy už ne. Pro výpočty teplot na povrchu materiálu jsou použity metody numerického modelování [25, 29].

Problematika tepelné akumulace je známa, ale zatím nebylo provedeno měření teploty na povrchu vzorku v průběhu laserového procesu. Tato diplomová práce je zaměřena na měření tepelné akumulace během laserového mikroobrábění a chtěla by přiblížit tuto problematiku. K detekci tepelné akumulace je použit citlivý měřicí systém. Znalost teploty na povrchu materiálu je velmi důležitá pro řízení procesu a mohla by pomoci zabránit nežádoucím účinkům, jako je například degradace materiálu. Zabývá se také nejefektivnějším odběrem materiálu a drsností obrobené drážky v závislosti na tepelné akumulaci.

8 Experiment

V této kapitole je vysvětleno vše, co bylo potřeba pro provedení a vyhodnocení experimentu. Nejprve je popsáno, jaký laserový systém byl použit a jeho vlastnosti. Je zde popsán zkoumaný materiál a také parametry experimentu. Dále je popsáno, jak probíhalo vyhodnocení jednotlivých vlastností (tepelná akumulace, drsnost obrobené drážky a množství odebraného materiálu). Nakonec jsou ukázány a vyhodnoceny výsledky experimentu. Experiment byl proveden na zařízeních výzkumného centra Nové technologie Západočeské univerzity v Plzni (NTC).

8.1 Provedení experimentu

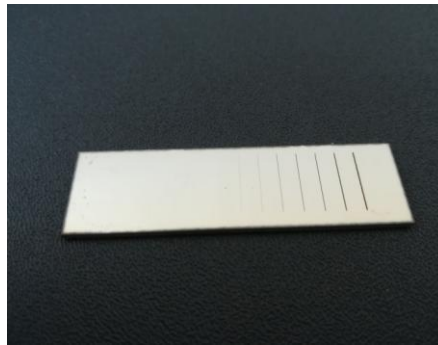
Pro experiment byl použit pulzní pevnolátkový pikosekundový laser PX25-2-G s InnoSlab technologií (EdgeWave GmbH). Charakteristické vlastnosti použitého laseru jsou vlnová délka 532 nm, délka trvání pulzu 10 ps, průměrný výkon laseru 13,8 W a kvalita paprsku $M^2 < 1,1$. Kompletní informace o laseru lze dohledat na [45]. Fokusevání paprsku bylo zajištěno pomocí F-Theta objektivu s fokusační vzdáleností 255 mm. Skenování paprsku bylo umožněno s galvanometrickou skenovací hlavou intelliSCAN III (SCANLAB GmbH) a se softwarem laserDESK (verze 1.4). Velikost laserové stopy je 25 μm . Vlastnosti laserového systému jsou shrnuty v Tabulce 1.

Tabulka 1: Vlastnosti laserového systému

Průměrný výkon laseru	13,8 W
Vlnová délka laseru	532 nm
Délka trvání pulzu	10 ps
Velikost laserové stopy	25 μm
Fokusační vzdálenost	255 mm
Kvalita laserového svazku	$M^2 < 1,1$

Zkoumaným materiálem byla chrom-niklová austenitická ocel ČSN 10088-1 1.4301 (X5CrNi 18-10). Tato ocel je nejvíce rozšířenou a používanou korozivzdornou ocelí v potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Obsahuje méně než 0,07 % uhlíku, 17 – 19,5 % chromu a 8 – 10,5 % niklu [46].

Experiment zahrnoval obrábění drážky pulzním laserem do materiálu s různými parametry (skenovací rychlost, energie v pulzu a opakovací frekvence). Drážka byla dlouhá 1 cm. Při experimentu byla vždy obrobena jedna drážka, která byla vytvořena jedním skenem laserového paprsku. Obrázek 17 ukazuje obrobený vzorek po experimentu s jednou energií v pulzu a se všemi skenovacími rychlostmi. Nejpomalejší rychlosti jsou viditelné pouhým okem. Nejrychlejší rychlosti je možné detekovat pouze pod mikroskopem. Pro určité kombinace energie v pulzu a skenovací rychlosti jsou pod mikroskopem viděny pouze jednotlivé laserové pulzy.



Obrázek 17: Ukázka obrobeného materiálu

Při experimentu byla měněna skenovací rychlost laseru, energie v pulzu a opakovací frekvence. Rozmezí skenovacích rychlostí se pohybovalo mezi 0,07 a 8 m/s. Energie v pulzu se pohybovala v rozmezí 10 až 100 μJ a opakovací frekvence se pohybovala mezi 140 kHz a 1176 kHz. Experiment se skládal z kombinace skenovací rychlost a energie v pulzu. Energie v pulzu byla ve spojitosti s opakovací frekvencí pulzů, to znamená, že energii v pulzu 10 μJ odpovídala opakovací frekvenci 1176 kHz, 30 μJ odpovídala 454 kHz a 100 μJ odpovídala 140 kHz. Celkem tedy proběhlo 30 měření (3 energie v pulzu, 10 skenovacích rychlostí), která byla 5x opakována pro následné vyhodnocení. V Tabulce 2 jsou rozepsány jednotlivé zkoumané parametry experimentu.

Tabulka 2: Parametry experimentu

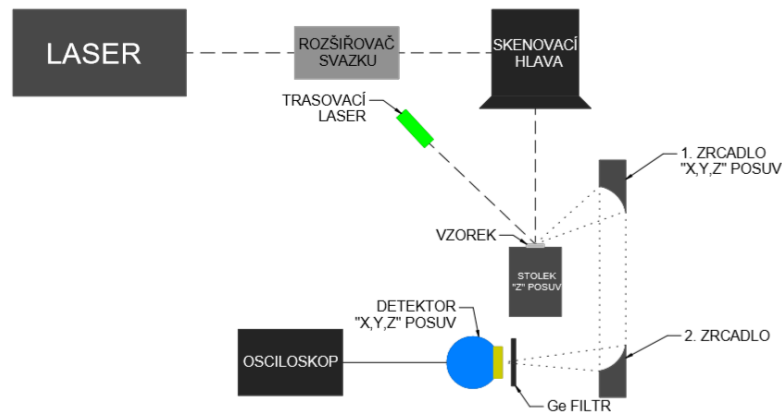
Skenovací rychlost [m/s]	0,07	0,1	0,15	0,2	0,3	0,7	1	2	4	8
Energie v pulzu [μJ]	10			30			100			
Opakovací frekvence pulzů [kHz]	1176			454			140			
Hustota energie [J/cm^2]	2,0			6,1			20,4			

8.2 Vyhodnocení experimentu

V této kapitole jsou popsány jednotlivé kroky, které vedly k vyhodnocení tepelné akumulace, drsnosti obrobené drážky a množství odebraného materiálu. Nejprve je popsán vyvinutý měřicí systém, kterým se měřila tepelná akumulace, jeho princip, vlastnosti použitých prvků v měřicím systému a následně jakým přístrojem a principem se tepelná akumulace vyhodnocovala. Poté je detailněji popsán přístroj, kterým se hodnotila drsnost obrobené drážky a množství odebraného materiálu. U drsnosti obrobené drážky je popsána metodika hodnocení a je uveden příklad s konkrétními hodnotami. Pak je popsána metodika vyhodnocení množství odebraného materiálu. Dále je uveden mikroskop, který byl potřeba k získání obrázků s vysokou rozlišovací schopností pro lepší pochopení procesu.

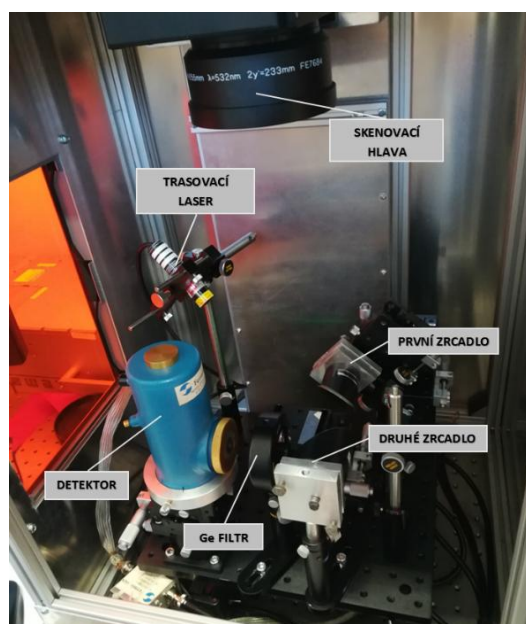
8.2.1 Tepelná akumulace

Pro vyhodnocení tepelné akumulace během laserového mikroobrábění byl sestaven citlivý měřicí systém. Tento systém využívá k detekci tepelné akumulace infračervené (IR) záření. Měřicí systém byl sestaven na základě předchozích měřicích systémů [34, 47, 48]. Obrázek 18 znázorňuje schéma systému. Schéma bylo zjednodušeno pro lepší představu o jeho fungování.



Obrázek 18: Schéma měřicího systému

Měřicí systém je složen z rychlého IR detektoru HgCdTe, který je chlazený tekutým dusíkem, ze dvou parabolických zrcadel a germaniového (Ge) filtru. Použitý detektor (Fermionics PV-11-1) má citlivou plochu o velikosti $1 \times 1 \text{ mm}^2$ a jeho citlivost je v rozmezí od 2 do $12 \text{ } \mu\text{m}$. Jeho časová odezva je 60 ns. První parabolické zrcadlo (Melles Griot 02POA013) má následující vlastnosti: efektivní ohnisková vzdálenost $EFL = 38,1 \text{ mm}$, průměr 44,5 mm a optická vrstva z rhodia s 90% odrazivostí. Druhé parabolické zrcadlo (Edmund Optics NT47-108) charakterizuje $EFL = 101,6 \text{ mm}$, průměr 50,8 mm a optická zlatá vrstva, která má 98% odrazivost [47]. Germaniový filtr (Edmund Optics 62 646) s průměrem 50 mm a s antireflexní vrstvou v rozmezí vlnových délek 3 – $12 \text{ } \mu\text{m}$ je použit pro odstínění záření laserového paprsku [49]. Obrázek 19 vyobrazuje reálnou konfiguraci měřicího systému.



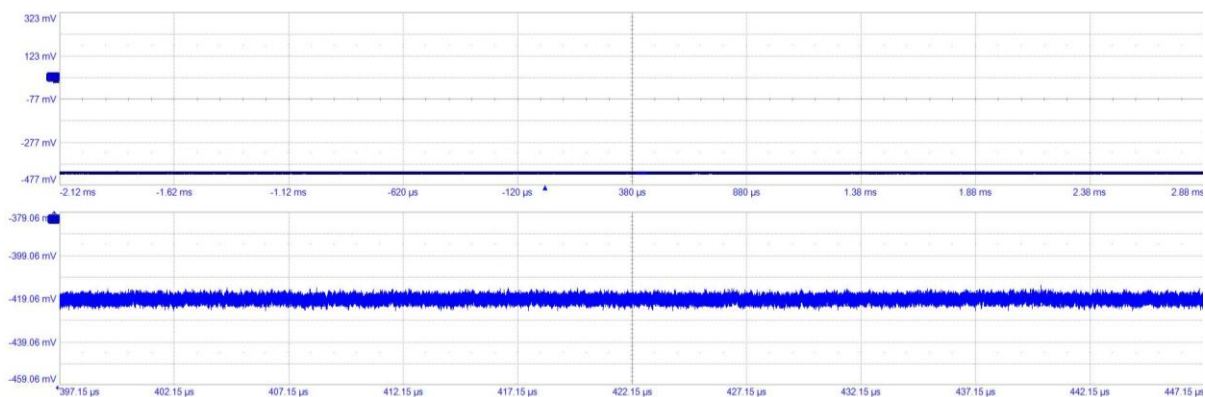
Obrázek 19: Konfigurace měřicího systému

Tepelné IR záření z povrchu materiálu je fokusováno pomocí dvou parabolických zrcadel. Dále prochází skrze Ge filtr do detektoru. Detektor je připojen pomocí kabelu k osciloskopu. Získaný napěťový signál je zaznamenán pomocí osciloskopu, kde je vidět celý proces obrábění. Byl použit osciloskop Teledyne LeCroy WavePro 404HD (Obrázek 20). Tento osciloskop má rozlišení 12 bit, šířka pásma je 4 GHz a vzorkovací frekvence je 20 GS/s. Podrobnější informace lze dohledat na webových stránkách výrobce [50].



Obrázek 20: Osciloskop Teledyne LeCroy WavePro 404HD [50]

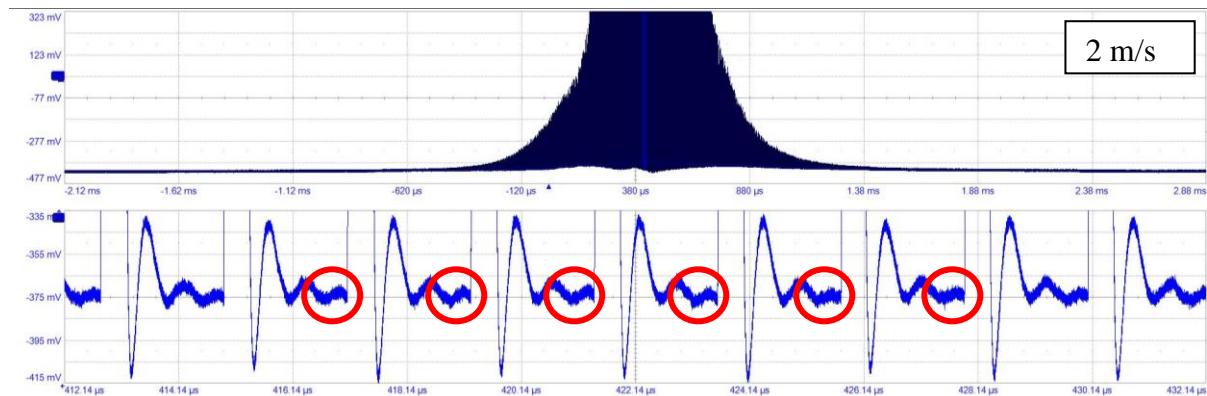
Napěťový signál byl získán z osciloskopu. Na osciloskopu byl zachycen celý proces obrábění drážky a záznam byl následně uložen. Základní hladina signálu (Obrázek 21) byla vždy měřena před každým měřením dat pro tepelnou akumulaci. Důvodem bylo zvyšování hladiny signálu detektoru chlazeného dusíkem v průběhu měření.



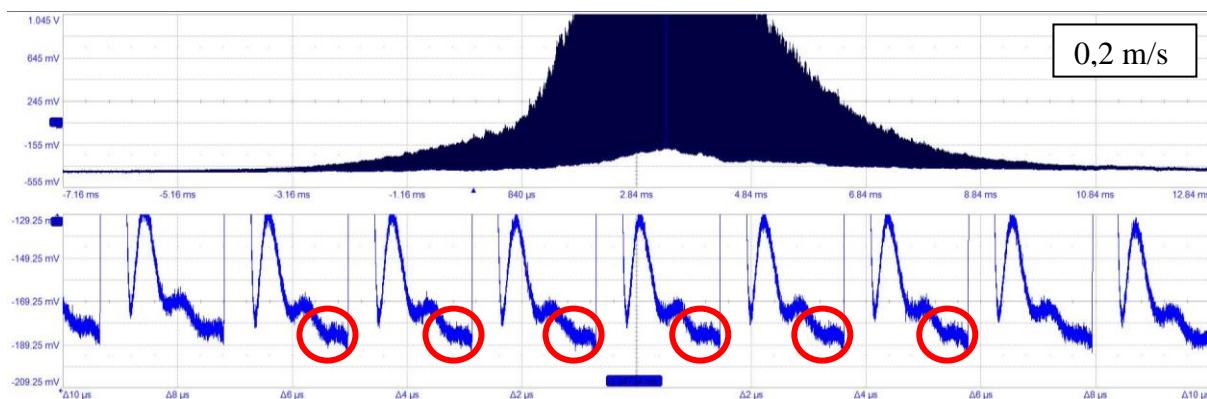
Obrázek 21: Základní hladina signálu

Pro vyhodnocení tepelné akumulace byly použity průměrné hodnoty signálu před šesti nejvyššími pulzy (část signálu blízká k následujícímu pulzu 20 – 100 ns před dalším pulzem), které byly naměřeny během procesu obrábění (Obrázek 22, Obrázek 23 a Obrázek 24). Na obrázcích jsou červeně označeny oblasti, které byly použity k vyhodnocení. Tyto části byly po zprůměrování porovnány se základní hladinou signálu. Výsledné hodnoty tepelné akumulace jsou rozdílem mezi průměrným signálem před laserovým pulzem a základní hladinou signálu.

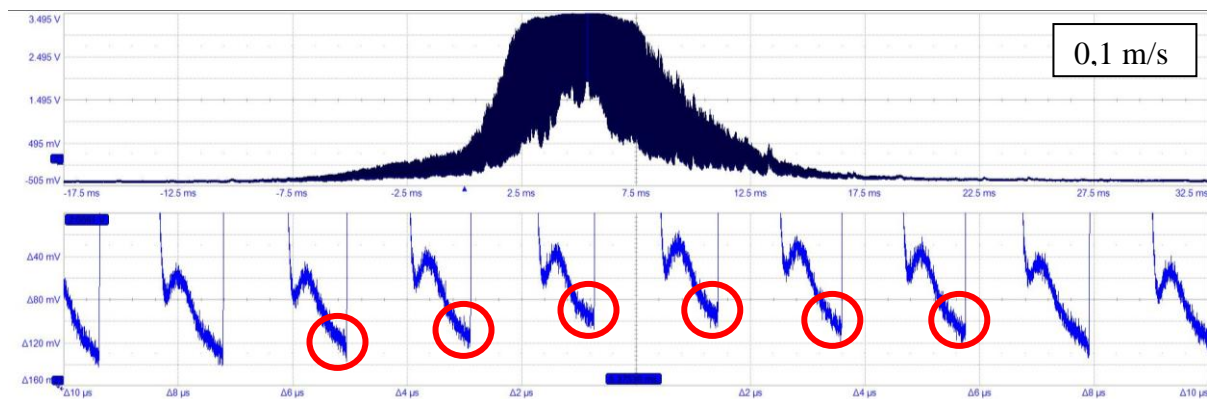
Ovlivnění procesu tepelnou akumulací (zvýšení hladiny signálu oproti základní hladině) je pro ilustraci ukázáno na obrázcích s různými skenovacími rychlostmi s energií v pulzu 30 μJ (Obrázek 22, Obrázek 23 a Obrázek 24).



Obrázek 22: IR signál tepelné akumulace s parametry 2 m/s a 30 μ J

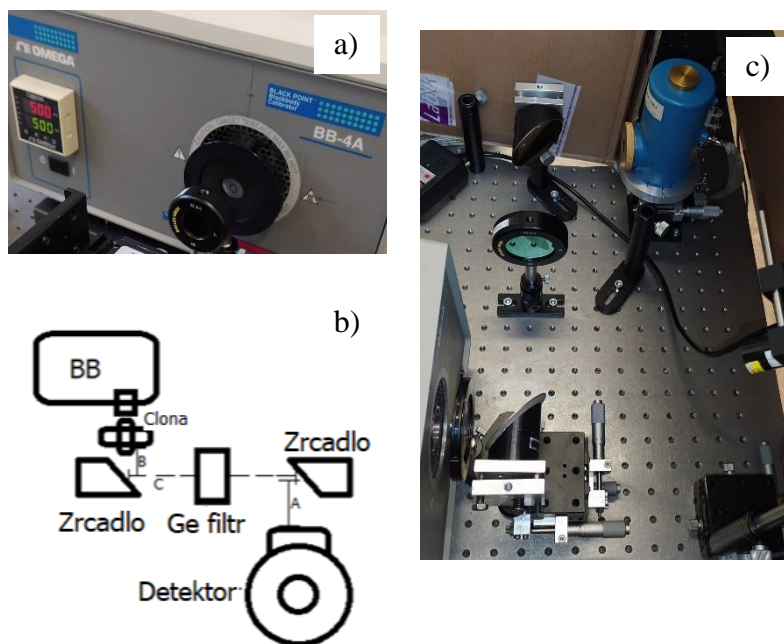


Obrázek 23: IR signál tepelné akumulace s parametry 0,2 m/s a 30 μ J



Obrázek 24: IR signál tepelné akumulace s parametry 0,1 m/s a 30 μ J

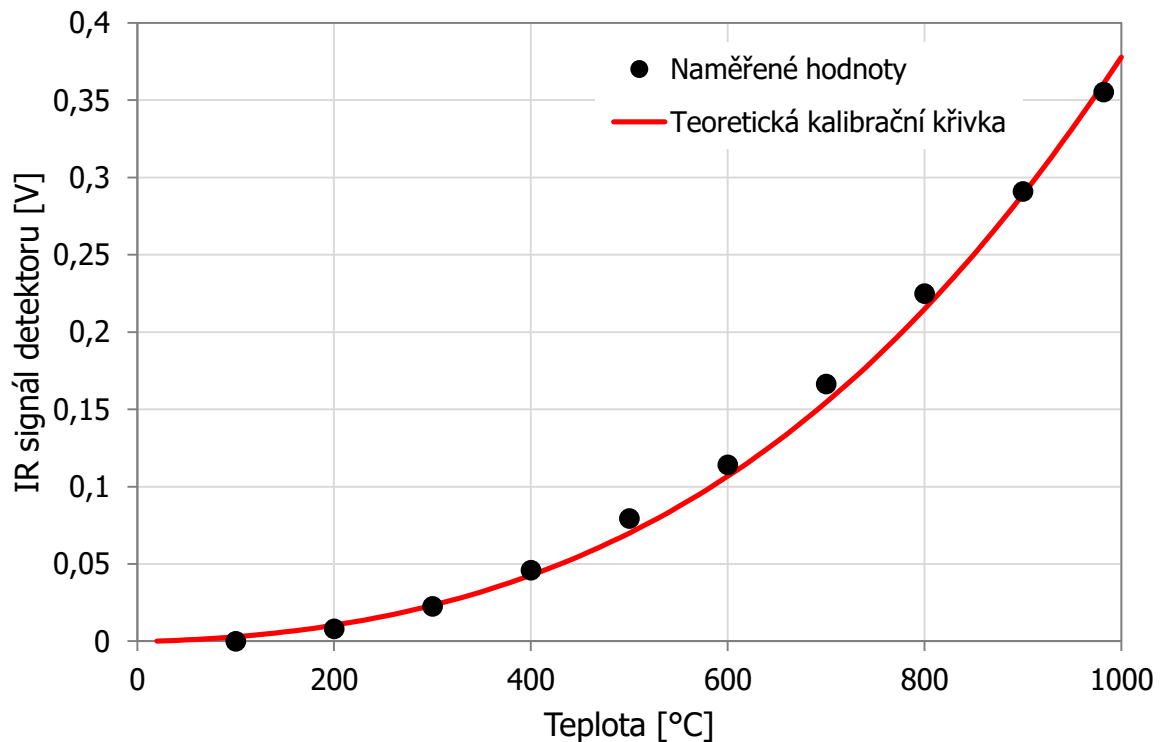
Pro přepočítání napětíového signálu na teplotu musela být provedena kalibrace. Ke kalibraci bylo použito černé těleso OMEGA BB-4A (Obrázek 25a). Konfigurace kalibračního uspořádání byla podobná jako u měřicího systému (2 parabolická zrcadla, Ge filtr a HgCdTe detektor). Výjimkou u kalibrace byla hliníková fólie s dírou o průměru 51 μ m, která byla umístěna ve cloně těsně před černým tělesem (Obrázek 25b,c). Snahou bylo vytvořit díru ve fólii o velikosti laserové stopy (25 μ m), která byla použita při experimentu. V tomto případě ovšem nebyl získán takový signál, který by mohl pomoci s kalibrací. Proto bylo rozhodnuto, že se pro kalibraci pro tuto práci použije díra s průměrem 51 μ m.



Obrázek 25: Kalibrace, a) černé těleso, b) schéma sestavení pro kalibraci, c) reálný obrázek konfigurace

Kalibrace spočívala v měření signálu z černého tělesa, který procházel skrze optickou konfiguraci. Kalibrační křivka pro daný detektor byla vytvořena na základě zaznamenaného signálu z černého tělesa v závislosti na teplotě. Byla použita teplota od 100 do 981 °C. Postupovalo se po 100 °C. Hodnoty bylo možné zanést do grafu (Obrázek 26). Pomocí těchto hodnot byla vytvořena kalibrační křivka a proběhla výsledná kalibrace na teplotu.

Teoretická kalibrační křivka je spočtena pro používaný detektor pomocí Planckova zákona a spektrální citlivosti detektoru. Násobící faktor je určen pomocí kalibrace pro měřený materiál a použitou optiku. Upravená kalibrační křivka je spočtena z teoretické kalibrační křivky a násobícího faktoru. Inverzní kalibrační křivka je spočtena pomocí numerické inverze upravené křivky. Inverzní kalibrační křivka je pak použita pro přepočtení teploty z napěťového signálu [43].



Obrázek 26: Kalibrační křivka pro detektor PV-11-1 s průměrem díry 51 μm ve cloně před černým tělesem

8.2.2 Drsnost obrobené drážky

Pro vyhodnocení drsnosti obrobené drážky byl použit kalibrovaný 3D měřicí laserový konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS5000 (Obrázek 27). Tento konfokální mikroskop funguje na principu optického mikroskopu. Tento typ mikroskopu má výhodu vysoké rozlišovací schopnosti. Uvnitř mikroskopu se nachází laser o vlnové délce 405 nm. Objektivy umožňují zachycení jemných vzorů a defektů. Tento mikroskop je schopen měřit rozdíl výšky kroku a vzdálenosti mezi dvěma stanovenými oblastmi, měřit rozdíl úhlu mezi těmito oblastmi, měřit plochy/objemy ve stanovené oblasti a měřit drsnosti povrchu. Dále mikroskop disponuje dalšími velmi užitečnými funkcemi pro vyhodnocení, které lze využít v automobilovém průmyslu, při pozorování materiálů (např. koroze), při kontrole elektronických součástek a v dalších aplikacích a odvětvích průmyslu [51, 52]. Pro vyhodnocení byl použit objektiv (LMPLFLN, Olympus) se zvětšením 50x.



Obrázek 27: 3D měřicí laserový mikroskop Olympus LEXT OLS5000 [51]

Pro vyhodnocení drsnosti obrobene drážky byla použita bezkontaktní metoda. Laserový paprsek snímal data přímo v drážce obrobene laserem (ve směru obrábění). Byla měřena drsnost R_a , aritmetický průměr absolutních hodnot skutečného profilu. Data pro vyhodnocení byla měřena ze vzdálenosti 4 mm.

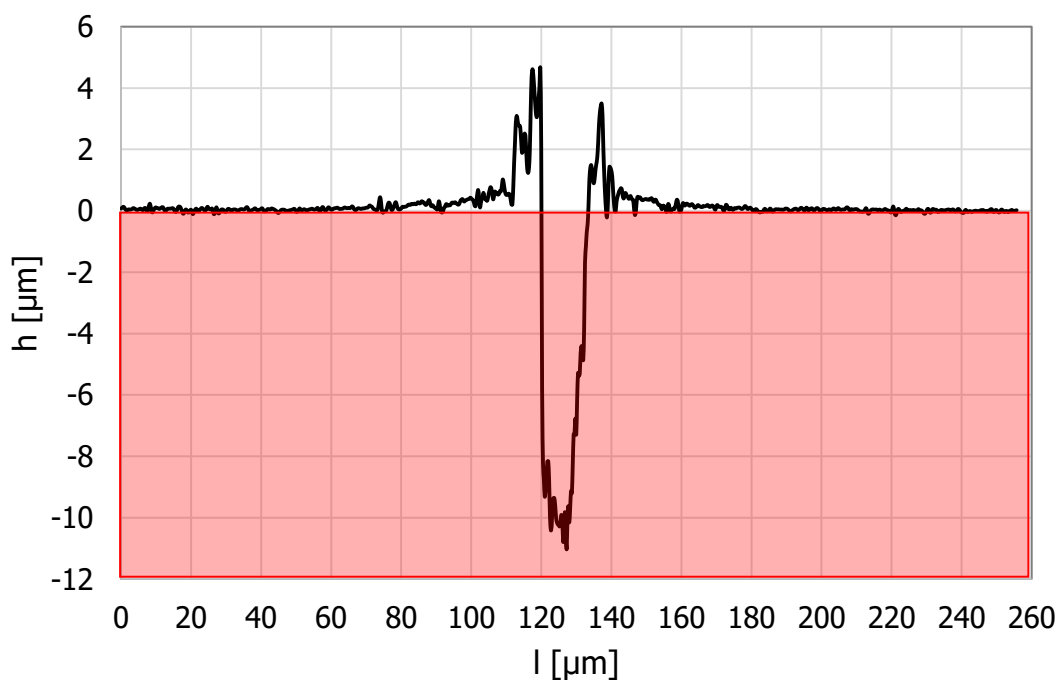
Například pro skenovací rychlost 0,2 m/s a energii v pulzu 10 μJ byla nasbírána data a následně byla vyznačena linie v drážce, ve které se drsnost měřila (Obrázek 28). Poté program vyhodnocenou křivku vyrovnal a vypočetl drsnost obrobene drážky. Tímto způsobem se pokračovalo u všech skenovacích rychlostí a energií v pulzu.



Obrázek 28: Vyznačená linie pro hodnocení drsnosti obrobene drážky

8.2.3 Množství odebraného materiálu

Pro vyhodnocení množství odebraného materiálu byl použit také 3D měřicí laserový mikroskop Olympus LEXT OLS5000. Při vyhodnocování množství odebraného materiálu laserový paprsek snímal data kolmo na obrobenu drážku. Množství odebraného materiálu bylo měřeno z plochy $258 \times 258 \mu\text{m}^2$, kterou umožňoval mikroskop. Z této plochy byla nasbírána data. V programu Data acquisition application byl povrch materiálu naskenován. V programu Analysis application LEXT probíhalo následné vyhodnocení. Bylo potřeba vyrovnat povrchu materiálu do roviny. Dále byla vybrána pouze drážka obrobena laserem, aby se zamezilo měření nechtěných částí na vzorku. V programu se vykreslila křivka profilu drážky. Skrze celou drážku bylo možné sledovat, jak se mění profil v drážce. Následně byla nastavena základní rovina neobrobeneho materiálu a pod ní byl změřen objem odebraného materiálu v μm^3 (vyznačeno červeným obdélníkem). Pro ukázkou (Obrázek 29) je uvedena skenovací rychlost 0,1 m/s a energie v pulzu 10 μJ .



Obrázek 29: Ukázkou vyhodnocení množství odebraného materiálu, skenovací rychlost 0,1 m/s, energie v pulzu 10 μJ

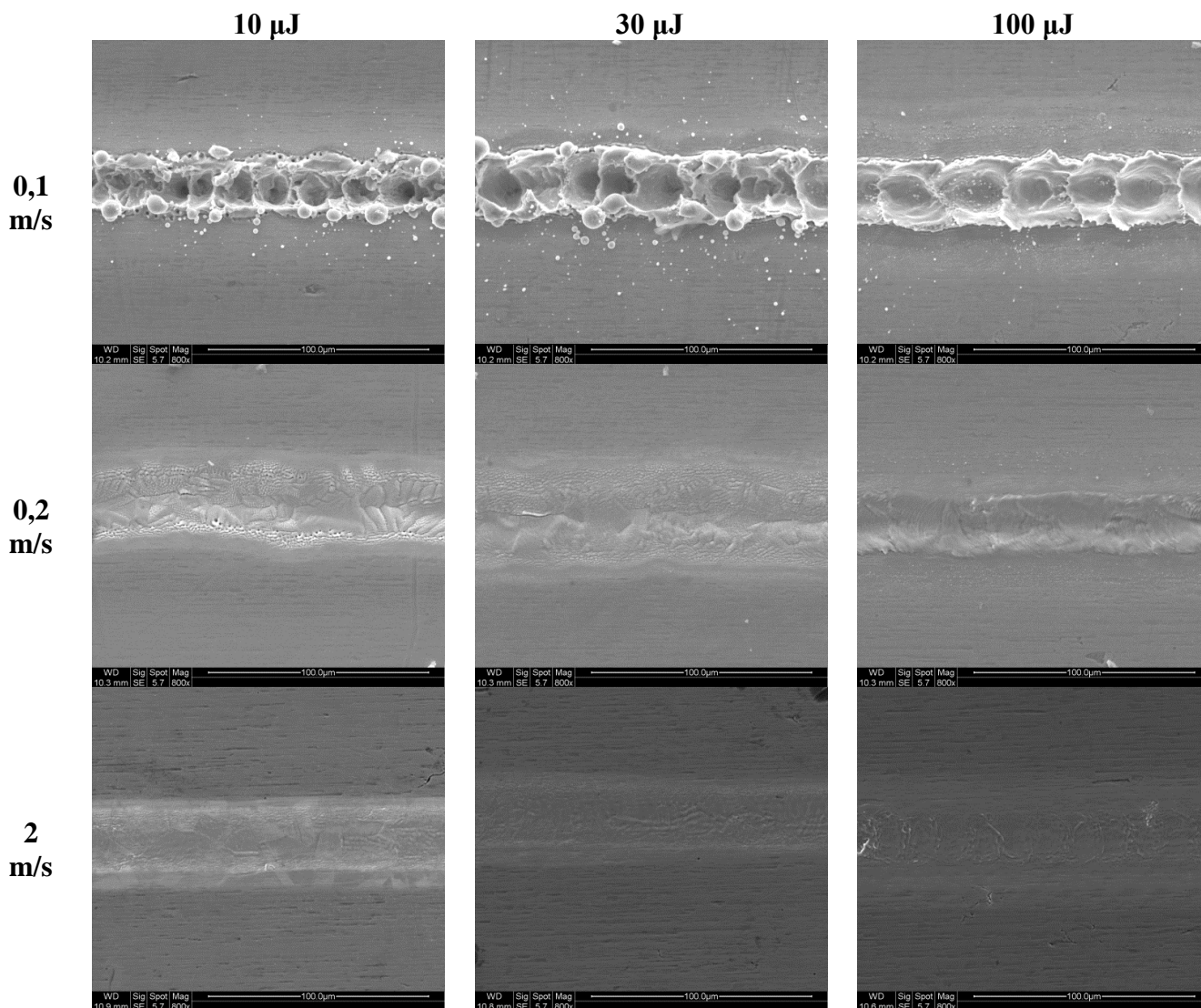
Takto byly naměřeny a vyhodnoceny všechny kombinace skenovací rychlosti a energie v pulzu. Pro vyhodnocení množství odebraného materiálu se pracovalo se třemi hodnotami, které byly naměřeny z různých míst drážky (střed, levá a pravá strana) pro lepší věrohodnost výsledků. Tyto tři hodnoty se zprůměrovaly a použily se pro přepočty.

Skenovací elektronový mikroskop FEI Quanta 200 (SEM) byl využit pro detailní obrázky po laserovém zpracování (Obrázek 30). Tento přístroj umožňuje pozorování povrchů nejrůznějších objektů s velkou hloubkou ostrosti. Ve vakuové komoře pomocí urychlených elektronů a elektroniky na zesílení a zpracování signálu vzniká obraz, který je výsledkem odražených a sekundárních elektronů z materiálu. Tento mikroskop je také schopen určit prvkové složení preparátu [53].



Obrázek 30: Skenovací elektronový mikroskop FEI Quanta 200 SEM [54]

Z obrázků ze skenovacího elektronového mikroskopu bylo možné zjistit morfologii povrchu (Obrázek 31). Pro ukázkou jsou vybrány tři skenovací rychlosti (0,1; 0,2; 2 m/s) a energie v pulzu 10, 30 a 100 μJ . Obrázky ostatních rychlostí a energií v pulzu jsou k vidění v kapitole 11 Přílohy.



Obrázek 31: Snímky obrobeneých drážek ze skenovacího elektronového mikroskopu

8.3 Výsledky experimentu

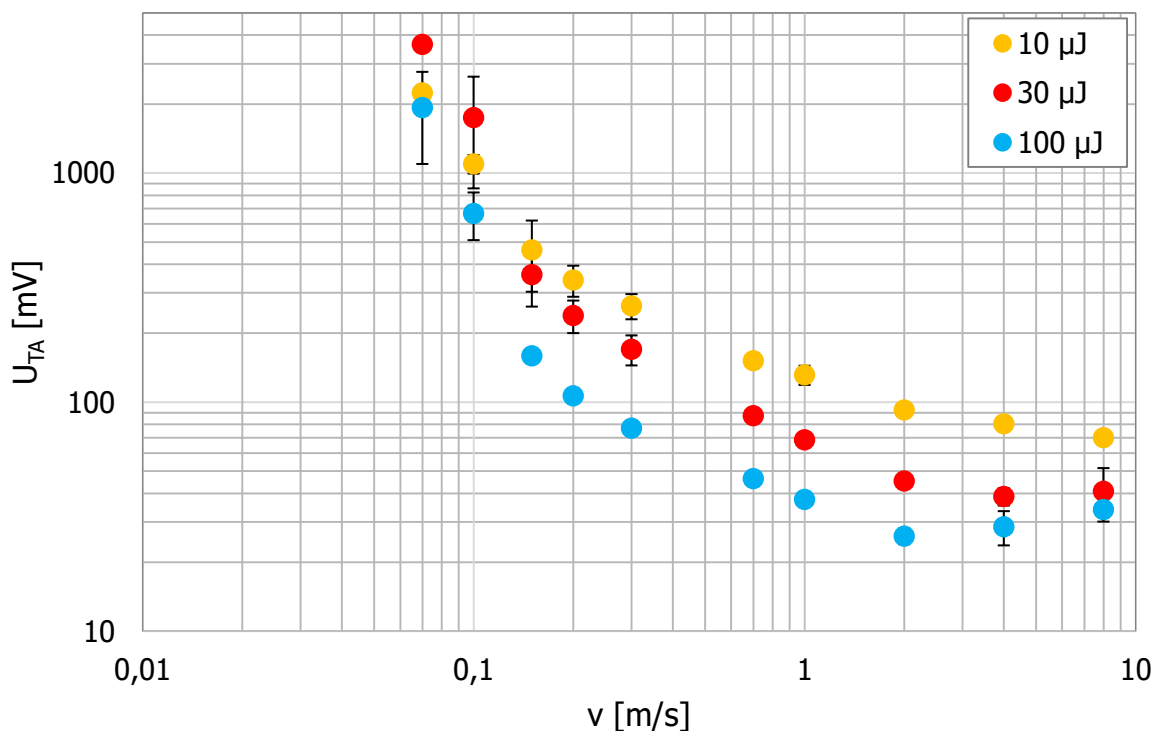
V této kapitole jsou představeny a diskutovány výsledky experimentu. Nejprve je zhodnocena tepelná akumulace, pak drsnost obrobeneé drážky a nakonec množství odebraného materiálu. Každá podkapitola obsahuje tabulku s naměřenými hodnotami, graf z těchto hodnot a následný komentář s hodnocením.

8.3.1 Tepelná akumulace

Zde jsou shrnuty konkrétní výsledky týkající se tepelné akumulace. Pro přehlednost výsledných hodnot signálu tepelné akumulace U_{TA} [mV] byla vytvořena Tabulka 3 a následně byl vyobrazen graf (Obrázek 32) z těchto hodnot se směrodatnou odchylkou. V tabulce jsou zaznamenány hodnoty pro všechny skenovací rychlosti v [m/s] a všechny energie v pulzu.

Tabulka 3: Výsledné hodnoty signálu tepelné akumulace U_{TA} [mV]

Skenovací rychlost [m/s]	Energie v pulzu [μ J]		
	10	30	100
0,07	2238	3644	1930
0,1	1096	1746	666
0,15	462	360	159
0,2	341	239	107
0,3	263	170	77
0,7	152	87	46
1	132	69	38
2	92	45	26
4	80	39	29
8	70	41	34



Obrázek 32: Závislost tepelné akumulace jako napěťového signálu na skenovací rychlosti

Signál akumulace tepla byl pozorován v rozmezí 26 až 3645 mV. Velká změna nastala mezi rychlostmi 0,1 m/s a 0,15 m/s. Tepelná akumulace může být rozdělena do tří oblastí.

V první oblasti (0,07 a 0,1 m/s) byly pozorovány maximální hodnoty tepelné akumulace. Pro tyto skenovací rychlosti byl naměřen signál v rozmezí 666 – 3645 mV. Podle obrázků ze SEM mikroskopu (Obrázek 31) lze říci, že byl materiál roztaven a na okrajích drážky mohou být viděny kapičky roztaveného materiálu. K přesycení signálu došlo, když byla skenovací rychlost minimální a frekvence opakování pulzů 454 kHz (30 μJ). Ve skutečnosti by byly hodnoty napětového signálu vyšší. Ve druhé oblasti (0,15 – 0,3 m/s) byl patrný mírný pokles signálu se zvyšující se rychlostí. Signál tepelné akumulace se vyskytoval v rozmezí mezi 77 až 462 mV. Tavení materiálu se zde vyskytovalo velice málo anebo dokonce vůbec (Obrázek 31). Ve třetí oblasti (0,7 – 8 m/s) byl pozorován nejnižší IR signál. Pohyboval se v rozmezí 26 – 152 mV. Tato oblast odpovídala režimu bez detekce procesů tavení a oxidace na povrchu materiálu, jak je možné vidět na obrázcích ze SEM mikroskopu.

Obecně je dáno, že hladina signálu klesá se zvyšující se skenovací rychlostí. To znamená, že u nižších skenovacích rychlostí se tepelná akumulace vyskytuje více než u vyšších rychlostí. Je to dáno tím, že při nižších rychlostech je materiál více ovlivněn teplem, protože laserový paprsek ohřívá povrch materiálu po delší čas. Když jsou vyšší rychlosti skenování, nebude do materiálu předáno takové množství tepla kvůli kratšímu času, kdy je dané místo ohříváno laserovým paprskem. Při kombinaci vyšší energie v pulzu a nízké rychlosti skenování byl materiál více ovlivněn teplem, protože bylo do materiálu dodáno větší množství energie, která způsobila jeho ohřátí a roztavení.

Při pozorování bylo zajímavé, že pro pulzní energii 100 μJ a nejvyšší skenovací rychlosti, tepelná akumulace rostla se zvyšující se rychlostí skenování. V této oblasti nedocházelo k překrývání laserových pulzů. Mohlo to být způsobeno nižšími účinky stínění plazmou a částicemi pro laserový paprsek i IR záření, změnami optických vlastností nebo větší oblastí záření (oddělené pulzy vs. překrývající se pulzy). Významné zvýšení IR signálu v procesu zahrnujícím významné tavení materiálu může být použito pro on-line řízení procesu, aby se zabránilo těmto režimům během mikroobrábění v konkrétních 3D geometriích (roh, hluboké díry) nebo nestabilitě procesu. Rychlá reakce laserového systému v čase, např. 10 μs ovlivňující již další laserové pulzy, může zabránit poškození materiálu obrobku a zvýšit výslednou přesnost obrábění.

Výsledné hodnoty teplot mají nejistotu měření cca ± 20 %. Tato nejistota měření souvisí s vlivem emisivity materiálu a jejich možných změn během procesu mikroobrábění, s velikostí díry ve cloně, s velikostí kavity černého tělesa, kde zrcadlo může vidět nejen na stěny kavity, ale i na okolí s výrazně nižší teplotou. Dalšími vlivy mohou být změna velikosti ohřáté (zářící) oblasti při procesu pro různé energie v pulzu a rychlosti pohybu svazku a nehomogenní ohřev povrchu Gaussovským svazkem. Vliv průměru díry ve cloně a velikosti kavity černého tělesa při kalibraci na výslednou teplotu při procesu je stejný na celou sadu různých rychlostí skenování. Pokud se mění emisivita s teplotou a velikost ohřáté oblasti s rychlostí skenování, pak bude jejich vliv různý pro různé rychlosti skenování.

Tabulka 4 obsahuje výsledné hodnoty teplot po kalibraci. Barevné rozlišení slouží k rychlé orientaci v tabulce. Zelená barva označuje hodnoty, které nedosáhly kritické hodnoty (607 °C). Při překročení této teploty dochází ke zvýšení drsnosti. Žlutá barva zahrnuje

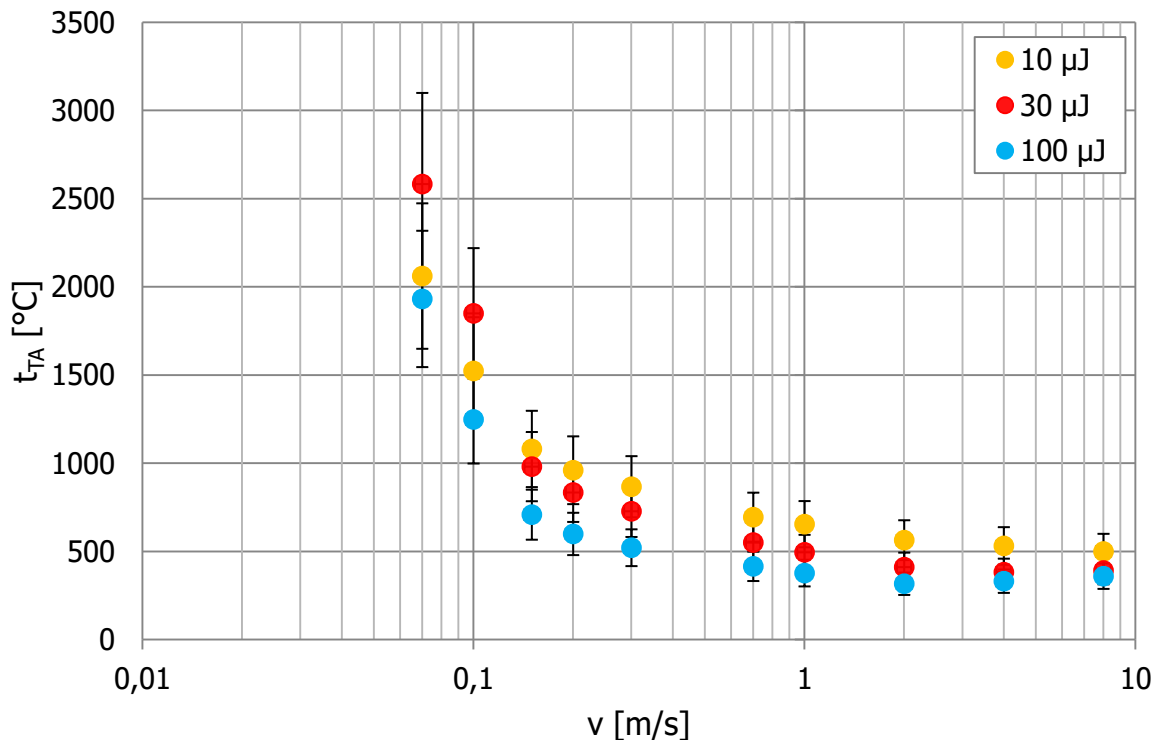
hodnoty mezi kritickou hodnotou a teplotou tavení. Hodnoty červené barvy přesáhly teplotu tavení daného materiálu (1400 – 1455 °C). Nejpomalejší rychlosti 0,07 a 0,1 m/s se nacházely nad bodem tavení, což odpovídá obrázkům ze SEM mikroskopu (Obrázek 31), kde je vidět, že byl materiál roztaven. Pouze rychlost 0,1 m/s s energií v pulzu 100 μJ se nacházely pod touto teplotní hranicí, ale obrázky z mikroskopu naznačují, že i zde proběhlo tavení materiálu. Tyto rychlosti byly ovlivněny teplotou 1520 – 2580 °C. Zde uváděné měření je měření IR záření z oblasti o průměru cca 400 μm a hodnota je průměrem z nejteplejší oblasti. Některé oblasti mohly být roztavené a jiné ne. Také je uvedena teplota před dalším pulzem, kdy pro nízké opakovací frekvence (energie v pulzu 100 μJ) již mohl materiál ztuhnout. Druhá oblast skenovacích rychlostí (0,15 – 0,3 m/s) byla ovlivněna pouze ohřevem materiálu. Nebyla dosažena teplota tavení, což odpovídá teplotám (655 – 1250 °C). Třetí oblast skenovacích rychlostí (0,7 – 8 m/s) byla ovlivněna teplotou v rozmezí 317 až 600 °C.

Tabulka 4: Výsledné hodnoty teploty tepelné akumulace t_{TA} [°C]

Skenovací rychlost [m/s]	Energie v pulzu [μJ]		
	10	30	100
0,07	2060	2580	1930
0,1	1520	1850	1250
0,15	1080	980	710
0,2	960	840	600
0,3	870	730	520
0,7	700	550	420
1	660	500	380
2	560	410	320
4	530	380	330
8	500	390	360

Na základě výsledných teplot lze říci, že první oblast skenovacích rychlostí (0,1 a 0,07 m/s) byla tepelnou akumulací velice ovlivněna. Materiál byl roztaven a mohl být až spálen, což odpovídá vysokým teplotám nad 2000 °C. Tyto rychlosti nejsou z tohoto důvodu vhodné pro laserové mikroobrábění. U druhé oblasti skenovacích rychlostí (0,15 – 0,3 m/s) mohla tepelná akumulace pomoci k rychlejšímu laserovému mikroobrábění, protože nebylo třeba dodávat tolik tepla pro ohřev materiálu a následnou ablaci. Teplota materiálu nedosahovala hodnoty teploty tavení. Rychlejší obrábění mohlo být i v důsledku zvýšení absorpce při vyšší teplotě. U třetí oblasti (0,7 – 8 m/s) tepelná akumulace neovlivňovala proces laserového mikroobrábění, anebo ho ovlivňovala minimálně.

Následný graf (Obrázek 33) je vytvořen z výsledných hodnot. Vyjadřuje závislost hodnot teploty tepelné akumulace t_{TA} [°C] na skenovací rychlosti v [m/s].



Obrázek 33: Závislost tepelné akumulace jako hodnoty teploty na skenovací rychlosti

8.3.2 Drsnost obrobené drážky

Hodnota drsnosti obrobeného povrchu je velice důležitým parametrem pro konečného uživatele. Drsnost povrchu vypovídá o jeho vlastnostech a funkčnosti. V Tabulce 5 jsou uvedeny naměřené hodnoty drsnosti obrobené drážky R_a pro všechny energie v pulzu a skenovací rychlosti. Barevné rozdělení odpovídá hodnotám teplot tepelné akumulace. Červená barva zahrnuje teploty, které přesáhly teplotu tavení materiálu. Žlutá barva označuje takové hodnoty, které se nacházejí mezi kritickou teplotou a teplotou tavení. Zelená barva udává hodnoty, které nedosáhly kritické teploty 607 °C.

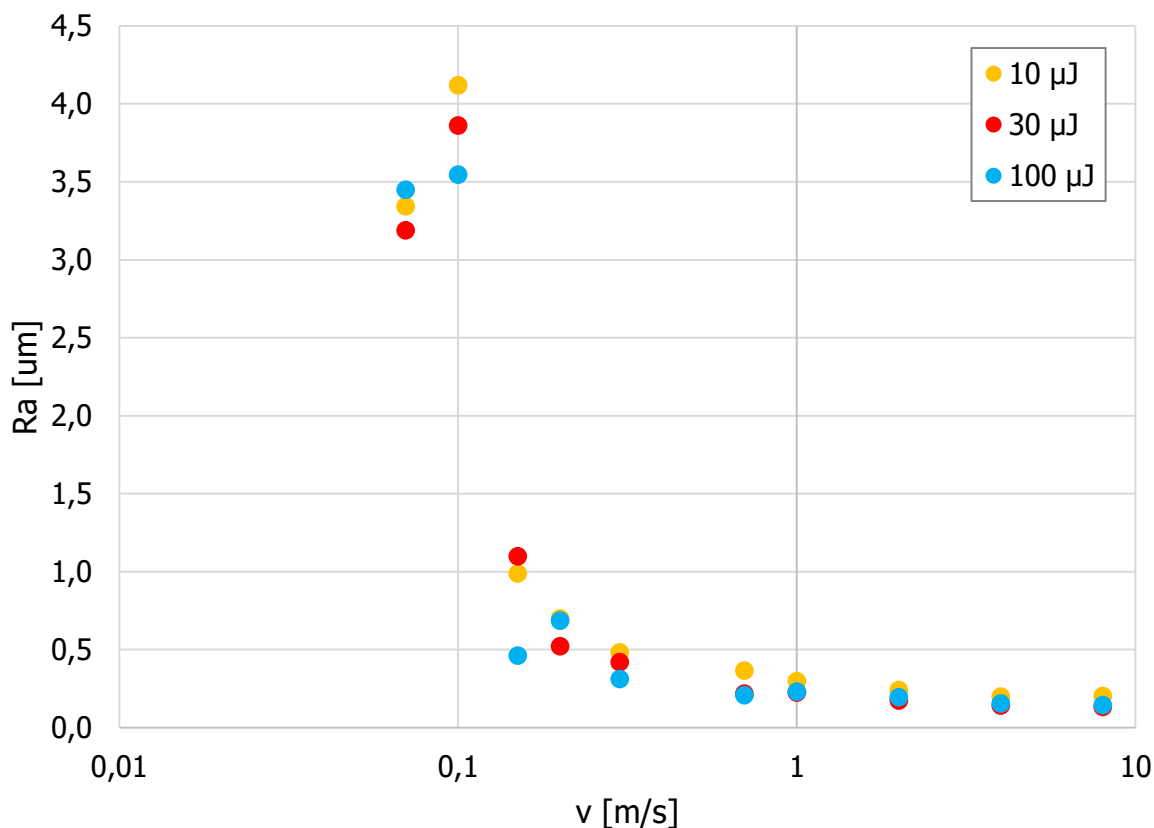
Drsnost obrobené drážky je závislá na několika parametrech. Patří mezi ně hloubka drážky, hustota energie, počet opakování, délka pulzu a další. Hodnota drsnosti neobrobeného materiálu byla změřena stejným postupem jako u hodnocení drsnosti obrobené drážky. Drsnost neobrobeného materiálu je $R_a = 0,1 \mu\text{m}$.

Tabulka 5: Výsledné hodnoty drsnosti obrobené drážky R_a [μm]

Skenovací rychlost [m/s]	Energie v pulzu [μJ]		
	10	30	100
0,07	3,3	3,2	3,5
0,1	4,1	3,9	3,5
0,15	1,0	1,1	0,5
0,2	0,7	0,5	0,7
0,3	0,5	0,4	0,3
0,7	0,4	0,2	0,2
1	0,3	0,2	0,2
2	0,2	0,2	0,2
4	0,2	0,1	0,2
8	0,2	0,1	0,1

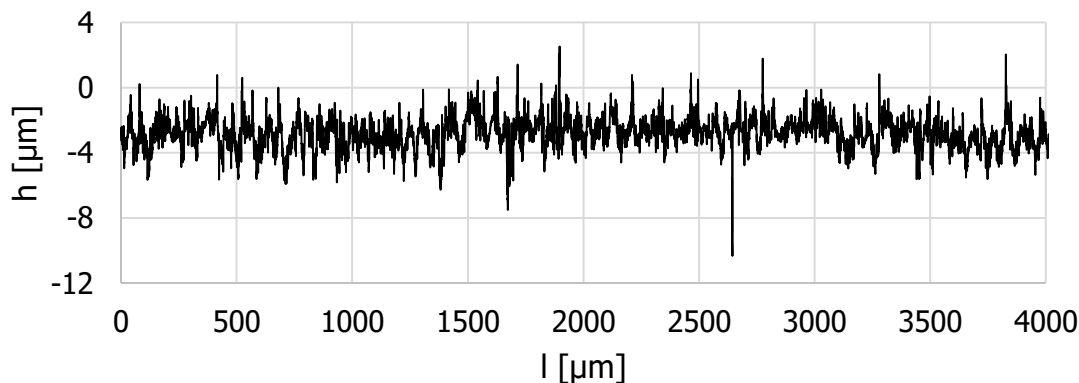
Drsnost obrobené drážky se pohybovala v rozmezí $R_a = 0,1 - 4,1 \mu\text{m}$. Drsnost $R_a = 4,1 \mu\text{m}$ byla naměřena s jednou z minimálních skenovacích rychlostí (0,1 m/s). Při minimálních rychlostech skenování se materiál roztavil a na okrajích byl vytlačen nahoru. Vytlačený materiál zvyšoval drsnost povrchu. Když se skenovací rychlost zvýšila, hodnoty drsnosti se zmenšily. Se skenovací rychlostí (0,15 – 0,3 m/s) se drsnost pohybovala v rozmezí 0,3 – 1,1 μm . Při těchto rychlostech skenování se materiál ohřál a mohly být viděny náznaky lokálního roztavení. V obrobených drážkách byly pravděpodobně pozorovány hranice zrn materiálu (Obrázek 31). S nejvyššími skenovacími rychlostmi (0,7 – 8 m/s) se drsnost pohybovala mezi $R_a = 0,1 - 0,4 \mu\text{m}$. Tyto hodnoty drsnosti R_a odpovídají ve strojírenství hodnotám, které lze dosáhnout dokončovacími metodami. Kombinací nejvyšší skenovací rychlosti 8 m/s a energií v pulzu 100 μJ lze vidět pod mikroskopem jednotlivé pulzy na povrchu vzorku.

Z hodnot z tabulky byl sestaven graf (Obrázek 34). Graf tepelné akumulace byl rozdělen do 3 částí a graf závislosti drsnosti obrobené drážky na skenovací rychlosti mohl být rozdělen stejně. Křivka v grafu vypadala velice podobně.



Obrázek 34: Závislost drsnosti obrobeneé drážky na skenovací rychlosti

Pro názorný příklad profilu drsnosti obrobeneé drážky laserem je uvedena kombinace parametrů 0,2 m/s a 10 µJ (Obrázek 35). Data byla nasbírána ze vzdálenosti l [µm]. Hloubka drážky je označena jako h [µm]. Výsledná drsnost pro tyto parametry je $Ra = 0,7$ µm.

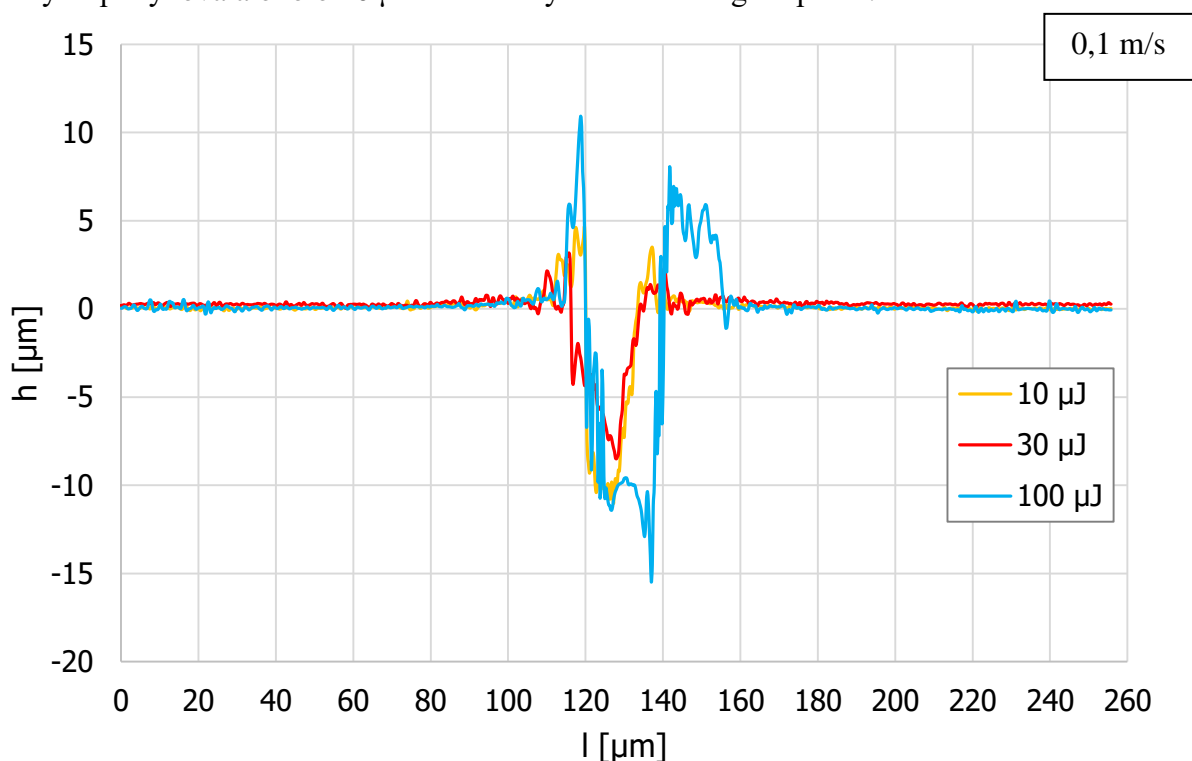


Obrázek 35: Výsledný profil drsnosti povrchu materiálu s parametry 0,2 m/s a 10 µJ

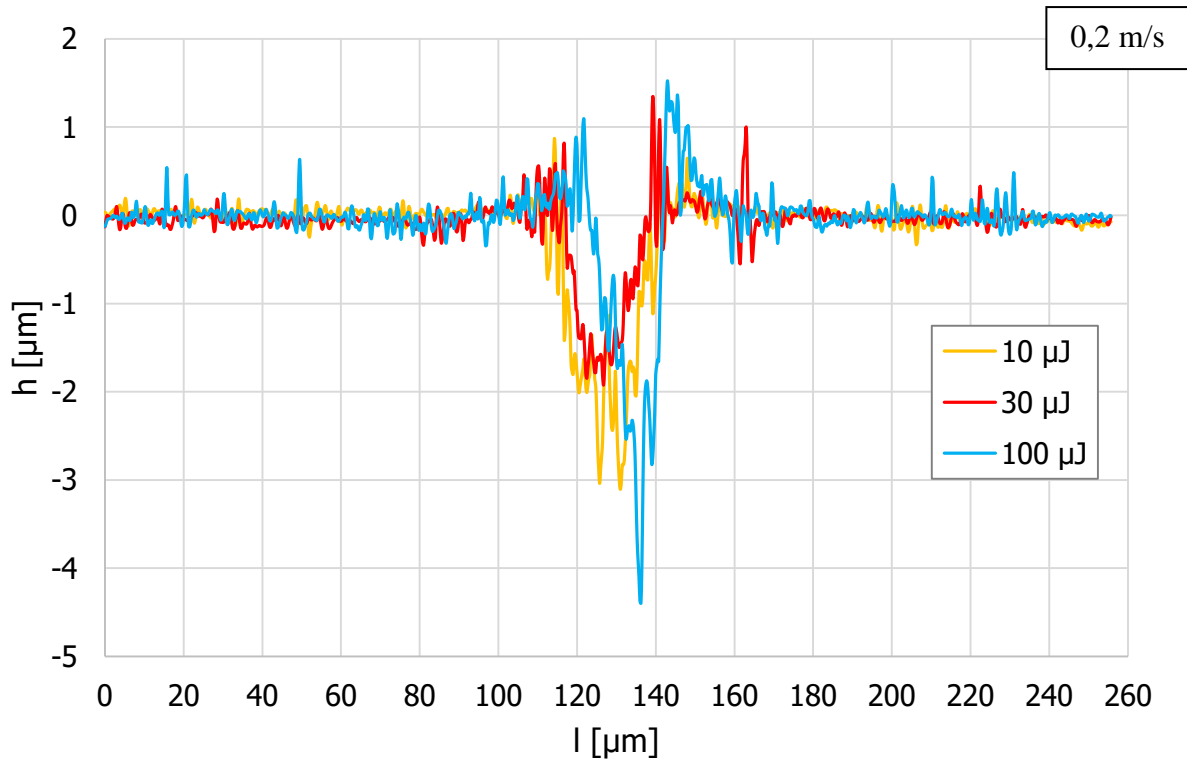
8.3.3 Množství odebraného materiálu

Množství odebraného materiálu je důležité pro zhodnocení efektivity procesu. V této kapitole je hodnoceno, kolik materiálu bylo odebráno celkově z plochy ($258 \times 258 \mu\text{m}^2$), kolik materiálu bylo odebráno na pulz ($\mu\text{m}^3/\text{pulz}$) a na jednotku energie ($\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$). Pro lepší představivost o množství materiálu, které bylo odebráno, byl proveden přepočít na mm^3/min . Tyto jednotky jsou bližší pro strojírenství.

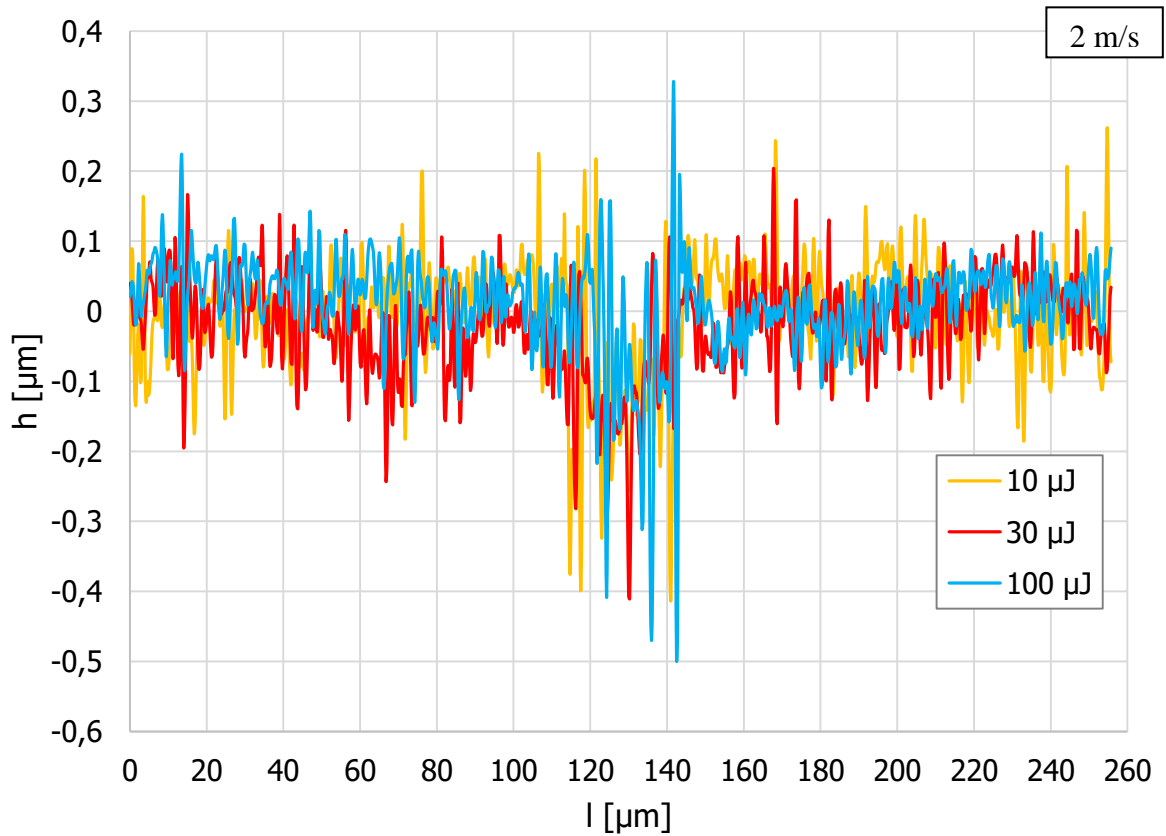
Pomocí konfokálního mikroskopu a programu pro vyhodnocení byly získány křivky profilů drážek. Pak bylo možné vyhodnocovat výsledné hodnoty odebraného materiálu. Postup pro vyhodnocení byl vysvětlen v kapitole 8.2.3 Množství odebraného materiálu. Jsou ukázány křivky profilů vždy pro jednu skenovací rychlost a energie v pulzu (10, 30 a 100 μJ) v grafu (Obrázek 36, Obrázek 37 a Obrázek 38). U skenovací rychlosti 0,1 m/s byl vidět nahnutý materiál na okrajích drážky. Toto nahnutí zvyšuje drsnost povrchu, protože sahá až do výšky 8 – 10 μm nad povrch vzorku (pro 100 μJ). Bylo také vidět, že se drážka prohlubovala se zvyšující se energií v pulzu. Průměrná hloubka pro všechny energie v pulzu se vyskytovala přes 10 μm . Pro skenovací rychlost 0,2 m/s také platilo, že je materiál nahnut na stranu drážky. Výška nahnutého materiálu nad povrchem byla pouze 1 až 1,5 μm , což výrazně méně ovlivňuje povrchovou drsnost. Hloubka drážky se také prohlubovala se zvyšující se energií v pulzu. Hloubka drážky se vyskytovala v rozmezí 2 až 4 μm v závislosti na energii v pulzu. U skenovací rychlosti 2 m/s byl pozorován profil drážky převážně v šumu, protože materiál byl obroben jednou z nejvyšších rychlostí a v tomto případě byl materiál odebrán pouze několika pulzy na každém místě. Pro dosažení větší hloubky by byl proces opakován podle potřeby. U této skenovací rychlosti nebyl pozorován materiál nahnutý na boku drážky. Hloubka drážky byla velmi malá. Pohybovala se okolo 0,5 μm . Šířka obrobené drážky se se změnou skenovací rychlosti a energie v pulzu nezvětšovala. Šířka drážky se pohybovala okolo 20 μm u všech rychlostí a energií v pulzu.



Obrázek 36: Ukázka profilu drážky se skenovací rychlostí 0,1 m/s



Obrázek 37: Ukázka profilu drážky se skenovací rychlostí 0,2 m/s



Obrázek 38: Ukázka profilu drážky se skenovací rychlostí 2 m/s

Nejprve se pracovalo s hodnotami, které byly získány z konfokálního mikroskopu. Jak už bylo uvedeno dříve, měřilo se ze tří míst. Zprůměrované hodnoty odebraného materiálu z dané plochy jsou uvedeny v Tabulce 6 pro všechny skenovací rychlosti a energie v pulzu.

Tabulka 6: Výsledné hodnoty množství odebraného materiálu V [μm^3] naměřené z plochy $258 \times 258 \mu\text{m}^2$

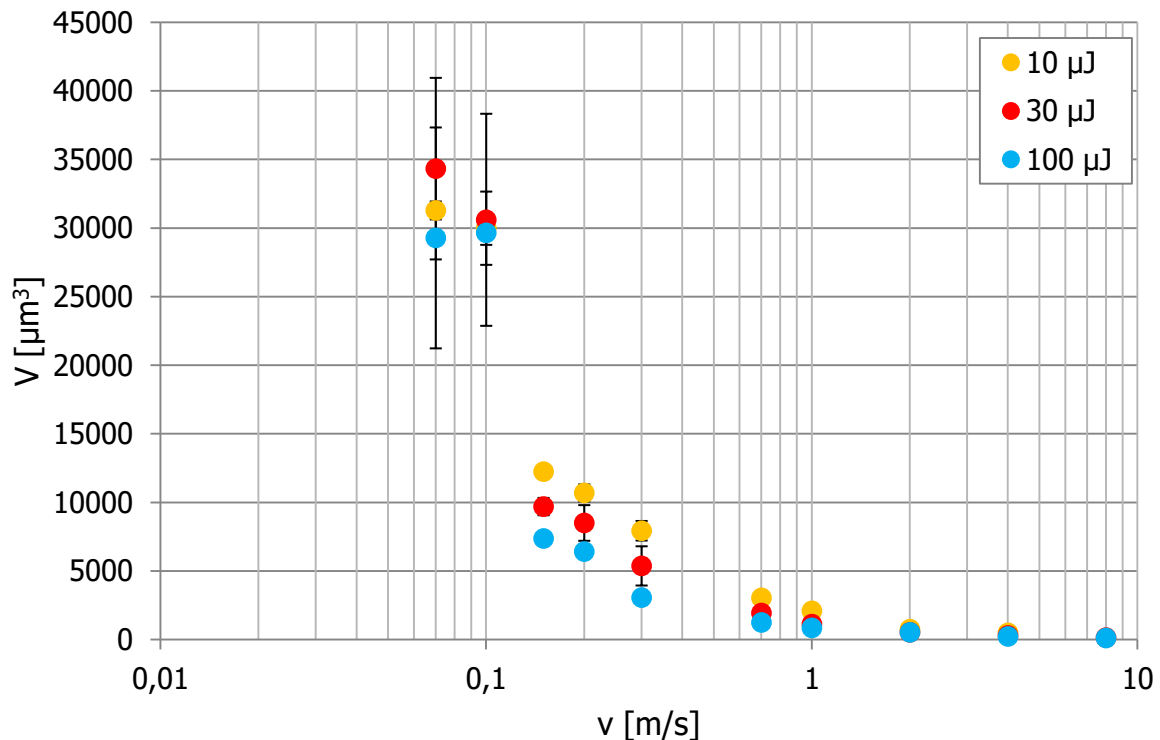
Skenovací rychlost [m/s]	Energie v pulzu [μJ]		
	10	30	100
0,07	31 289	34 337	29 286
0,1	29 993	30 606	29 655
0,15	12 244	9697	7370
0,2	10 693	8504	6416
0,3	7934	5372	3062
0,7	3042	1937	1249
1	2093	1124	854
2	756	531	527
4	491	299	227
8	393	141	114

Závislost množství odebraného materiálu V [μm^3] na skenovací rychlosti v [m/s] je zobrazena v grafu (Obrázek 39) se směrodatnými odchylkami. V grafu jsou tři oblasti a podle nich může být graf rozdělen na tři části. Zde platí stejné rozdělení jako u tepelné akumulace a drsnosti obrobené drážky.

První oblast se skenovací rychlostí 0,07 a 0,1 m/s má velmi podobné hodnoty odebraného objemu materiálu. S minimálními skenovacími rychlostmi bylo odebráno přibližně $30\,000 \mu\text{m}^3$ materiálu z dané plochy. Se zvýšením skenovací rychlosti následuje velký skok. Druhá oblast je tvořena skenovacími rychlostmi od 0,15 do 0,3 m/s. S těmito skenovacími rychlostmi bylo odebráno v průměru $8\,000 \mu\text{m}^3$ materiálu. Ve třetí oblasti (0,7 – 8 m/s) mohl být viděn pomalý pokles v hodnotách odebraného materiálu se zvyšující se skenovací rychlostí. S těmito nejvyššími rychlostmi bylo odebráno v průměru $1\,000 \mu\text{m}^3$ materiálu. Obecně platí, že se zvyšující se skenovací rychlostí množství odebraného materiálu klesá.

V první oblasti mohly být viděny hodnoty, které nezávisely na energii v pulzu. Naopak v dalších oblastech tato závislost mohla být viděna. Hodnoty odebraného materiálu pomocí dvou nejpomalejších rychlostí byly nejvyšší, ale z ostatních hledisek jako je tepelná akumulace a drsnost obrobené drážky jsou nevyhovující pro laserové mikroobrábění. Důvodem bylo velké ovlivnění tepelnou akumulací a tím došlo k degradaci a spálení materiálu. Vysoké hodnoty drsnosti nejsou vhodné. Pro další skenovací rychlosti od 0,15 m/s

a vyšší platí, že největší množství materiálu bylo odebráno s nejnižší energií v pulzu, ve které je hustota energie 2 J/cm^2 .



Obrázek 39: Závislost množství odebraného materiálu z plochy $258 \times 258 \mu\text{m}^2$ na skenovací rychlosti

Pro přepočítání na $\mu\text{m}^3/\text{pulz}$ bylo potřeba zjistit jednotlivé vzdálenosti středů mezi pulzy a dále z toho vypočítat počet pulzů. Vzdálenost středů mezi pulzy se vypočte jako podíl skenovací rychlosti a opakovací frekvence. Dané hodnoty vzdáleností středů pro všechny skenovací rychlosti a energie v pulzu udává Tabulka 7. Hodnoty jsou uvedeny v μm .

Tabulka 7: Vzdálenost středů mezi laserovými stopami (μm)

Energie v pulzu [μJ]	Opakovací frekvence [kHz]	Skenovací rychlost [m/s]									
		0,07	0,1	0,15	0,2	0,3	0,7	1	2	4	8
10	1176	0,06	0,09	0,1	0,2	0,3	0,6	0,9	1,7	3,4	6,8
30	454	0,2	0,2	0,3	0,4	0,7	1,5	2,2	4,4	8,8	17,6
100	140	0,5	0,7	1,1	1,4	2,1	5,0	7,1	14,3	28,6	57,1

Počet pulzů se vypočte jako podíl délky čáry na vzdálenosti ($258 \mu\text{m}$) a vzdálenosti středů. Výsledné hodnoty počtu pulzů pro všechny skenovací rychlosti a energie v pulzu jsou uvedeny v Tabulce 8.

Tabulka 8: Počet pulzů p na vzdálenosti 258 μm

Energie v pulzu [μJ]	Skenovací rychlost [m/s]									
	0,07	0,1	0,15	0,2	0,3	0,7	1	2	4	8
10	4300	2867	2580	1290	860	430	287	152	76	38
30	1290	1290	860	645	369	172	117	59	29	15
100	516	369	235	184	123	52	36	18	9	5

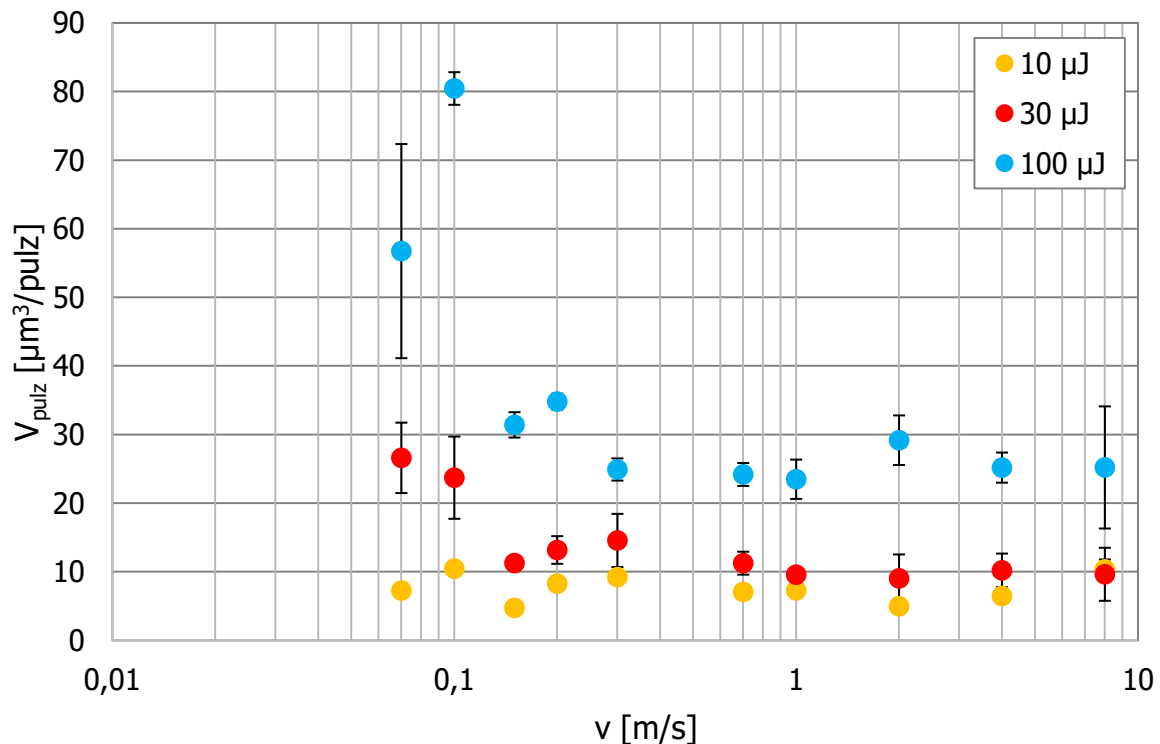
Hodnoty množství odebraného materiálu na pulz V_{pulz} [$\mu\text{m}^3/\text{pulz}$] byly vypočteny podle vzorce, kde V je množství odebraného materiálu z dané plochy a p je počet pulzů:

$$V_{pulz} = \frac{V}{p} \quad (3)$$

Výsledné hodnoty odebraného materiálu na pulz pro všechny skenovací rychlosti i energie v pulzu jsou uvedeny v Tabulce 9. Z těchto hodnot je i následně vytvořen graf (Obrázek 40).

Tabulka 9: Výsledné hodnoty množství odebraného materiálu na pulz V_{pulz} [$\mu\text{m}^3/\text{pulz}$]

Skenovací rychlost [m/s]	Energie v pulzu [μJ]		
	10	30	100
0,07	7,3	26,6	56,8
0,1	10,5	23,7	80,5
0,15	4,7	11,3	31,4
0,2	8,3	13,2	34,8
0,3	9,2	14,6	24,9
0,7	7,1	11,3	24,2
1	7,3	9,6	23,5
2	5,0	9,0	29,2
4	6,5	10,2	25,2
8	10,3	9,6	25,2



Obrázek 40: Závislost množství odebraného materiálu na pulz na skenovací rychlosti

Pro tuto závislost bylo zřejmé, že nejlepšího výsledku bylo dosaženo s energií v pulzu 100 μJ . Bylo to dáno tím, že na jeden laserový pulz byla do materiálu dodána nejvyšší energie v pulzu, a proto bylo odebráno největší množství materiálu. Pokles hodnot platil i pro klesající energii v pulzu. Tyto hodnoty sloužily k přepočtu.

V odborných člancích se uvádí efektivita ablace V_{ef} [$\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$] označovaná „ablation rate“. Ve strojírenství se častěji setkáváme s veličinou, která popisuje odběr materiálu za minutu (efektivita odběru materiálu) V_{eff} [mm^3/min], označovanou „removal rate“. Tyto dvě veličiny slouží k určení efektivity procesu.

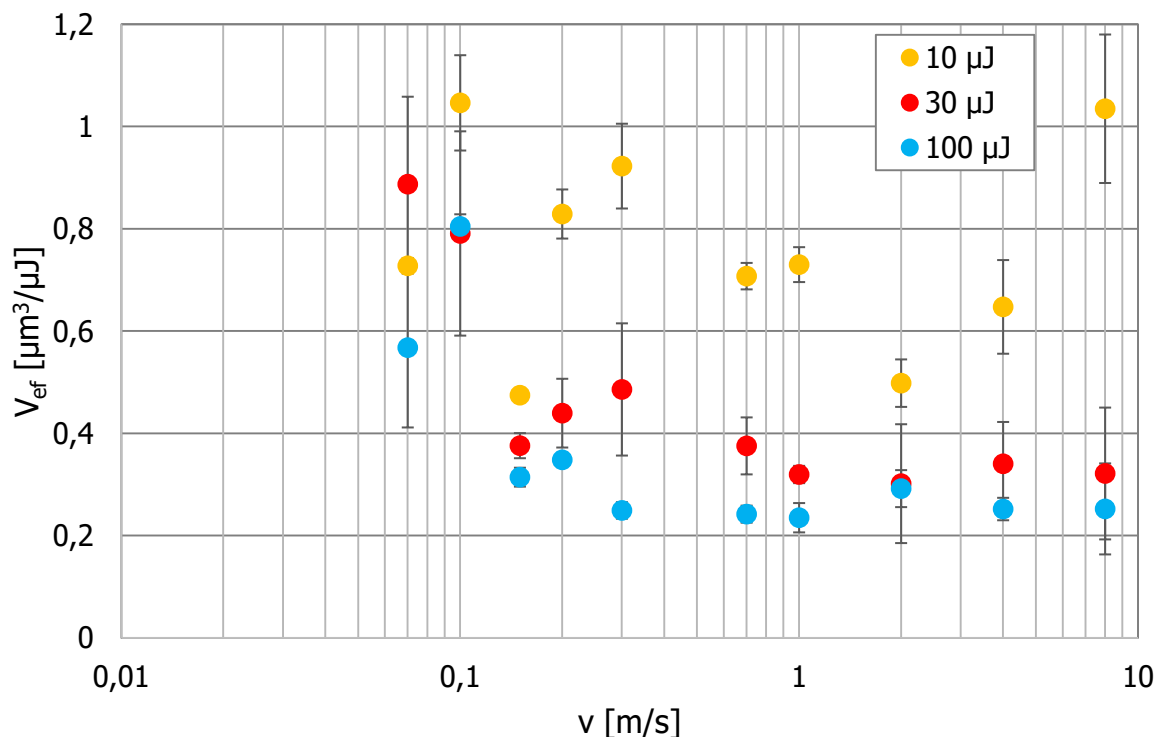
Pro toto zjištění byl nejprve proveden výpočet, pro který bylo nutné znát hodnotu množství odebraného materiálu na pulz V_{pulz} a energii v pulzu Q .

$$V_{ef} = \frac{V}{p} \cdot 1 = \frac{V_{pulz}}{Q} \quad (4)$$

Po získání těchto hodnot V_{ef} bylo možné sestavit graf se závislostí na skenovací rychlosti v [m/s] (Obrázek 41). Tabulka 10 znázorňuje vypočtené hodnoty efektivy ablace V_{ef} [$\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$].

Tabulka 10: Výsledné hodnoty efektivity ablace $V_{ef} [\mu\text{m}^3/\mu\text{J}]$

Skenovací rychlost [m/s]	Energie v pulzu [μJ]		
	10	30	100
0,07	0,73	0,89	0,57
0,1	1,05	0,79	0,80
0,15	0,47	0,38	0,31
0,2	0,83	0,44	0,35
0,3	0,92	0,49	0,25
0,7	0,71	0,38	0,24
1	0,73	0,32	0,23
2	0,50	0,30	0,29
4	0,65	0,34	0,25
8	1,03	0,32	0,25



Obrázek 41: Závislost efektivity ablace na skenovací rychlosti

Z tohoto grafu lze vyvodit závěr, že nejvíce efektivní byla energie v pulzu 10 μJ (ze zde použitých) s hodnotami od 0,47 – 1,05 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$. Pokud graf rozdělíme na stejné tři oblasti, jako tomu bylo u tepelné akumulace i drsnosti obrobeneé drážky, tak lze říci, že nejmenší skenovací

rychlosti (0,07 a 0,1 m/s) nějak výrazně nevynikaly oproti ostatním rychlostem, jako tomu bylo u hodnocení tepelné akumulace a drsnosti obrobené drážky. Stále platí, že při těchto rychlostech nebyla viděna závislost na energii v pulzu. Hodnoty pro tyto rychlosti byly pozorovány v rozmezí 0,57 až 1,05 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$. Pro následující druhou oblast, kde byly zařazeny skenovací rychlosti (0,15 – 0,3 m/s) byly hodnoty rozdílné. Pro rychlost 0,15 m/s se hodnoty pohybovaly od 0,31 do 0,47 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$. Pro skenovací rychlosti 0,2 a 0,3 m/s byla pro energii v pulzu 10 μJ výrazně vyšší efektivita (0,83 až 0,92 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$) než pro vyšší energie v pulzu (0,25 – 0,49 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$). Ve třetí oblasti (0,7 – 8 m/s) byly výsledky podobné. Pro energii v pulzu 10 μJ byla vyšší efektivita (0,50 – 1,03 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$) než pro vyšší energie v pulzu (0,23 – 0,38 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$). Nejvyšší efektivita odběru materiálu byla naměřena pro skenovací rychlost 0,1 m/s a energii v pulzu 10 μJ , a to 1,05 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$. Následující nejvyšší hodnota byla dosažena skenovací rychlostí 8 m/s a energií v pulzu 10 μJ , a to 1,03 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$. Všechny dosažené hodnoty platí pro jeden sken laserového paprsku přes materiál.

Podle těchto výsledků může být řečeno, že nejvhodnější kombinací parametrů pro laserové mikroobrábění je skenovací rychlost 8 m/s s energií v pulzu 10 μJ . Tato kombinace parametrů měla velmi dobré výsledky drsnosti, kde byla dosažena hodnota $R_a = 0,2 \mu\text{m}$, tak i hodnoty efektivy při obrábění, kde byla dosažena jedna z nejvyšších hodnot 1,03 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$. Také byla naměřena nízká hodnota teploty tepelné akumulace (500 °C). Dalšími vhodnými parametry jsou skenovací rychlosti 0,2 a 0,3 m/s s energií v pulzu 10 μJ (případně 30 μJ). U těchto kombinací byla dosažena vyšší hodnota teploty tepelné akumulace (860 – 960 °C) a i vyšší drsnost ($R_a = 0,5 - 0,7 \mu\text{m}$). Pokud by tyto hodnoty drsnosti vyhovovaly, mohly by být tyto parametry také použity pro laserové mikroobrábění. Hodnoty efektivy jsou o něco nižší, než jsou pro skenovací rychlost 8 m/s a energii v pulzu 10 μJ (0,83 – 0,92 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$).

Poté byla z efektivy ablace V_{ef} [$\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$] vypočtena efektivita odběru materiálu V_{eft} [mm^3/min].

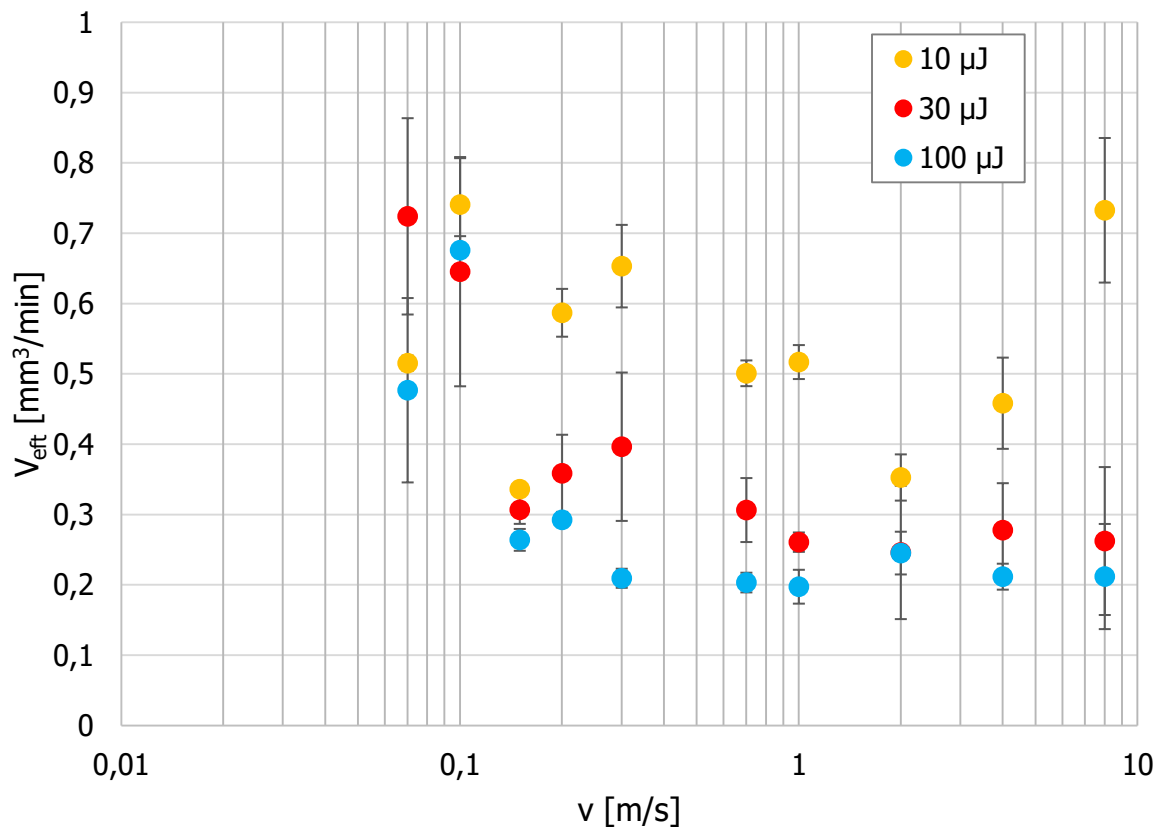
$$V_{eft} = \frac{V_{ef} \cdot P \cdot 1000000 \cdot 60}{1000000000} \quad (5)$$

P je výkon laseru, který je použit pro danou energii v pulzu. Výkon laseru se vypočítal vynásobením energie v pulzu s opakovací frekvencí. Pro energii v pulzu 10 μJ byl použit výkon 11,8 W, pro 30 μJ bylo použito 13,6 W a pro 100 μJ 14 W. Tento přepočten byl proveden pro lepší představivost a přiblížení se k jednotkám, které se používají ve strojírenství.

Tabulka 11 uvádí přepočtené hodnoty, které jsou následně zobrazeny v grafu (Obrázek 42). Hodnoty efektivy odběru materiálu pro energii v pulzu 10 μJ jsou nižší v poměru k ostatním energiím, protože laser má při této energii v pulzu nižší průměrný výkon. Z tohoto grafu je možné usoudit stejné závěry jako z předešlého grafu (Obrázek 41). Energie v pulzu 10 μJ je neefektivnější z pohledu odebraného materiálu za jednotku času.

Tabulka 11: Výsledné hodnoty efektivity odběru materiálu V_{eff} [mm^3/min]

Skenovací rychlost [m/s]	Energie v pulzu [μJ]		
	10	30	100
0,07	0,52	0,72	0,48
0,1	0,74	0,65	0,68
0,15	0,34	0,31	0,26
0,2	0,59	0,36	0,29
0,3	0,65	0,40	0,21
0,7	0,50	0,31	0,20
1	0,52	0,26	0,20
2	0,35	0,25	0,25
4	0,46	0,28	0,21
8	0,73	0,26	0,21



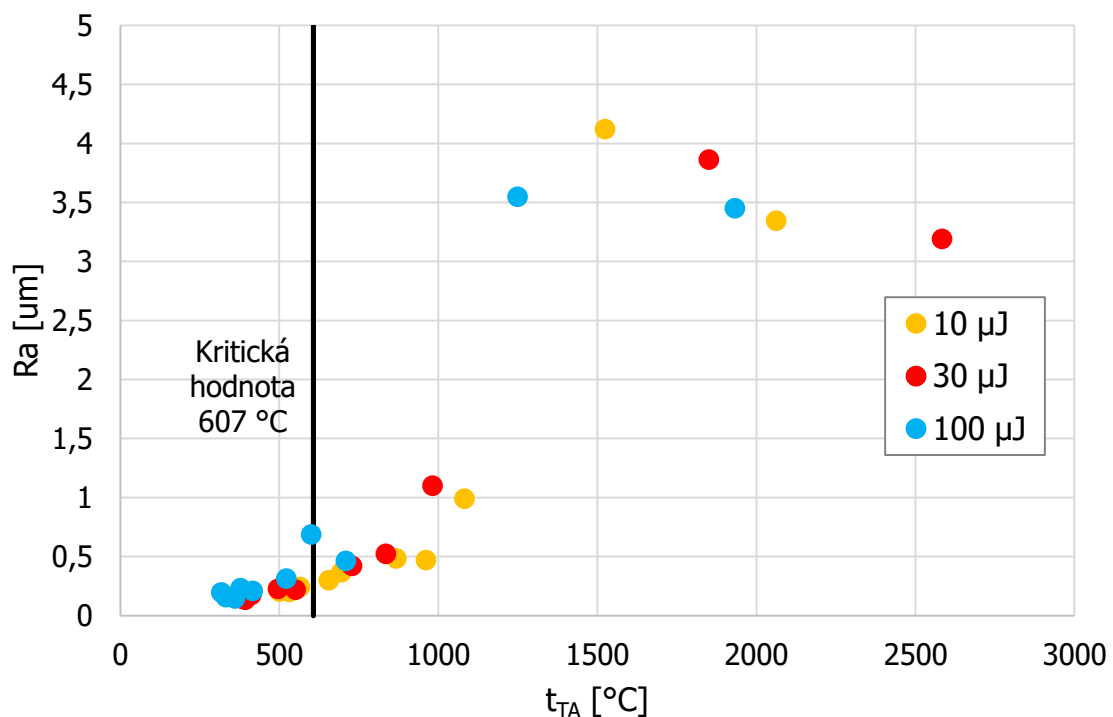
Obrázek 42: Závislost efektivity odběru materiálu na skenovací rychlosti

8.4 Diskuze dosažených výsledků

V této kapitole jsou shrnuty a analyzovány výsledky, které byly dosaženy v této práci. Kapitola je hlavně zaměřena na vliv tepelné akumulace na drsnost obrobene drážky a na efektivitu obrábění.

Jako první byla analyzována závislost drsnosti obrobene drážky R_a na tepelné akumulaci jako hodnotě teploty t_{TA} [°C] (Obrázek 43). Lze říci, že laserové mikroobrábění patří mezi velmi jemné obrábění, při kterém lze dosáhnout velmi nízkých hodnot drsnosti. Důkazem toho jsou výsledné hodnoty drsnosti obrobene drážky v této práci. S určitými parametry byla dosažena drsnost $R_a = 0,1 - 0,8 \mu\text{m}$ (viz. Tabulka 5). Tyto hodnoty jsou v běžné strojařské praxi dosahovány dokončovacími metodami, jako je například broušení, lapování, honování nebo superfinišování.

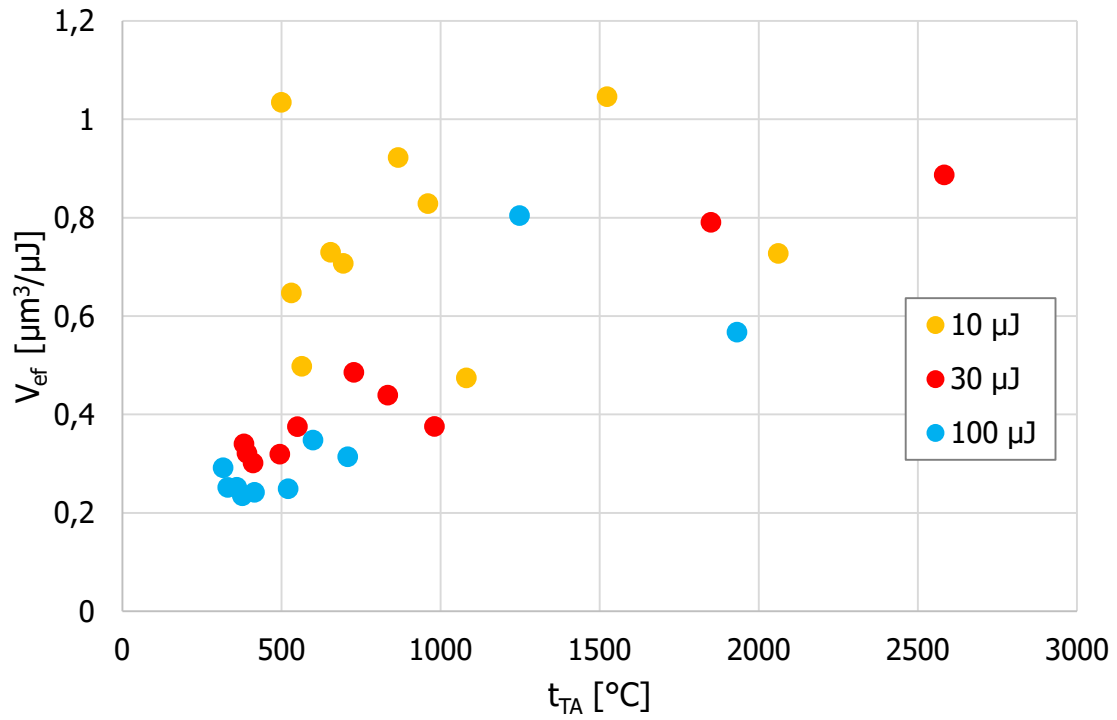
Tuto závislost lze rozdělit také na tři oblasti. První oblast zahrnuje hodnoty teploty do 550 °C. Při dosažení této teploty se drsnost pohybovala do $R_a = 0,3 \mu\text{m}$. Do druhé oblasti patří teploty 600 – 1100 °C. Při těchto teplotách byla dosažena drsnost $R_a = 0,5 - 1 \mu\text{m}$. Do třetí oblasti byly zahrnuty teploty vyšší než 1100 °C. U takto vysokých teplot docházelo k výraznému zvýšení drsnosti ($R_a = 3 - 4 \mu\text{m}$). Důvodem mohl být var a spálení materiálu. Pro zhodnocení této závislosti byla použita kritická teplota 607 °C. Tato kritická teplota byla definována experimentálně pomocí stacionárního ohřevu celého vzorku [29]. Teplota 607 °C udává, že pokud je překročena, výsledkem je vyšší drsnost. Toto tvrzení souhlasí s výsledky této práce. Při dosažení nižších teplot, než je kritická hodnota, se drsnost pohybovala v rozmezí $R_a = 0,1 - 0,3 \mu\text{m}$. Pro vyšší teploty (přibližně do 1000 °C) byla naměřena drsnost $R_a = 0,4 - 1 \mu\text{m}$. Pro zbývající teploty (okolí teploty tavení) byla naměřena nejvyšší drsnost $R_a = 3 - 4 \mu\text{m}$. Uvedené výsledky potvrzují správnost provedené kalibrace vyvinutého měřicího systému.



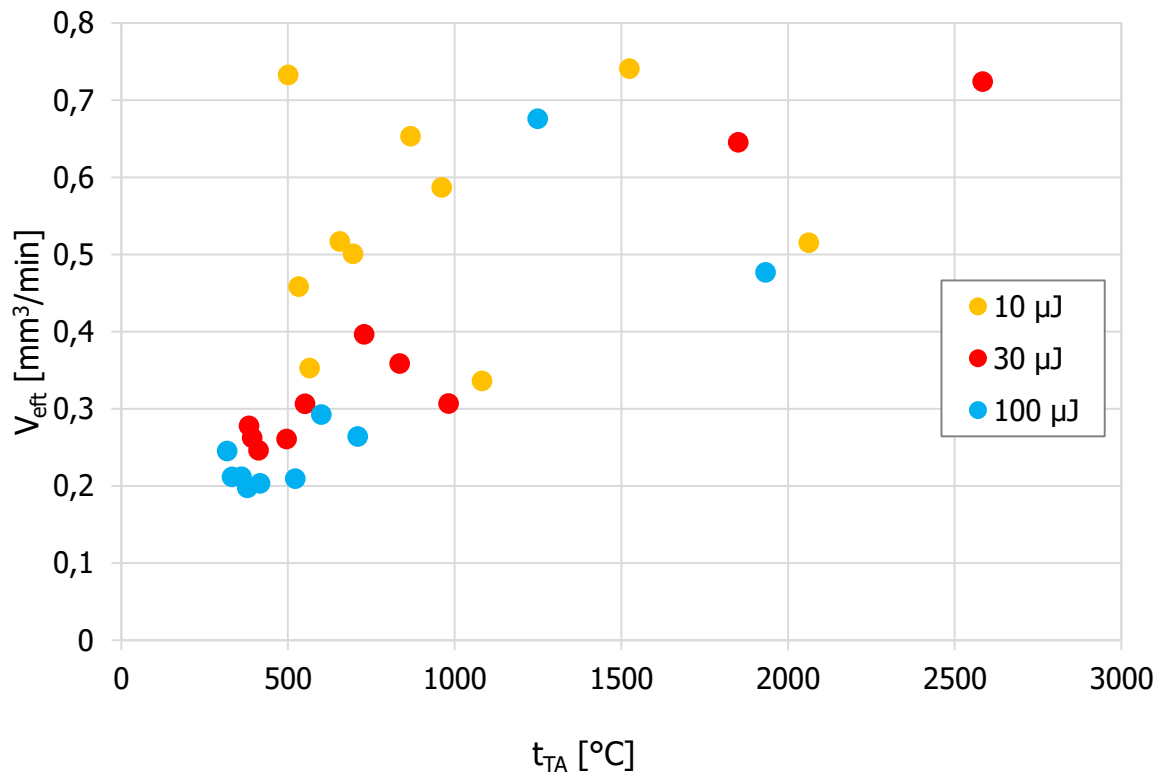
Obrázek 43: Závislost drsnosti obrobene drážky na hodnotě teploty tepelné akumulace

Dále byly analyzovány závislosti efektivity obrábění V_{ef} [$\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$] a V_{eff} [mm^3/min] na hodnotě teploty tepelné akumulace t_{TA} [$^{\circ}\text{C}$] (Obrázek 44 a

Obrázek 45). Z hodnot je zřejmé, že nejvíce efektivní byla energie v pulzu 10 μJ . To odpovídalo pro oba grafy. Nejvyšší efektivita obrábění 1,05 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ (0,74 mm^3/min) byla naměřena pro hodnotu, která se nacházela na hranici 1500 $^{\circ}\text{C}$. Z důvodu vysoké teploty, která byla nad bodem tavení, nebyla tato hodnota počítána jako nejlepší výsledek této práce. Nejvyšší efektivita vhodná pro laserové mikroobrábění byla pozorována v rozmezí teplot 500–1000 $^{\circ}\text{C}$, kde se hodnoty pohybovaly až do 1,03 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$, respektive 0,73 mm^3/min . Pro energii v pulzu 30 μJ byly dosaženy nižší hodnoty efektivity (průměrně 0,5 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ a 0,4 mm^3/min), než bylo dosaženo pro energii v pulzu 10 μJ . Pro energii v pulzu 100 μJ byly dosaženy nejnižší hodnoty efektivity obrábění (pro hodnoty teploty do 1000 $^{\circ}\text{C}$). Obecně lze konstatovat, že zvýšená teplota mírně zvyšuje efektivitu, ale výrazně zvyšuje drsnost a nejlépe je použít malou energii v pulzu a vysokou frekvenci opakování pulzů.



Obrázek 44: Závislost efektivity ablace na hodnotě teploty tepelné akumulace



Obrázek 45: Závislost efektivity odběru materiálu na hodnotě teploty tepelné akumulace

9 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo zjištění vlivu tepelné akumulace na laserové mikroobrábění. Byla hodnocena drsnost obrobené drážky a množství odebraného materiálu během procesu v závislosti na tepelné akumulaci.

Tepelná akumulace (IR signál) byla změřena pomocí vyvinutého měřicího systému a následně byla přepočtena na teplotu ve stupních Celsia. Byly vyhodnoceny hodnoty drsnosti obrobené drážky a množství odebraného materiálu. Výsledná data navzájem souvisela a grafy všech zkoumaných veličin mohly být rozděleny do tří oblastí podle rychlosti skenování laserového svazku.

První oblast (skenovací rychlost 0,07 a 0,1 m/s) zahrnovala vysoký objem odebraného materiálu ($30\,000\ \mu\text{m}^3$) na jeden přejezd a významné tavení materiálu s kapičkami na okrajích drážky, které zvyšovaly povrchovou drsnost. Drsnost obrobené drážky dosahovala vysokých hodnot $R_a = 3 - 4\ \mu\text{m}$. Bylo zde vysoké ovlivnění tepelnou akumulací (1300 až $2600\ \text{°C}$), kde docházelo i k přehřátí a spálení materiálu během procesu. S těmito skenovacími rychlostmi byla dosažena vysoká efektivita obrábění, ale tyto parametry nejsou vhodné pro laserové mikroobrábění z důvodu dosažení vysokých teplot.

Ve druhé oblasti ($0,15$ až $0,3\ \text{m/s}$) bylo odebráno střední množství materiálu (3000 až $12\,000\ \mu\text{m}^3$) a bylo pozorováno velmi nízké tavení materiálu, pokud se tam vůbec vyskytovalo. Drsnost obrobené drážky se pohybovala v rozmezí $R_a = 0,3 - 0,7\ \mu\text{m}$, což lze přirovnat k hodnotám, které jsou dosahovány dokončovacími metodami. Tepelná akumulace se zde vyskytovala, ale lze říci, že napomáhala k efektivnějšímu odběru materiálu během procesu. Hodnoty teploty tepelné akumulace se pohybovaly mezi $520 - 1100\ \text{°C}$. Pokud by hodnoty drsnosti R_a vyhovovaly požadavkům, mohly by být tyto parametry doporučeny k laserovému obrábění. Nejlépe vycházely v této oblasti skenovací rychlosti $0,2 - 0,3\ \text{m/s}$ s energií v pulzu $10\ \mu\text{J}$, kde bylo dosaženo velmi efektivního obrábění ($0,83 - 0,92\ \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ a $0,59 - 0,65\ \text{mm}^3/\text{min}$).

Ve třetí oblasti ($0,7 - 8\ \text{m/s}$) byla tepelná akumulace nízká. Hodnoty teploty tepelné akumulace byly naměřeny v rozmezí $315 - 700\ \text{°C}$. S těmito skenovacími rychlostmi byly dosaženy nejlepší hodnoty drsnosti $R_a = 0,1 - 0,4\ \mu\text{m}$. Efektivita obrábění byla pro energii v pulzu $10\ \mu\text{J}$ v rozmezí $0,5 - 1,03\ \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ a $0,35 - 0,73\ \text{mm}^3/\text{min}$. Kombinace parametrů $8\ \text{m/s}$ a energie v pulzu $10\ \mu\text{J}$ vycházela jako nejlepší varianta pro laserové mikroobrábění ze zkoušených v této práci. Hodnoty tepelné akumulace zde dosahovaly $500\ \text{°C}$ (pod kritickou hodnotou $607\ \text{°C}$ [29]) a zároveň byla dosažena nízká hodnota drsnosti $R_a = 0,2\ \mu\text{m}$. Pro tuto kombinaci vyšla nejefektivnější hodnota pro laserové mikroobrábění $1,03\ \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ a $0,73\ \text{mm}^3/\text{min}$.

Velmi zajímavým výsledkem práce je výrazná korelace drsnosti obrobené drážky a hodnoty tepelné akumulace. Pro teploty pod kritickou hodnotou $607\ \text{°C}$ se drsnost pohybovala v rozmezí $R_a = 0,1 - 0,3\ \mu\text{m}$. Pro vyšší teploty (přibližně do $1000\ \text{°C}$) byla naměřena drsnost převážně $R_a = 0,4 - 0,5\ \mu\text{m}$ (až $1\ \mu\text{m}$). Pro vyšší teploty (okolí teploty tavení a výše) byla naměřena nejvyšší drsnost $R_a = 3 - 4\ \mu\text{m}$. Dalším zajímavým výsledkem je, že zvýšená

teplota akumulace mírně zvyšuje efektivitu obrábění (ale zvyšuje drsnost). Hlavně ale efektivita závisí na energii v pulzu.

V diplomové práci získané výsledky měření teplot při procesu laserového mikroobrábění jsou nové a jsou v souladu s výsledky uváděnými v odborné literatuře, dosaženými jinými přístupy a metodami. Podobné měření nebylo doposud v literatuře publikováno. Výsledky ukazují na další možnosti měřicího systému, který by mohl sloužit pro kontrolu a řízení procesu mikroobrábění s ultrakrátkými laserovými pulzy. Doporučené parametry mohou pomoci při laserovém mikroobrábění. Pro budoucí studie tepelné akumulace by měly být provedeny další experimenty. Například vytváření konkrétní struktury, kde by byla požadována určitá hloubka a u ní by se hodnotila drsnost a efektivita obrábění.

10 Reference

- [1] Historie vývoje laseru. 20.1.2020 [online]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/historie-vyvoje-laseru>
- [2] Laser a jeho využití. 20.1.2020 [online]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
- [3] Základní princip laseru a jejich dělení. 20.1.2020 [online]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [4] Stimulovaná emise záření. 20.1.2020 [online]. Dostupné z: <http://lekarske.slovniky.cz/pojem/stimulovana-emise-zareni>
- [5] BUCHFINK, Gabriela. *THE LASER AS A TOOL*. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2007. ISBN 9783834330727.
- [6] Laserová terminologie a jejich úskalí. 6.6.2020 [online]. Dostupné z: <https://elektro.oneindustry.one/vyznate-se-v-laserove-terminologii-a-jejich-uskalich/>
- [7] Rozdělení laserů. 20.1.2020 [online]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- [8] RP Photonics Encyclopedia. 20.1.2020 [online]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/nanosecond_lasers.html
- [9] HAMAD, Hassan Abubaker. Effects of Different Laser Pulse Regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the Ablation of Materials for Production of Nanoparticles in Liquid Solution. *InTech*. 2016.
- [10] SCHILLE, Joerg, Robby EBERT, Udo LOESCHNER, Peter REGENFUSS, Tino SUESS a Horst EXNER. Micro structuring with highly repetitive ultra short laser pulses. In: *LPM2008*. 2008, s. 1–6.
- [11] Dělení typů a druhů laserů. 20.1.2020 [online]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
- [12] Laserové zpracování materiálů. 20.1.2020 [online]. Dostupné z: <http://dp.bajaja.net/05.html>
- [13] MOSKAL, Denys. *Thermo-physical processes and ultrashort pulse laser scanning methods in surface texturing*. B.m., 2019. Ph.D. Dissertation, University of West Bohemia in Pilsen.
- [14] KERSE, Can, Hamit KALAYCIOĞLU, Parviz ELAHI, Barbaros ÇETIN, Denizhan K KESIM, Önder AKÇAALAN a Seydi YAVAŞ. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses. *Nature Publishing Group* [online]. 2016, **537**(7618), 84–88. ISSN 0028-0836. Dostupné z: doi:10.1038/nature18619
- [15] 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. ISSN 1875-3892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2011.03.128
- [16] CHICKOV B.N., MOMMA C., NOLTE S., ALVENSLEBEN VON F., Tunnermann A. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. 1996, **115**, 109–115.
- [17] Mikroobrábění. 20.1.2020 [online]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/mikroobrabeni/>

- [18] MARTAN, Jiří, Denys MOSKAL a Martin KUČERA. Laser surface texturing with shifted method — Functional surfaces at high speed. *Laser Applications* [online]. 2019, **022507**(March). Dostupné z: doi:10.2351/1.5096082
- [19] RACIUKAITIS, Gediminas, Marijus BRIKAS, Paulius GECYS a Mindaugas GEDVILAS. Accumulation effects in laser ablation of metals with high-repetition-rate lasers. In: *Proceedings of SPIE* [online]. 2008, s. 70052L. ISBN 3705264486. Dostupné z: doi:10.1117/12.782937
- [20] MARCZAK, J. Micromachining and patterning in micro/nano scale on macroscopic areas [online]. 2015, **60**(3). Dostupné z: doi:10.1515/amm-2015-0368
- [21] FAAS, Sebastian, Uwe BIELKE, Rudolf WEBER a Thomas GRAF. Prediction of the surface structures resulting from heat accumulation during processing with picosecond laser pulses at the average power of 420 W. *Applied Physics A* [online]. 2018, **124**(9), 0. ISSN 14320630. Dostupné z: doi:10.1007/s00339-018-2040-4
- [22] NEUENSCHWANDER, Beat, Beat JAEGGI, Markus ZIMMERMANN, Guido HENNIG a Surface TECHNOLOGIES. Influence of particle shielding and heat accumulation effects onto the removal rate for laser micromachining with ultra-short pulses at high repetition rates. In: *Proceedings of ICALEO Conference*. nedatováno.
- [23] SCHILLE, Joerg, Lutz SCHNEIDER, Mathias MUELLER a Udo LOESCHNER. Highspeed Laser Micro Processing using Ultrashort Laser Pulses. In: *Proceedings of LAMP2013 - the 6th International Congress on Laser Advance Materials Processing*. nedatováno, s. 1–8.
- [24] WEBER, Rudolf, Thomas GRAF, Christian FREITAG, Anne FEUER, Taras KONONENKO a Vitaly I. KONOVOV. Processing constraints resulting from heat accumulation during pulsed and repetitive laser materials processing. *Optics Express* [online]. 2017, **25**(4), 3966. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.25.003966
- [25] HIDAI, Hirofumi, Souta MATSUSAKA, Akira CHIBA a Noboru MORITA. Heat accumulation in microdrilled glass from ultraviolet laser ablation. *Applied Physics A: Materials Science and Processing* [online]. 2015, 357–367. ISSN 1432-0630. Dostupné z: doi:10.1007/s00339-015-9196-y
- [26] SCHILLE, Joerg. *Investigation of micromachining using a high repetition rate femtosecond fibre laser*. B.m., 2013. Ph.D. Thesis, University of Manchester.
- [27] WEBER, Rudolf, Thomas GRAF, Peter BERGER, Volkher ONUSEIT, Margit WIEDENMANN, Christian FREITAG a Anne FEUER. Heat accumulation during pulsed laser materials processing. *Optics Express* [online]. 2014, **22**(23), 28232. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.22.028232
- [28] SCHILLE, J, L SCHNEIDER, L HARTWIG a U LOESCHNER. High Rate Laser Processing of Metals Using High Average Power Ultrashort Pulse Lasers. *Old City Publishing*. 2017, **36**, 31–50.
- [29] BAUER, Franziska, Andreas MICHALOWSKI, Thomas KIEDROWSKI a Stefan NOLTE. Heat accumulation in ultra-short pulsed scanning laser ablation of metals. *Optics Express* [online]. 2015, **23**(2), 1035. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.23.001035
- [30] FAAS, Sebastian, Rudolf WEBER a Thomas GRAF. Heat accumulation controlled surface functionalization of stainless steel with structuring rates up to 500 mm²/s. In: *Procedia CIRP* [online]. B.m.: Elsevier B.V., 2018, s. 324–327. ISBN 4971168566881. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2018.08.125

- [31] WEBER, Rudolf a Beat NEUENSCHWANDER. Residual heat during laser ablation of metals with bursts of ultra-short pulses. *Adv. Opt. Techn.* 2018, **7**(3), 175–182.
- [32] SCHILLE, Joerg, Lutz SCHNEIDER, André STREEK, Sascha KLOETZER a Udo LOESCHNER. High-throughput machining using high average power ultrashort pulse lasers and ultrafast polygon scanner. nedatováno.
- [33] 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. ISSN 1875-3892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2011.03.118
- [34] KUČERA, M., J. MARTAN a A. FRANC. Time-resolved temperature measurement during laser marking of stainless steel. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2018, **125**, 1061–1068. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.137
- [35] KUČERA, Martin. *Fyzikální procesy při laserovém značení a vliv na korozní odolnost korozivzorných ocelí*. B.m., 2016. disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni.
- [36] MARTAN, J, N SEMMAR a C BOULMER-LEBORGNE. IR Radiometry Optical System View Factor and Its Application to Emissivity Investigations of Solid and Liquid Phases. *Int J Thermophys* [online]. 2007, **28**, 1342–1352. Dostupné z: doi:10.1007/s10765-007-0264-1
- [37] MARTAN, J, O CIBULKA a N SEMMAR. Nanosecond pulse laser melting investigation by IR radiometry and reflection-based methods. *Applied Surface Science* [online]. 2006, **253**, 1170–1177. Dostupné z: doi:10.1016/j.apsusc.2006.01.077
- [38] RYBÁR, Radim, Martin BEER a Michal KALAVSKÝ. Development of heat accumulation unit based on heterogeneous structure of MF / PCM for cogeneration units. *Journal of Energy Storage* [online]. 2019, **21**(July 2018), 72–77. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2018.11.004
- [39] Planckova konstanta. 20.1.2020 [online]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/lab/planck/2_cteni_2.php
- [40] TESAŘ, J. *Termografie v plazmových a laserových technologiích*. B.m., 2014. disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni.
- [41] Wienův posunovací zákon. 18. 3. 2020 [online]. Dostupné z: http://aldebaran.feld.cvut.cz/vyuka/fyzika_2/min/wienuv_posunovaci_zakon.pdf
- [42] ŠULC, Jan. Úvod do laserové techniky. 9.2.2020 [online]. Dostupné z: http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/ult_sl_05.pdf
- [43] MARTAN, Jiří. *Thermo-kinetic model of laser-material interaction in the form of criteria equations*. B.m., 2005. Ph.D. Thesis, University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic, University of Orleans, France.
- [44] VIGO. 18. 3. 2020 [online]. Dostupné z: <https://vigo.com.pl/en/newsletter/unique-technology-of-immersion-in-vigo-system-detectors/>
- [45] EdgeWave PX. 18. 3. 2020 [online]. Dostupné z: <https://www.edge-wave.de/web/wp-content/uploads/PXweb.pdf>
- [46] INOX. 19. 3. 2020 [online]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
- [47] MARTAN, J a O HERVÉ. Two-detector measurement system of pulse photothermal radiometry. *Journal of Applied Physics* [online]. 2007, **102**, 1–6. Dostupné z: doi:10.1063/1.2778642

- [48] MARTAN, Jiří, Denys MOSKAL, Lucie PROKEŠOVÁ a Milan HONNER. Detection of heat accumulation in laser surface texturing by fast infrared detectors. In: *Proceedings of Lasers in Manufacturing (LIM 2019)*. Munich, Germany: WLT, 2019, s. 1–7.
- [49] Edmund Optics. 18. 3. 2020 [online]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/p/50mm-dia-x-3mm-thick-3-12mum-ar-coated-gewindow/17291>
- [50] Teledyne LeCroy - WavePro 404HD. 18. 3. 2020 [online]. Dostupné z: <https://teledynelecroy.com/oscilloscope/wavepro-hd-oscilloscope/wavepro-404hd>
- [51] Olympus LEXT OLS5000. 18. 3. 2020 [online]. Dostupné z: [https://www.olympus-ims.com/cs/metrology/ols5000/#!cms\[focus\]=cmsContent14028](https://www.olympus-ims.com/cs/metrology/ols5000/#!cms[focus]=cmsContent14028).
- [52] Konfokální mikroskop. 18. 3. 2020 [online]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Konfokální_mikroskop
- [53] Elektronová mikroskopie. 19. 3. 2020 [online]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/nmr/mol_model_bioinfo/lekce/mikroskopie.pdf
- [54] ALL, C. Quanta 200 SEM EDAX Genesis EDS. 18. 3. 2020 [online]. 2012. Dostupné z: http://usedsems.com/yahoo_site_admin/assets/docs/Quanta200_EDAXsm.14264223.pdf

11 Přílohy

Příloha 1: Snímky ze skenovacího elektronového mikroskopu pro všechny skenovací rychlosti a energie v pulzu

