

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Laserové mikroobrábění obecných ploch

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Tomáš Volák

Studijní obor: Výrobní inženýrství

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

Konzultant práce: Ing. Adam Čermák, Ph.D.

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Volák** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **483521**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Laserové mikroobrábění obecných ploch

Název diplomové práce anglicky:

Laser micromachining of freeform surfaces

Pokyny pro vypracování:

1. Podstata technologie laserového mikroobrábění.
2. Přehled způsobů obrábění obecných ploch laserem.
3. Stanovení postupu a definice okrajových podmínek mikroobrábění.
4. Experiment vlivu parametrů procesu na výsledek mikroobrábění.
5. Demonstrace postupu na vybraném dílci.

Seznam doporučené literatury:

Advances in Laser Materials Processing. Woodhead Publishing (2017), ISBN 978-0-08-101252-9.
BUCHFINK, Gabriela. The laser as a tool: a light beam conquers industrial production. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2007. ISBN 978-3-8343-3072-7.
CHENG, Jian, Chang-sheng LIU, Shuo SHANG, Dun LIU, Walter PERRIE, Geoff DEARDEN a Ken WATKINS. A review of ultrafast laser materials micromachining. 2013, 46, 88-102. ISSN 00303992. Dostupné z:
doi:10.1016/j.optlastec.2012.06.037
Ganeev, Rashid. (2013). Laser - Surface Interactions. 10.1007/978-94-007-7341-7.
DAHOTRE, Narendra B. a Sandip P. HARIMKAR. Laser fabrication and machining of materials. New York, N.Y.: Springer, c2008. ISBN 9780387723440.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

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

Datum zadání diplomové práce: **12.10.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **02.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: _____

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na laserové mikroobrábění obecných ploch s využitím různých typů polarizace. Jejím cílem je prozkoumání vlivu různých typů polarizace na proces mikroobrábění z hlediska spolehlivosti, opakovatelnosti a efektivity procesu.

Na začátku práce v teoretické části je stručně popsán princip laseru a interakce laserového paprsku s materiálem. Další část práce je zaměřena na popis aplikace laserového mikroobrábění v praxi a možné způsoby mikroobrábění obecných ploch.

Experimentální část se věnuje správnému nastavení použitého laserového zařízení a následnému experimentu, jež spočívá v laserovém mikroobrábění povrchu testovacích dílců s různými typy polarizace.

Klíčová slova: laser, mikroobrábění, polarizace, textura, obecná plocha

Abstract

This diploma thesis is focused on laser micromachining of general surfaces using different types of polarization. It aims to investigate the effect of different types of polarization on the micromachining process in terms of reliability, repeatability and process efficiency.

At the beginning of the theoretical part of the thesis, the laser principle and the interaction of the laser beam with the material is briefly described. The next part of the thesis focuses on the description of the application of laser micromachining in practice and possible ways of micromachining of general surfaces.

The experimental part is devoted to the correct setting of used laser equipment and the subsequent experiment, which consists of laser micromachining of the surface of the test parts with different types of polarization.

Keywords: laser, micromachining, polarization, texture, general surface

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci Laserové mikroobrábění obecných ploch vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Pavla Zemana, Ph.D. s využitím použité literatury uvedené ve zdrojích.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Pavlu Zemanovi Ph.D. a především konzultantovi mé diplomové práce Ing. Adamovi Čermákovi, Ph.D. za odborný dohled a čas, který mi věnoval při vypracování diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval mé rodině za jejich podporu a pomoc během celého studia. V poslední řadě děkuji své přítelkyni PharmDr. Veronice Halodové.

Obsah

1. Seznam použitých zkratk a symbolů.....	8
2. Úvod	10
3. Laser	11
3.1. Vlastnosti laserového paprsku.....	11
3.2. Charakteristika laserového paprsku.....	11
3.2.1. Energetické rozložení paprsku	11
3.2.2. Fokusace laseru	12
3.2.4. Polarizace	13
4. Interakce laserového paprsku s materiálem	18
4.1. Absorpce.....	18
4.2. Proces ablace	19
4.2.1. Délka pulzů.....	19
4.2.2. Popis procesu ablace.....	21
4.2.3. Fluence	22
4.2.4. Ablací práh	22
4.2.5. Hloubka ablace.....	23
4.2.6. LIPSS struktury	23
4.2.7. Dopad polarizace na složku reflektivity.....	24
5. Mikroobrábění obecných ploch	27
5.1. Aplikace laserového mikroobrábění	27
5.2. Interakce laserového paprsku v rovinných a nakloněných plochách	29
5.2.1. Víceosé způsoby mikroobrábění	30
5.2.2. Ostatní způsoby	33
6. Cíle práce	35
7. Experimentální část	36
7.1. Příprava experimentu	36
7.1.1. Popis zařízení použitých při experimentech	37
7.1.2. Nastavení laserového systému.....	40
7.1.3. Testovaný materiál.....	40
7.2. Přípravné fáze experimentální části	41
7.2.1. Fáze 1 - Zkoumání nastavení lineární polarizace	41
7.2.2. Fáze 2 – Zkoumání nastavení kruhové polarizace.....	43
7.2.3. Fáze 3 – Zkoumání hloubky úběru materiálu v závislosti na úhlu dopadu s různými typy polarizace.....	46

7.3.	Testovací fáze experimentální části	50
7.3.1.	Příprava vzorku a dat pro laserový systém.....	50
7.3.2.	Provedení experimentu	51
7.3.3.	Výsledky testovací části	55
7.3.4.	Analýza výsledků	57
7.4.	Přenos znalostí na jiný typ struktury	59
7.5.	Diskuse dosažených výsledků.....	61
8.	Závěr.....	65
9.	Zdroje.....	66
10.	Přílohy.....	72

1. Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Popis	
	Anglický ekvivalent	Český ekvivalent
CAD	computer aided design	počítačem podporované projektování
CBN	cubic boron nitride	kubický nitrid bóru
CNC	computer numerical control	počítačové numerické řízení
CIIRC	czech institute of informatics, robotics and cybernetics	český institut informatiky, robotiky a kybernetiky
DOF	depth of focus	hloubku ostrosti
EDM	electric discharge machining	elektroerozivní obrábění
HAZ	heat affected zone	tepelně ovlivněná oblast
HSFL	high spatial frequency LIPSS	LIPSS s vysokou prostorovou frekvencí
HWP	half wave plate	půl-vlnná destička
KP	-	krátké pulzy
LIPSS	laser-induced periodic surface structures	laserem indukované periodické povrchové struktury
LSFL	low spatial frequency LIPSS	LIPSS s nízkou prostorovou frekvencí
PKD	polycrystalline diamond	polykrystalický diamant
p-pol	horizontal polarization	paralelní polarizace
QWP	quarter wave plate	čtvrt-vlnná destička
s-pol	vertical polarization	vertikální polarizace
TEM	transverse electromagnetic mode	příčný elektromagnetický mód
UKP	-	ultra krátké pulzy
σ -pol	circular polarization	kruhová polarizace

Symbol	Popis	Jednotka
D_0, d_0	průměr laser spotu paprsku	[μm]
w_0	poloměr svazku v ohnisku	[μm]
λ	vlnová délka	[nm]
f_0	ohnisková vzdálenost	[mm]
M^2	faktor kvality paprsku	[μm]
DOF	hloubka ostrosti	[μm]
θ	divergence	[mRad]
A	absorpce	-
R	reflektivita	-
E_p	energie v pulzu	[J]
τ_p	délce pulzu	[ns,ps,fs]
P_p	špičkový výkon	[J]
I_p	intenzita energie pulzu	[W/cm ²]
P_{avg}	průměrný výkon	[J]
f	opakovací frekvence pulsů	[kHz]
F	hustota energie, fluence	[J/cm ²]
F_{th}	prahová hustota energie, prahová fluence	[J/cm ²]
N	počet pulzů	-
S	inkubační koeficient	-

z_{abl}	hloubku ablance	[μm]
L_{eff}	efektivní hodnota hloubky průniku	[μm]
θ_0, θ_l	úhlu dopadu	[$^\circ$]
R_s	reflektivita vertikální složky polarizace	-
R_p	reflektivita paralelní složky polarizace	-
R_σ	celková reflektivita	-
n_0, n_1	reálná složka indexu lomu	-
$\kappa_0, \kappa_1, k_0, k_1$	imaginární složka indexu lomu	-
n_{count}	počet opakování	-
z_{depth}	hloubka úběru	[mm]
h_{abl}	hloubek úběru materiálu	[μm]
r_0	poloměr kružnice opsané	[mm]

2. Úvod

Laser je univerzální nástroj, který nachází uplatnění v celé řadě rozličných oborů, jako je strojírenský průmysl, zdravotnictví, mikroelektronika, optika, letectví, armáda, měřicí technika, astronomie a další. Obzvláště ve strojírenském průmyslu je v posledních letech pozice laseru, jakožto multifunkčního nástroje, upevňována a neustále jsou nacházeny další možnosti jeho využití. Mezi již zavedené technologie využívající laser ve strojírenském průmyslu patří např. svařování či řezání, tepelné zpracování, navařování, práškový 3D tisk, čištění, leštění, obrábění či mikroobrábění [1].

Laserové obrábění, jakožto typ nekonvenčního gravírování, je již běžně používanou technologií. Velkým trendem v současné době je však snaha o rozvoj laserového obrábění, zejména pak mikroobrábění, s využitím pulzních laserů s délkou pulzu v řádu mikrosekund (10^{-6} s) až femtosekund (10^{-15} s). Díky využití tohoto typu laserových zařízení je možné materiál obrábět s velmi vysokou hustotou výkonu v řádu 10^9 W/cm², dosáhnout úběru materiálu v řádu μm^3 až mm^3/min a docílit velmi vysoké přesnosti během procesu výroby [2]. Z hlediska kombinace dosažitelné přesnosti a flexibility jsou laserové technologie v porovnání s jinými technologiemi, jako jsou elektroerozivní obrábění (EDM) technologie, leštění nebo broušení, velmi výhodné [3].

Technologie mikroobrábění je používána např. pro tvorbu funkčních povrchů, které jsou hojně využívány v medicíně, automobilovém průmyslu nebo pro mikrostrukturování vstřikovacích forem. Potenciál pro uplatnění funkčních povrchů je však mnohem širší a stále se nalézají nové aplikace, kde funkční povrchy zefektivňují dané procesy [4,5]. Funkční povrchy jsou nejčastěji tvořeny texturou, která je vytvořena na povrchu daného dílu. V případě rovinných ploch je proces laserového mikroobrábění snadno predikovatelný. To samé bohužel neplatí v případě mikroobrábění obecných ploch, které mohou mít libovolný tvar s různým zakřivením a sklonem jednotlivých segmentů plochy. Vlivem členitosti povrchu vstupuje do procesu laserového mikroobrábění obecných ploch několik neznámých, které je potřeba eliminovat, aby bylo možné proces laserového mikroobrábění považovat za stabilní a predikovatelný [6]. Jednou z těchto neznámých je pozice laserového paprsku vůči obráběné ploše, též úhel dopadu laserového paprsku na obráběnou plochu. Další neznámou, která může mít vliv při laserovém mikroobrábění obecných ploch je druh použité polarizace. Jelikož tento vliv polarizace nebyl zatím příliš zkoumán, bylo nutné toto hledisko zohlednit [7, 8].

Tato práce má za cíl přinést nové poznatky v oblasti laserového mikroobrábění obecných ploch. Řeší především vliv úhlu dopadu laserového paprsku na mikroobráběnou plochu a typu použité polarizace na proces laserového mikroobrábění obecných ploch.

3. Laser

Slovo laser je zkratkou anglického slovního spojení Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Zesilování světla stimulovanou emisí záření). Toto slovní spojení však není zcela přesným popisem principu fungování laseru, jelikož v laseru nedochází jen k zesilování záření, ale i k jeho vzniku. Samotný princip fungování laseru vychází z kvantové fyziky a termodynamiky. Pro vznik laserového paprsku je využívána umělá změna energetických hladin atomů, které jsou následně v termodynamické nerovnováze a při návratu zpět do termodynamické rovnováhy tvoří emisi fotonů (stimulovanou emisí), čímž vzniká laserový svazek. Pro větší porozumění principu laseru a seznámení se s jeho vlastnostmi jsou jeho jednotlivé vlastnosti popsány níže [1, 9].

3.1. Vlastnosti laserového paprsku

Laserový paprsek je jedinečným zdrojem záření, a to především pro své unikátní vlastnosti, které ho vymezují od jiných druhů záření. Laserový paprsek je:

- kolimovaný – tj. paprsek laseru má nízkou rozbíhavost
- monochromatický – fotony paprsku mají stejnou frekvenci diskrétního spektra (neboli vlnovou délku)
- koherentní – fotony laseru mají stejnou časovou i prostorovou fázi [1, 10]

3.2. Charakteristika laserového paprsku

Dále existuje několik parametrů, kterými lze laserový paprsek popsat a hodnotit. Některými z nich jsou například energetické rozložení paprsku, fokusace, M^2 faktor a polarizace.

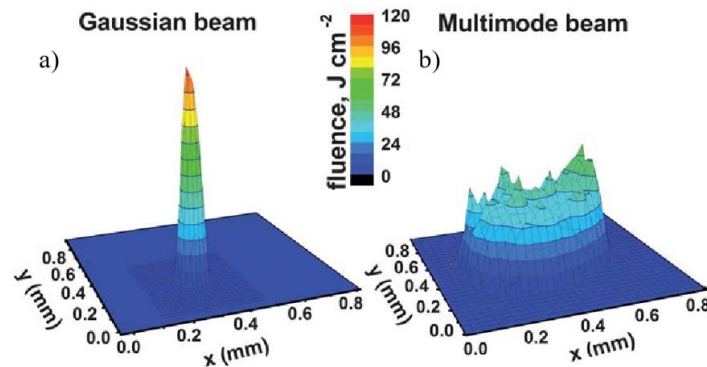
3.2.1. Energetické rozložení paprsku

Uvnitř rezonátoru se vytváří pole záření se specifickým oscilačním vzorem neboli módem. Tento vzor se nazývá Transverse electromagnetic mode (TEM neboli příčný elektromagnetický mód). Druh TEM vyjadřuje hustotu fotonů a spolu s ní i hustotu výkonu v různých oblastech vycházejícího laserového paprsku [1, 11].

Základním tvarem energetického rozložení laserového paprsku je Gaussův průběh (TEM_{00}) viz Obr. 1 a. V praxi se může energetické rozložení paprsku, díky specifické úpravě dle konkrétní aplikace, odlišovat od toho Gaussova. Příkladem může být energetické rozložení s názvem Top-hat neboli paprsek s plochým vrcholem, který má několik výhod oproti Gaussovu rozložení, jako je rovnoměrnější vnášení energie do

materiálu a menší tepelně ovlivněná oblast (HAZ) [12]. Další variantou energetického rozložení paprsku jsou vícemodé laserové zdroje viz Obr. 1 b [1].

Pro účely mikroobrábění je však nejvíce používán typ energetického rozložení laserového paprsku dle Gausse TEM₀₀ [9].



Obr. 1 - Typy rozložení energie dle Gausse (a) a vícemodé, (b)[15]

3.2.2. Fokusace laseru

Fokusace laseru udává velikost průměru zaostřeného svazku neboli „laser spot“, a tím i velikost detailu, kterého lze dosáhnout při obrábění. Velikost průměru laser spotu pro Gaussův paprsek $D_0 = 2w_0$, lze spočítat pomocí následujícího vztahu (1):

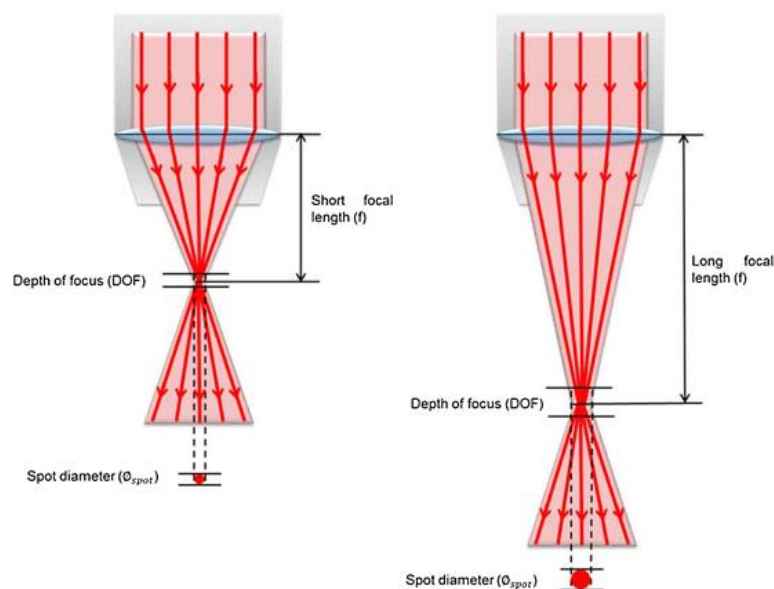
$$2w_0 = \frac{4M^2\lambda f}{\pi D}, \quad (1)$$

kde je poloměr svazku v ohnisku w_0 , vlnová délka λ , ohnisková vzdálenost f , faktor kvality paprsku M^2 a průměr laserového svazku pro intenzitu $1/e^2$ před vstupem do fokusační optiky D .

Případného zmenšení průměru laseru spotu, například pro potřeby výroby menších detailů při obrábění, lze, jak je ze vztahu uvedeného výše patrné, docílit použitím paprsku s menší vlnovou délkou nebo použitím optických komponent s menší ohniskovou vzdáleností. Je však nutné počítat s tím, že velikost průměru zaostřeného svazku je v nepřímé úměře s hloubkou ostrosti Z . Tedy čím většího zaostření dosáhneme, tím menší bude hloubka ostrosti viz Obr. 2. Hloubku ostrosti, též i označovanou jako DOF (depth of focus), lze vypočítat pomocí vztahu (2):

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

kde je poloměr svazku v ohnisku w_0 , vlnová délka λ a faktor kvality paprsku M^2 [1,9,13].



Obr. 2 – Rozdíl změny velikosti laser spotu a hloubky ostrosti v závislosti na fokusační vzdálenosti [14]

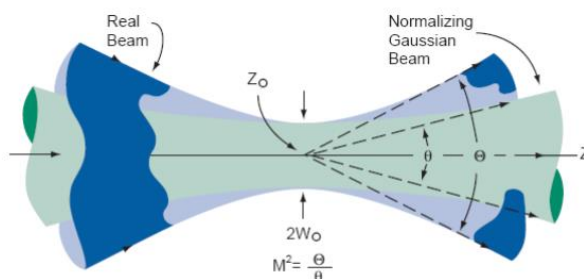
3.2.3. M^2 faktor

M^2 faktor udává odchylku kvality laserového svazku od ideálního Gaussova rozložení intenzity ($M^2 = 1$). Vztah (3) pro výpočet parametru M^2 je:

$$M^2 = \frac{\pi w_0 \theta}{\lambda}, \quad (3)$$

kde je poloměr svazku v ohnisku w_0 , divergence θ a vlnová délka λ .

Hodnota faktoru M^2 je vždy vyšší nebo rovna 1 z důvodu omezení difrakčním limitem. Pro některé typy svazků se M^2 faktor nepoužívá (např. typ Top-hat) [1,16].



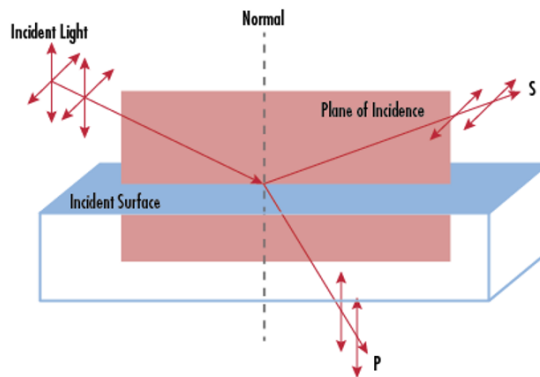
Obr. 3 – Porovnání ideálního Gaussova (zelený) a reálného (modrý) svazku [17]

3.2.4. Polarizace

O laserovém záření lze uvažovat jako o elektromagnetickém vlnění, které je v mnoha případech polarizované. To znamená, že vektor elektrického pole kmitá

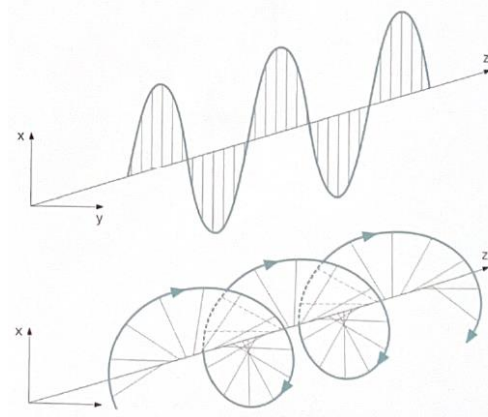
v kolmém směru na směr šíření paprsku. Laserový paprsek je nejčastěji lineárně polarizovaný, ale za pomoci opticko-mechanických komponent lze generovat paprsek s kruhovou, eliptickou nebo radiální polarizací [1,18].

Lineární polarizace – V případě lineární polarizaci kmitá vektor elektrického pole pouze v jedné rovině podél směru šíření. Existují dva základní stavy lineární polarizace, kterými jsou p-polarizace (z německého slovo „parallen“) a s-polarizace (z německého slovo „senkrecht“). U p-polarizovaného světla je elektrické pole rovnoběžné s rovinou dopadu, zatímco u s-polarizovaného světla je elektrické pole kolmé k rovině dopadu viz Obr. 4 [18].



Obr. 4 – Zobrazení p-polarizace a s-polarizace [19]

Kruhová (eliptická) polarizace – V případě kruhové a eliptické polarizace je elektrické pole složeno ze dvou lineárních složek, které jsou na sebe kolmé, a podle toho, zda se jedná o kruhovou nebo eliptickou polarizaci, mají složky stejnou (kruhová), nebo různou (eliptická) amplitudu a fázový rozdíl roven $\pi/2$ (kruhová), nebo různý (eliptická) fázový rozdíl. Výsledné elektrické pole rotuje kolem směru šíření.



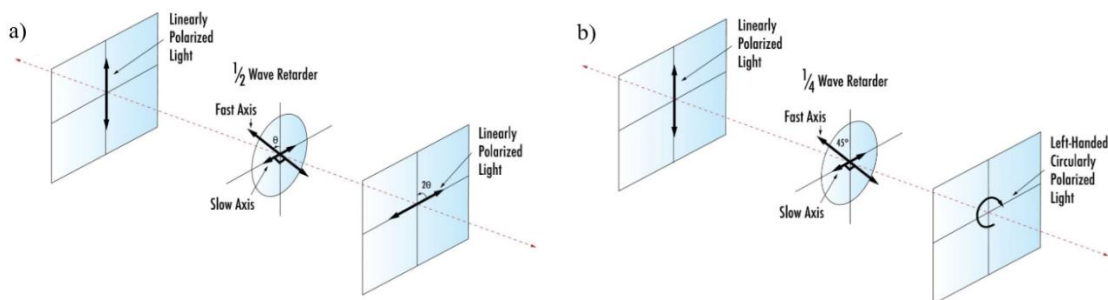
Obr. 5 - Lineární a kruhová polarizace [1]

Radiální polarizace – U radiální polarizace směřuje vektor elektrického pole v každé poloze paprsku do jeho středu. Výhodou tohoto typu polarizace je možnost vytvoření menšího laser spotu než u lineární nebo kruhové polarizace. Pro účely mikroobrábění se radiální polarizace nevyužívá [20].

Mezi opticko-mechanické komponenty, které se používají pro polarizaci, patří polarizátory nebo vlnové retardační destičky.

Polarizátory fungují na principu výběru specifické složky polarizace. Lze je rozdělit na reflexní, dichroické a dvojlomné. Reflexní polarizátory propouštějí danou polarizaci a zbylé složky se odrážejí. Dichroické polarizátory fungují na principu absorpce polarizace, kdy se nežádoucí polarizace absorbuje, zatímco zbytek projde beze změny. Dvojlomné polarizátory využívají změny indexu lomu na směr polarizace, čímž lze vyselektovat potřebnou polarizaci [18].

Vlnové retardační destičky, na rozdíl od polarizátorů, neselektují určité složky polarizace, ale modifikují polarizaci zdroje na jinou. Modifikace polarizovaného světla probíhá pomocí zpoždění (zpomalení) jedné složky polarizace vůči její ortogonální složce. Aby ke zpomalení jedné složky došlo, používají se k těmto účelům vlnové retardační destičky, které jsou nejčastěji půl-vlnné $\lambda/2$ (HWP, half wave plate) nebo čtvrt-vlnné $\lambda/4$ (QWP, quarter wave plate). Natočením HWP o určitý úhel dojde ke změně orientace polarizace o dvojnásobnou hodnotu úhlu natočení destičky. Při pootočení HWP o 45° vůči počáteční lineární polarizaci tedy dojde ke změně polarizace o 90° . Tímto způsobem lze změnit polarizaci z vertikální na horizontální, nebo naopak viz Obr. 6 a. Při použití QWP, která bude také natočená o 45° vůči počáteční lineární polarizaci, lze polarizaci horizontální změnit na polarizaci kruhovou viz Obr. 6 b. Když úhel natočení QWP bude jiný než 45° , vznikne místo kruhové polarizace eliptická polarizace. V praxi se používají oba typy destiček a jejich kombinace, aby bylo dosaženo takové polarizace, která je vhodná pro danou aplikaci [18,21].



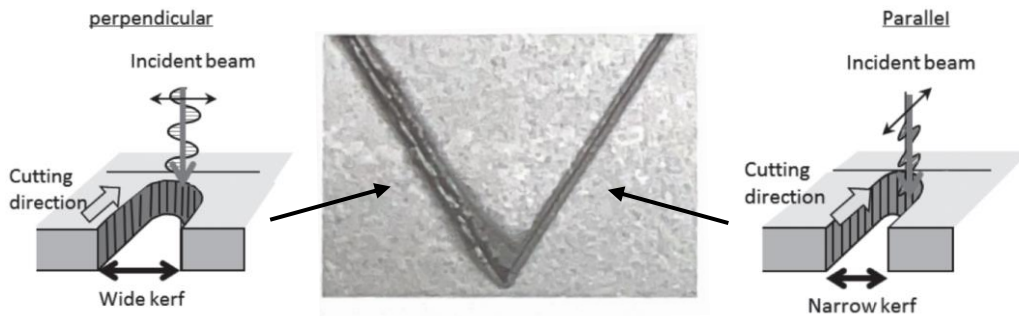
Obr. 6 - Změna polarizace pomocí vlnových retardačních destiček z horizontální na vertikální pomocí HWP (a), z horizontální na kruhovou pomocí QWP (b) [21]

To, jakým způsobem je laserový paprsek polarizovaný, dost značně ovlivňuje interakci laseru s materiálem. O výsledku procesu úběru mikroobrábění však nerozhoduje pouze polarizace, ale i další parametry a jejich vzájemné kombinace [19].

3.2.4.1. Technologická hlediska volby typu polarizace

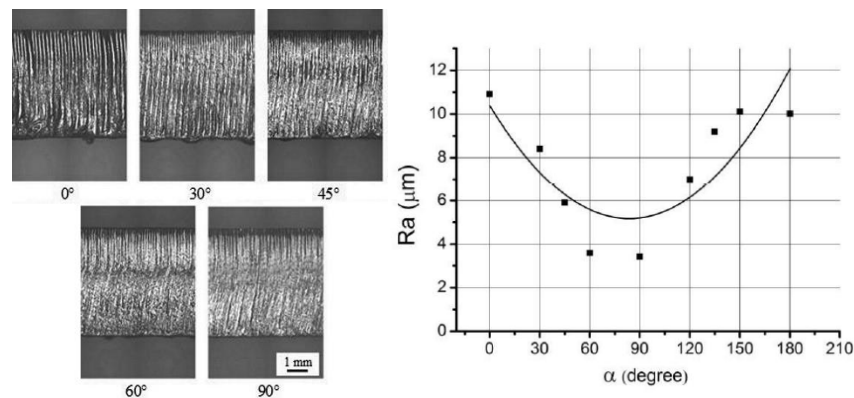
Příkladem vhodné volby typu polarizace je využití lineární polarizace laserového paprsku pro laserové řezání [1]. Pro nejlepší výsledky se v tomto případě používá lineárně polarizovaný paprsek, který má shodný směr oscilace se směrem obrábění viz Obr. 7 vpravo. Použitím tohoto konkrétního směru lineární polarizace lze dosáhnout

hladkého a velmi tenkého řezu bez otřepů a zároveň je díky tomu možno použít během řezání mnohem vyšší posuvy, než je tomu u kruhové polarizace. Problémy s lineární polarizací mohou nastat, když se změní směr řezu a polarizace vůči sobě. V tento moment dochází k výraznému rozšíření řezu a velmi značnému snížení kvality řezu, jak je možné vidět na Obr. 7 vlevo.



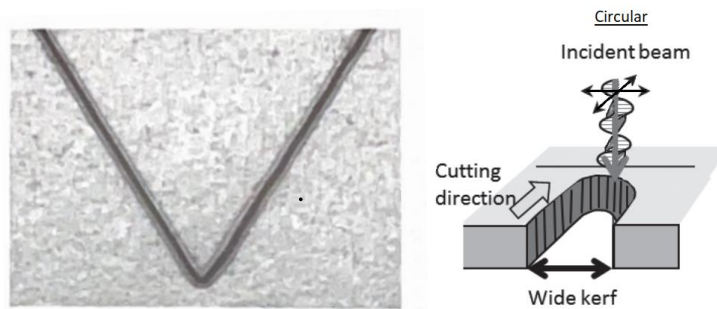
Obr. 7 – Vliv směru lineární polarizace na vzhled a velikost šířky drážky řezu [1,22]

Směr polarizace má vliv i na drsnost povrchu řezu viz Obr. 8. Narozdíl od šířky drážky a vizuálního vzhledu řezu je u drsnosti řezných ploch závislost na směru polarizace opačná. Nejvyšší drsnosti řezných ploch je dosaženo laserovým paprskem, jehož směr polarizace je kolmý na směr řezu (úhel 90°). Naopak u laserového paprsku se stejným směrem polarizace, jako je směr řezu (úhel 0°), mají povrchy řezu nejvyšší drsnost a lze na nich pozorovat větší hloubku a rozteč rýhování. Rozdílné drsnosti povrchu jsou způsobeny rozdílnou absorpcí paprsku při různých směrech polarizace [23].



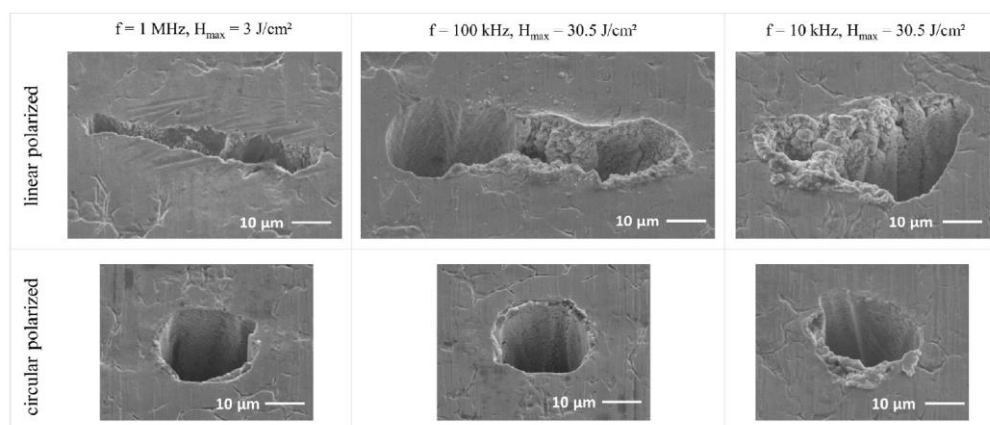
Obr. 8 – Vliv směru lineární polarizace na drsnost povrchu řezu [23,24]

Pro laserové řezání lze také použít kruhovou polarizaci, již lze rovněž dosáhnout dobrých výsledků. S kruhovou polarizací je řezná drážka o něco širší a je u ní nutné použít nižší řezné posuvy než u lineární polarizace shodné se směrem řezu. Značnou výhodou však je nezávislost polarizace na směru obrábění a lze tak dosáhnout konstantní kvality řezu ve všech směrech během řezání viz Obr. 9 [1, 22].



Obr. 9 – Vliv kruhové polarizace na vzhled a velikost šířky drážky řezu [1, 22]

Pro účely laserového vrtání, v případě použití lineární polarizace, dochází k významné deformaci kruhového tvaru vrtaného otvoru, a to především na výstupní straně otvoru viz Obr. 10 (horní řada). Zároveň často při zvyšující se tloušťce vrtaného materiálu, kdy značně stoupá poměr délky otvoru a průměru, dochází vlivem odrazů laserového lineárně polarizovaného paprsku od stěn otvorů k nerovnoměrnému rozložení intenzity a vyšší deformaci kruhového tvaru. Jelikož je účelem laserového vrtání tvorba kruhových otvorů je pro tyto účely používána především kruhová polarizace, při které nedochází k tak výrazné deformaci tvaru viz Obr. 10 (spodní řada) [4,25].



Obr. 10 – Vliv polarizace při mikro vrtání, snímek otvorů na výstupní straně (tloušťka materiálu 0,3 mm) [25]

V případě mikroobrábění se lineární polarizace používá jen u aplikací, kde nevádí, nebo naopak je chtěné, zviditelnit směr polarizace, jelikož při obrábění se na povrchu obráběného dílce vytváří LIPSS struktury, celým názvem Laser-Induced Periodic Surface Structures (Laserem Indukované Periodické Povrchové Struktury), které kopírují směr lineárně polarizovaného paprsku. V případě použití kruhové polarizace mají případně vzniklé LIPSS nerozpoznatelný směr orientace [1,18].

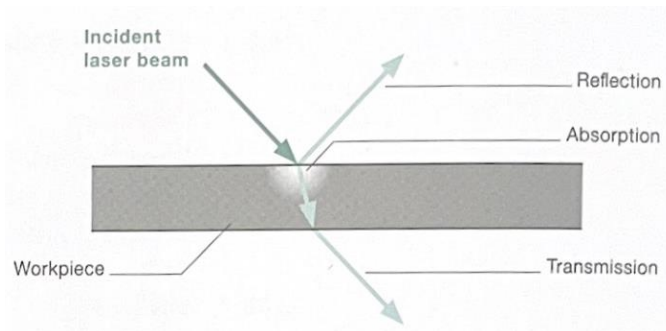
Lineární polarizace se obecně používá v aplikacích, kdy je důležité dosažení určité specifické charakteristiky (orientace LIPSS, detailnější procesy, orientace směru obrábění). Oproti tomu kruhová polarizace je velmi univerzálním nástrojem, který není závislý na orientaci směru obrábění, na úkor této univerzálnosti se však při ní ztrácí jemná úroveň detailu a výše zmíněné specifické charakteristiky. Eliptická polarizace se

pro účely technologických procesů (řezání, vrtání, mikroobrábění atd.) příliš nepoužívá a je spíše považována za nežádoucí [1, 18, 22, 25].

4. Interakce laserového paprsku s materiálem

Interakce laserového paprsku s materiálem může probíhat třemi způsoby (Obr. 11) průchodem, odražením nebo pohlcením paprsku. K prvnímu jevu, tedy k průchodu laserového paprsku skrz materiál, může docházet pouze, je-li materiál pro laser transparentní, s ohledem na efektivitu procesu mikroobrábění je však snahou tento jev minimalizovat. Spolu s tím panuje i snaha omezit i reflexi paprsku, jelikož oba tyto jevy způsobují energetické ztráty a snižují účinnost využití energie laserového paprsku.

O tom, v jaké míře je energie obsažená v paprsku laseru efektivně využita rozhoduje stupeň absorpce. Energie, kterou obráběný materiál přijme z laserového paprsku, se následně změní na tepelnou energii a způsobí zahřátí materiálu v obráběné oblasti. V případě, že je materiálu dodáno dostatečné množství energie, se materiál začne tavit, odpařovat, či dokonce může přímo sublimovat. Tento princip odstraňování materiálu nazýváme ablací. Zda k ablaci dojde, je ovlivněno především ablačním prahem a délkou jednotlivých pulzů. Aby tento efekt byl co nejúčinnější, používají se pro účely mikroobrábění krátké pulzy s vysokou energií v řádech MW, průměrný výkon dosahuje stovek wattů. Takto vzniklé entity, tvary nebo struktury mají na povrchu obráběného dílce velikost od 25 mikrometrů až po několik stovek mikrometrů [1].



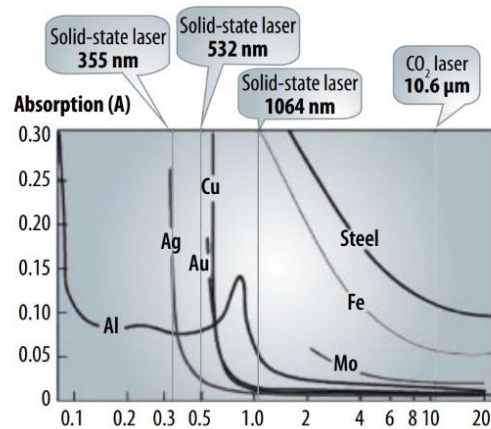
Obr. 11 - Druhy interakce laseru v materiálem [1]

4.1. Absorpce

Absorpce je definována jako poměr mezi energií absorbovanou a dopadající. Velikost tohoto poměru je určena několika faktory – vlnovou délkou, druhem polarizace, úhlem dopadu laserového paprsku a také vlastnostmi obráběného materiálu, kam lze zařadit teplotu materiálu, stav povrchu, odrazivost a geometrii (drsnot) povrchu. Vztah mezi absorpcí a reflektivitou je $A = I - R$.

Aby byla hodnota absorpce co nejvyšší, je nutné zvolit zdroj laserového záření vhodný pro konkrétní materiál. Každý materiál má vlastní absorpční křivku, která udává

hodnotu energie absorbované z paprsku laseru v závislosti na vlnové délce viz Obr. 12. [26, 27].



Obr. 12 - Graf závislosti absorpce na vlnové délce pro různé kovové materiály [26]

4.2. Proces ablace

Laserová ablace je proces úběru materiálu, při kterém dochází k absorpci energie z laserového paprsku v selektované oblasti na povrchu obrobku. Materiál v ohniskové oblasti se zahřívá, taví a v závislosti na množství intenzitě energie absorbované základním materiálem se buď přemění na taveninu a dále se odpařuje, nebo se přímo přemění vlivem velkého množství energie na páru (tzv. ablace materiálu). Průběh ablace je určen několika parametry, těmi nejdůležitějšími jsou intenzita laserového záření a doba interakce, které společně určují množství energie, které je vneseno do obrobku [28,29].

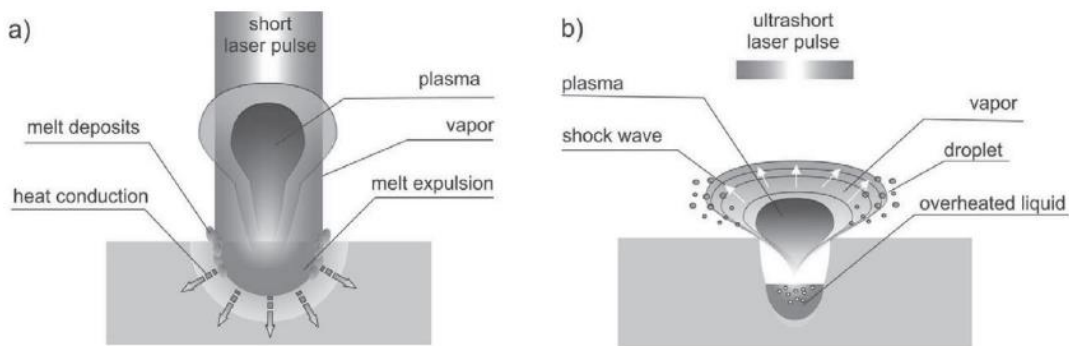
4.2.1. Délka pulzů

Interakční čas lze u pulzních laserů upravit změnou doby trvání pulzu τ_p . Pro účely mikroobrábění se nejčastěji používají lasery s krátkými (KP) nebo s ultra krátkými pulzy (UKP). Podle délky pulzu převládají během ablace různé mechanismy interakce laserového paprsku se základním materiálem. Především lze mluvit o procesech termální a atermální ablace.

V případě krátkých pulzů se interval jednotlivých pulzů pohybuje v rozsahu mikro- a nanosekund. Při takto dlouhých pulzech dochází nejčastěji k termální ablaci. Energie pulzu je absorbována povrchem obrobku a následně dochází k tavení materiálu, odpařování materiálu nebo přechodu materiálu do stavu plazmatu. To, jakého stavu je dosaženo, je dáno teplotou v místě interakce. Značnou nevýhodou termální ablace, a tedy i použití krátkých pulzů, je vznik výrazných tepelně ovlivněných oblastí (HAZ) a tepelného namáhání materiálu, které vzniká jako důsledek transformace energie laseru na teplo a jeho šířením do okolního materiálu. Dalším nežádoucím jevem je vznik plazmatu, které se vytvoří při interakci par materiálu a silného elektrického pole

laserového paprsku nad obráběným místem. Tento jev se vyskytuje především z důvodu pozdního ukončení pulzu. Oblak plazmatu brání průchodu laserového paprsku a zároveň odráží část paprsku, což výrazně snižuje efektivitu mikroobrábění. Dále pak tento oblak předává teplo materiálu, což způsobuje zvětšování HAZ oblastí. [28, 2, 30]

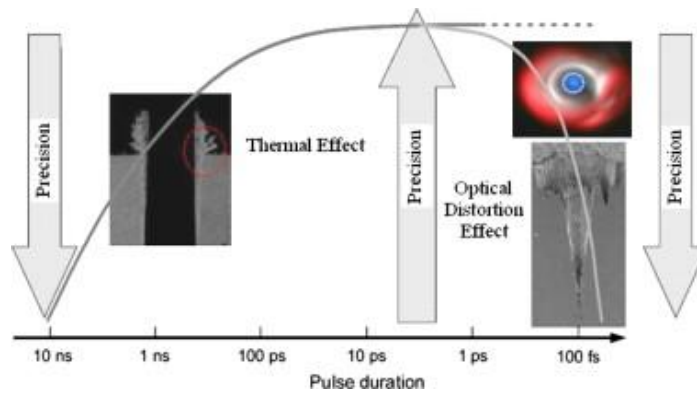
U ultrakrátkých laserových pulzů se délka jednotlivých pulzů pohybuje v rozmezí piko- a femtosekund. Užití takto krátkých pulzů má zásadní vliv na proces ablace, která se z termální mění na atermální nebo též fotochemickou. Při stejném množství energie v pulzu E_p při kratší délce pulzu τ_p bude v místě interakce mnohem vyšší špičkový výkon P_p . Jelikož je do obráběného místa dodáno takové množství energie, že se energie laserového paprsku nestačí přeměnit na teplo, zásadně se, oproti krátkým pulzům, sníží množství energie pulzu, které je na tepelnou složku přeměněno. Vznikají extrémní tlaky, hustoty a teploty, které urychlují ionizovaný materiál. Materiál rovnou přechází do vysokotlaké směsi kapiček a páry, která expanduje vysokou rychlostí, tento proces je označován jako fázový výbuch. Vzhledem k omezené tepelné interakci mezi laserem a materiálem během ultrakrátkých pulzů je tepelně ovlivněná oblast minimální, zároveň nedochází k tvorbě taveniny, což vede k větší přesnosti obrábění. Zároveň mohou během obrábění UKP na povrchu materiálu vlivem polarizace LIPSS [28, 2].



Obr. 13 – Proces ablace s krátkými (termální ablace) a ultrakrátkými (atermální ablace) pulzy [28]

4.2.1.1. Optimální délka pulsu

Při zkrácení délky pulzů z jednotek nanosekund na stovky femtosekund se tepelný účinek laseru na kovové materiály příliš nemění, zatímco efekt optického zkrácení je zjevnější. Díky kratším pulzům v řádu fs se bude velikost interagované oblasti neustále zmenšovat k téměř nulové hodnotě, ale nulové hodnoty nikdy nedosáhne. Na druhou stranu v důsledku ultra vysoké intenzity laseru (až TW/cm^2) může dojít k silné deformaci laserového paprsku v blízkosti ohniskové roviny. To je způsobeno nelineárním charakterem laserového světla a interakcí paprsku laseru s okolním vzduchem. Tento jev velmi negativně ovlivňuje přesnost mikroobrábění. Na Obr. 14 je zobrazen vliv délky pulzu τ_p na přesnost mikroobrábění kovů. Při délkách pulzů τ_p větších než 100 ps dochází k negativnímu tepelnému ovlivnění a vzniku HAZ. Při mikroobrábění s délkou pulzů τ_p kratší než 100 fs naopak dochází k efektu optické distorze. Proto se pro mikroobrábění jeví jako nejvhodnější délka pulzů v rozmezí 100 – 1 ps [31].



Obr. 14 – Schéma závislosti přesnosti mikroobrábění na délce pulzu [31]

4.2.2. Popis procesu ablace

Pro popis procesu ablace je nutné definovat několik parametrů, mezi které patří energie pulzu E_p , intenzita energie pulzu I_p a špičkový výkon P_p .

Energie pulzu E_p [J] je definována jako celkový obsah optické energie v jednom pulzu. U pulzních laserů, z důvodu velké četnosti po sobě následujících pulsů, může být hodnota energie jednotlivých pulzů velmi malá, pohybující se v řádu několika nano- nebo mikrojoulů. Hodnotu energie pulzu E_p lze vypočítat jako podíl (4) průměrného výkonu P_{avg} a opakovací frekvence pulsů f [32]:

$$E = \frac{P_{avg}}{f} \quad (4)$$

Intenzita energie pulzu I_p [W/cm²] je veličina, která vyjadřuje velikost optického výkonu na jednotku plochy. Vzorec (5) pro výpočet I_p pro Gaussův paprsek je:

$$I_p = \frac{P_{avg}}{\pi\omega_0^2/2} \quad (5)$$

kde je průměrný výkon P_{avg} a poloměr svazku v ohnisku ω_0 [33].

Špičkový výkon P_p je definován jako maximální optický výkon laseru, kterého lze dosáhnout při obrábění. Vysokého špičkového výkonu lze docílit pomocí vysoké energie v pulzu nebo zkrácením délky trvání jednotlivých pulzů, případně kombinací obou parametrů. Výpočet špičkového výkonu P_p lze provést pomocí vzorce (6):

$$P_p = \frac{E_p}{\tau_p} \quad (6)$$

kde je energie pulzu E_p a délka pulzu v polovině maxima Gaussovy funkce τ_p .

V případě, že je patřičné do výpočtu špičkového výkonu P_p zahrnout vliv tvaru pulzu, lze do vzorce pro výpočet zahrnout faktor, který nabývá pro Gaussův tvar pulzu hodnoty $\approx 0,94$ nebo pro tvar pulzu Sech^2 hodnoty $0,88$ [34].

4.2.3. Fluence

Fluence, též označovaná jako hustota energie F interpretuje množství energie dodané v jenom pulzu a její velikost se udává v J/cm^2 . Velikost fluence lze snadno dopočítat pomocí vzorce (7) nebo (8). Vzorec (7) vyjadřuje hodnotu špičkové fluence u laserového paprsku s rozložením energie dle Gausse, kde je poloměr paprsku definován jeho $1/e^2$ nebo 13,5% maximální hodnoty. Vzorec (8) udává fluenci paprsku, který má rozložení Top-hat.

$$F = \frac{2 E}{\pi \omega_0^2} = \frac{8 E}{\pi d_0^2}, \quad (7)$$

a

$$F = \frac{E}{\pi \omega_0^2} = \frac{4 E}{\pi d_0^2}, \quad (8)$$

kde je energie jednoho pulzu E a poloměr ω_0 , respektive průměr d_0 paprsku.

Aby mohlo dojít k začátku procesu ablace, je nutné, aby hodnota fluence určená dobou trvání a počtem pulzů, překročila prahovou hodnotu fluence F_{th} , nejčastěji označovanou jako hodnota ablačního prahu [35].

4.2.4. Ablační práh

Abláční práh F_{th} je vyjádřen jako vrcholová fluence, tedy nejnižšího množství energie, při které započne ablace. Hodnota ablačního prahu není konstantní, často se mění v závislosti na parametrech laseru, vlnové délce a délce pulzů. Minoritně mohou ovlivnit hodnotu ablačního prahu i vlastnosti obráběného materiálu (tloušťka, teplota dílce) nebo i prostředí, ve kterém proces ablace probíhá (vzduch/ vakuum) [35, 36, 37].

K redukci hodnoty ablačního prahu dochází také při pulsním režimu laseru v důsledku inkubačního efektu. Vysoká frekvence opakujících se pulzů způsobuje zahřívání materiálu ve stejné oblasti, a jelikož je doba mezi pulzy příliš krátká pro ochlazení, dochází k akumulaci energie, která může způsobit snížení hodnoty ablačního prahu. Ablační práh je tedy závislý na počtu laserových pulzů N , které dopadají do stejné oblasti. Vztah mezi prahem jednoho pulzu $F_{th}(1)$ a multipulzním režimem $F_{th}(N)$ lze vyjádřit vzorcem (9):

$$F_{th}(N) = F_{th}(1)N^{S-1}, \quad (9)$$

kde je počet pulzů N a inkubační koeficient S , který charakterizuje inkubaci defektů vzniklých laserovým zářením. Interval pro hodnotu inkubačního efektu je $(0;1)$. Je-li hodnota $S = 1$, nedochází k žádné inkubaci a ablační práh nezávisí na počtu laserových pulzů. Je-li hodnota $S > 1$, je povrch dílce vytvrzen laserovým ozařováním. Běžnou hodnotou pro inkubační koeficient v případě interakce s kovy je $S = 0,8-0,95$ [36, 37].

4.2.5. Hloubka ablace

Hloubku ablace z_{abl} lze vyjádřit pomocí vzorce (10):

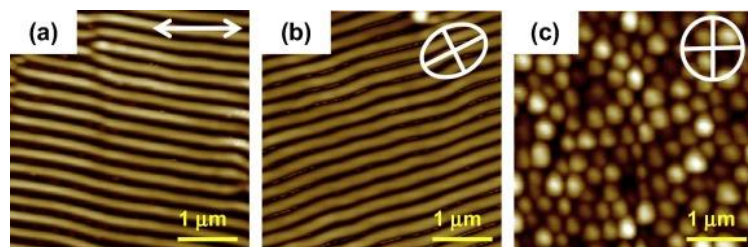
$$z_{abl} = L_{eff} \cdot \ln\left(\frac{F}{F_{th}}\right), \quad F > F_{th}. \quad (10)$$

kde je poměr fluence a ablačního práhu F / F_{th} . Efektivní hodnota hloubky průniku je L_{eff} , kterou lze stanovit experimentálně z naměřených hloubek ablace pro různé fluence [38].

4.2.6. LIPSS struktury

Pojem LIPSS byl již zmíněn v předchozích kapitolách. Typ polarizace laserového paprsku má silný vliv téměř na všechny procesy zpracování laserového materiálu. Zásadní vliv má typ polarizace zejména v případě mikroobrábění, kdy LIPSS vzniklé na povrchu obrobku dokáží měnit vlastnosti povrchu.

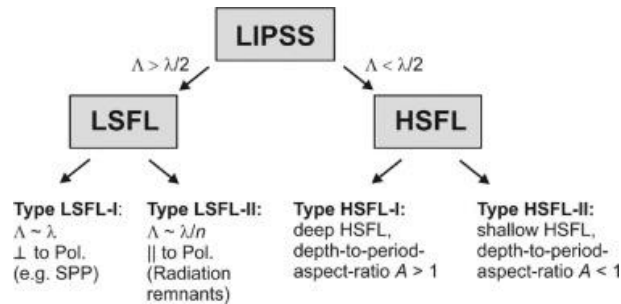
LIPSS se jeví jako náhodné nebo pravidelné zvlněné struktury s periodou, která se mění s vlnovou délkou laseru, zatímco jejich tvar a orientace jsou definovány směrem polarizace vzhledem k rovině dopadu viz Obr. 15 [39, 40].



Obr. 15 – Vliv polarizace na strukturu povrchu materiálu: lineární (a); eliptická (b) a kruhová (c) polarizace [40]

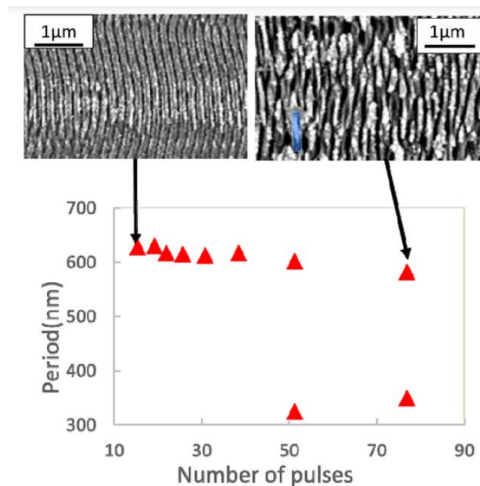
LIPSS, které vznikají v kolmém směru na lineární polarizaci, našly své využití v řadě různých aplikací, zejména pak v oblasti v biomedicíny (zejména biokompatibilní, hydrofobní a hydrofilní vlastnosti povrchů), fotoniky, přenosu tepla, tribologie [39].

Obecně lze LIPSS rozdělit podle period vlnění a vlnové délky dopadajícího laseru na dva odlišné typy, a to na Low spatial frequency LIPSS (LSFL) neboli LIPSS s nízkou prostorovou frekvencí a na High spatial frequency LIPSS (HSFL) neboli LIPSS s vysokou prostorovou frekvencí viz Obr. 16.



Obr. 16 – Rozdělení LIPSS na LSFL a HSFL [4]

Jak je patrné z Obr. 17, LSFL se skládají z prostorových útvarů opakujících se s periodou, která je blízká vlnové délce laserového zdroje ($\lambda > \Lambda > \lambda/2$) a orientací kolmou na polarizaci pulzu. Oproti tomu HSFL mají periodu mnohem menší, než je vlnová délka laseru ($\Lambda < \lambda/2$), a orientaci rovnoběžnou s polarizací. Nejčastější výskyt HSFL struktur je při obrábění vysokým počtem pulzů při nízké fluenci [4, 35, 41].

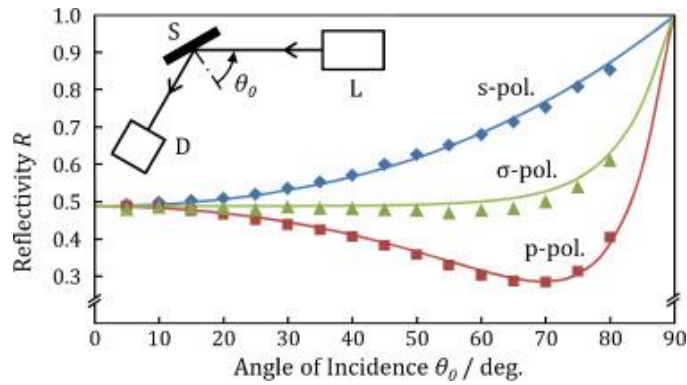


Obr. 17 – Vývoj periody LIPSS jako funkce počtu aplikovaných pulzů pro LSFL (vlevo) a HSFL (vpravo) [42]

4.2.7. Dopad polarizace na složku reflektivity

Reflektivita laserového paprsku může být značně ovlivněna typem použité polarizace. Zároveň jsou stupeň odrazu a absorpce silně závislé na úhlu dopadu laserového paprsku na obráběnou plochu θ_0 . Při obrábění obecných 3D ploch se úhel dopadu mění s topografií povrchu obráběného materiálu. V důsledku toho již nelze hustotu energie laseru a odrazivost na povrchu považovat za konstantní.

Vliv s-polarizace, kruhové polarizace (σ -pol) a p-polarizace při úhlu dopadu v rozsahu $0-90^\circ$ na reflektivitu je popsán na ukázkovém příkladu interakce laseru s tenkou vrstvou NiCr viz Obr. 18.



Obr. 18 – Závislost reflektivity na úhlu dopadu při s-polarizaci (modrá), kruhové polarizaci, σ -polarizaci (zelená) a p-polarizaci (červená) měřené na tenké vrstvě NiCr [8]

Každý materiál má své specifické opticko-mechanické vlastnosti, proto nebudou křivky jednotlivých polarizací pro rozdílné kovové materiály totožné, jistou podobnost v tvaru a pořadí si však křivky zachovávají. Obecně lze tedy říci, že pro s-polarizaci se reflektivita při rostoucím úhlu dopadu plynule zvyšuje ze středních hodnot na 100 % při úhlu dopadu 90° . V případě kruhové polarizace je hodnota reflektivity téměř konstantní do hodnoty $70^\circ - 85^\circ$ úhlu dopadu, při dále se zvyšujícím úhlu dopadu reflektivita výrazně stoupá. Minimální hodnoty reflektivity lze pozorovat u p-polarizace, kdy se s rostoucím úhlem dopadu hodnota reflektivity snižuje, a to až do hodnoty $65^\circ - 80^\circ$ úhlu dopadu, kde nabývá minima. Za tímto úhlem dopadu reflektivita prudce roste [7,8].

Obecně lze reflektivitu R matematicky vyjádřit pomocí Fresnelových vzorců jako dvě nezávislé rovnice pro vertikální (11) a paralelní (12) složku polarizace. Kruhová polarizace odpovídá superpozici obou složek s fázovým posunem o $\pi/2$ (13).

$$R_s = \frac{\sin^2(\theta_0 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_0 + \theta_1)}, \quad (11)$$

$$R_p = \frac{\tan^2(\theta_0 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_0 + \theta_1)}, \quad (12)$$

$$R_\sigma = \frac{R_s + R_p}{2}, \quad (13)$$

kde θ_0 je úhel dopadu a θ_1 je úhel lomu, který lze dopočítat pomocí komplexních indexů lomu $\widehat{n}_0 = n_0 + i\kappa_0$ a $\widehat{n}_1 = n_1 + i\kappa_1$ a ze Snellova zákona (14) [8].

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_1} = \frac{\widehat{n}_1}{\widehat{n}_0}, \quad (14)$$

Pro vlnové délky $\lambda > 500\text{nm}$ a velikosti komplexního indexu lomu $n^2 + \kappa^2 \gg 1$, lze Fresnelovy vzorce pro paralelní (15) a vertikální (16) složku polarizace následovně zjednodušit:

$$R_p = \frac{(n_0 \cos \theta_0 - 1)^2 + (k_0 \cos \theta_0)^2}{(n_0 \cos \theta_0 + 1)^2 + (k_0 \cos \theta_0)^2}, \quad (15)$$

$$R_s = \frac{(n_0 - \cos \theta_0)^2 + k_0^2}{(n_0 + \cos \theta_0)^2 + k_0^2}, \quad (16)$$

kde je reálná složka n_0 a imaginární složka k_0 indexu lomu [7].

5. Mikroobrábění obecných ploch

Laserové mikroobrábění je jednou z nejrozsáhleji zkoumaných aplikací využívajících pulzní režim. Během mikroobrábění dochází k selektivnímu úběru materiálu na povrchu obecných ploch dílce dle geometrických prvků (definované svou velikostí a svou polohou umístění) nebo komplexních struktur o rozměrech v řádu mikro- nebo nanometrů [1,43].

Při laserovém mikroobrábění lze pomocí vytvořených struktur měnit vlastnosti povrchu dílce. Technologie mikroobrábění může být tedy využita k funkcionalizaci povrchů a může jim udílet unikátní specifické vlastnosti jako jsou např. hydrofilie, hydrofobie, změna tribologických vlastností nebo jiné jedinečné vlastnosti, které mají svůj specifický význam u konkrétních aplikací [1,43].

Standardní laserové zařízení, které se používá k laserovému mikroobrábění, je složeno ze zdroje laserového paprsku, optických komponent, které vedou samotný paprsek (pro účely mikroobrábění je nejdůležitější galvanometrická skenovací hlava, též galvoskener), a dále pak z pracovního stolku, který může být pohyblivý jak v lineárních, tak i v rotačních osách. V neposlední řadě je zařízení vybaveno počítačem používaným pro řízení systému [44].

Základní pohyb laserového svazku po obráběném dílci je zajištěn pomocí galvanometrické snímací hlavy, která zajišťuje pohyb v lineárních osách X a Y, případně i v ose Z. Maximální pracovní plocha je omezena maximálním rozsahem pojezdů galvoskeneru [58]. Pro účely obrábění větších ploch, než je pole galvoskeneru, je nutné, aby došlo k posunutí obráběného dílce a pole galvoskeneru bylo přemístěno. Pro tyto účely je v zařízení používaném pro mikroobrábění pohyblivý stůl s možností lineárního pohybu v osách X a Y. Lineární osy zajistí posun požadovaného povrchu dílce do pole galvoskeneru. Pracovní stůl může být vybaven i přídatnými rotačními osami [44, 45]

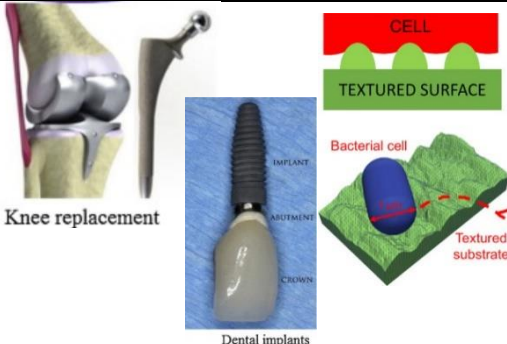
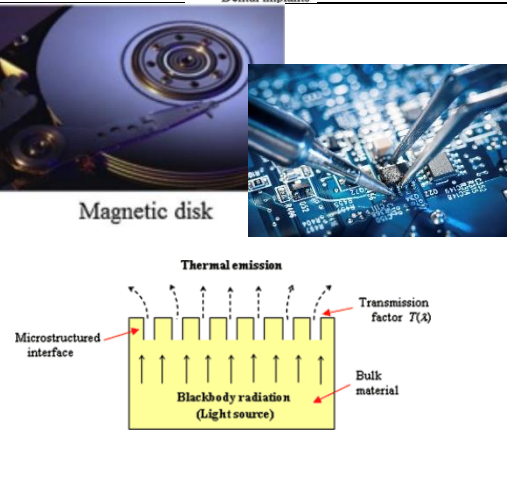
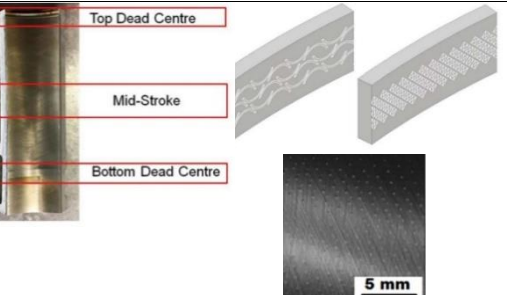
5.1. Aplikace laserového mikroobrábění


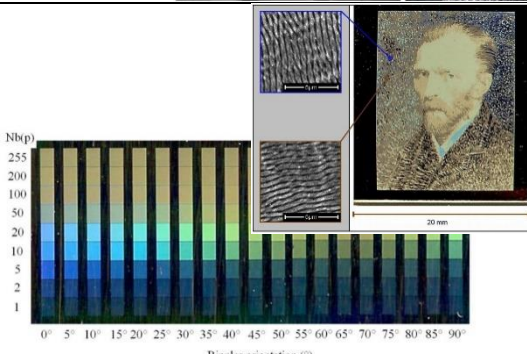
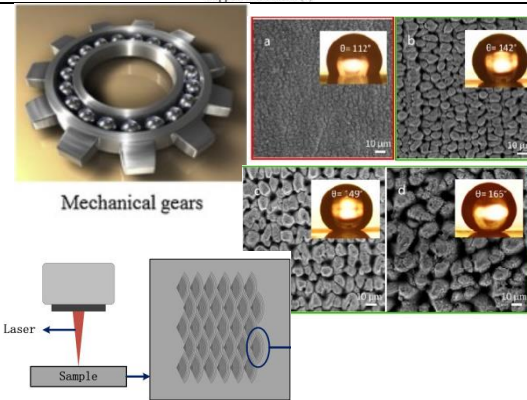
Mikroobrábění laserovým paprskem má oproti svým alternativním metodám tvorby textur, jako jsou leptání, mikrofrézování, elektrochemické obrábění, horké embosování nebo mechanické texturování, jedinečné výhody [46]. Mezi jeho nejvýznamnější výhody patří rychlost, vysoká účinnost, dobrá ovladatelnost procesu tvorby struktur a schopnost vytvářet povrchovou texturu s vysokou složitostí a přesností [1,46]. Dalšími přednostmi mikroobrábění laserem jsou vznik minimální tepelně ovlivněné oblasti při obrábění a nezávislost této technologie na mechanických vlastnostech obráběného materiálu. Díky malému tepelnému ovlivnění lze obrábět materiály velmi citlivé na teplo, u kterých by zvýšená teplota mohla způsobit strukturální změny materiálu, a tím by se mohl celý dílec znehodnotit. Nezávislost na mechanických vlastnostech obráběného materiálu spočívá v možnosti obrábět téměř všechny možné kovové i nekovové materiály. Největší uplatnění našla tato metoda především u obrábění těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou polykrystalické diamanty (PKD), kubické nitridy bóru (CBN), řezné a standardní keramiky nebo třeba slinuté karbidy [1,47].

Mikroobrábění laserovým paprskem je slibnou technologií napříč všemi, nejen průmyslovými, odvětvími. Tímto procesem lze modifikovat jak již zmiňovanou smáčivost povrchu, tak i morfologii povrchu nebo optické, elektrické, mechanické či tribologické vlastnosti povrchů [35].

Níže je popsáno několik konkrétních příkladů aplikací laserového mikroobrábění v praxi. Především se jedná o tyto obory – medicína, mikroelektronika a fotonika, automobilový průmysl, strojírenská výroba, design nebo obecné aplikace funkčních povrchů [1, 35, 46, 48, 49, 50]. Pro lepší přehlednost jsou uvedené příklady z jednotlivých odvětví uspořádány do Tab. 1 níže.

Tab. 1 - Přehled příkladů aplikací laserového mikroobrábění

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Medicína</p>	 <p>Knee replacement</p> <p>Dental implants</p> <p>CELL</p> <p>TEXTURED SURFACE</p> <p>Bacterial cell</p> <p>Textured substrate</p>	<ul style="list-style-type: none"> • texturování povrchů kostních a zubních implantátů podporující adhezi buněk • tvorba antibakteriálních povrchů <p>[35, 39, 43, 46, 48, 51]</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Mikroelektronika, fotonika</p>	 <p>Magnetic disk</p> <p>Thermal emission</p> <p>Transmission factor $T(\lambda)$</p> <p>Microstructured interface</p> <p>Bulk material</p> <p>Blackbody radiation (Light source)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • texturování magnetických disků a videohlav • zvyšování absorpce solárních článků, zvýšení absorpce v ultrafialové oblasti při zachování nízké emisivity v infračervené oblasti • zvýšení tepelné emisivity kovů pro vytvoření jasnějších a účinnějších světelných zdrojů <p>[35, 46, 51, 52, 53]</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Automobilový průmysl</p>	 <p>Top Dead Centre</p> <p>Mid-Stroke</p> <p>Bottom Dead Centre</p> <p>5 mm</p>	<ul style="list-style-type: none"> • texturování pístů motorů pro snížení tření mezi pístními kroužky a stěnou válce (efektivnější ukládání oleje a případných úlomků) <p>[4, 35, 50, 54]</p>

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Strojírenská výroba</p>	 <p>Cutting tools</p>	<ul style="list-style-type: none"> • výroba šablon a masek pro přesné aplikace • texturování forem a matric pro zpracování kovů a polymerů • tvorba utvářečů třísek na řezných nástrojích <p>[4, 5, 46, 50, 51]</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Design</p>	 <p>Nb(p)</p> <p>Ripples orientation (°)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • tvorba strukturně barevných kovových povrchů vlivem rozlišného pozorovacího úhlu nebo vlivem parametrů laserového obrábění <p>[35,49]</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Funkční povrchy</p>	 <p>Mechanical gears</p> <p>Laser</p> <p>Sample</p> <p>$\theta = 112^\circ$</p> <p>$\theta = 142^\circ$</p> <p>$\theta = 109^\circ$</p> <p>$\theta = 165^\circ$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • změna tribologických vlastností • hydrofobní povrchy - ochrana proti namrzání, antikorozi ochrana, samočistící povrchy • hydrofilní povrchy • snížení fluidního odporu (rybí šupiny) <p>[35, 46, 55, 56]</p>

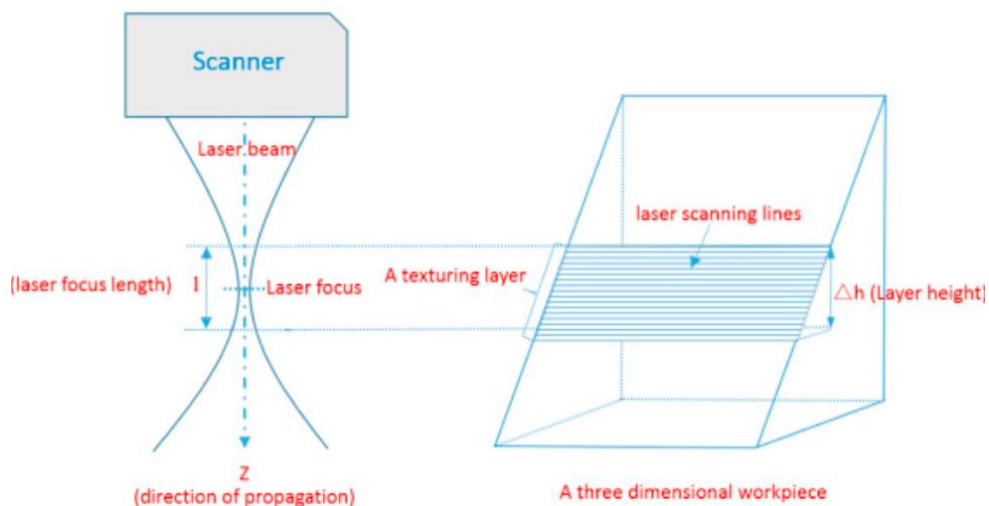
5.2. Interakce laserového paprsku v rovinných a nakloněných plochách

Obecnou plochu lze definovat jako trojrozměrný geometrický útvar, který má libovolný tvar. Pro účely laserového mikroobrábění jsou obecné plochy děleny na několik typů podle sklonu dané plochy. Dle tohoto způsobu dělení rozlišujeme plochy rovinné, šikmé a svislé. V případě rovinných ploch je interakce laseru s povrchem dílce značně předvídatelná, během mikroobrábění nedochází k téměř žádným problémům a proces je při nastavení správné ohniskové vzdálenosti velmi stabilní. Získání normály povrchu, tak aby byla rovnoběžná s osou laseru je v tomto případě velmi snadné [1, 6].

Při laserovém zpracování šikmých ploch však existují specifické problémy/omezení, které je třeba vzít v úvahu. Variace úhlu dopadu paprsku a ohniskové vzdálenosti v důsledku zakřivení povrchu mohou ovlivnit rozměrovou přesnost a/nebo funkční charakteristiky textur [6].

Vliv úhlu dopadu při mikroobrábění obecných ploch byl již detailněji popsán v předešlých kapitolách. Úhel dopadu má zásadní vliv na stupeň reflektivity a absorpce laserového paprsku. Se zvětšujícím se úhlem dopadu laserového paprsku stoupá i poměr odraženého paprsku.

Velikost ohniskové vzdálenosti při mikroobrábění šikmých stěn lze také vyjádřit jako hodnotu výšky obráběné vrstvy viz Obr. 19. Prvky textury nacházející se v této vrstvě lze vyrobit společně. Pro výrobu prvků v jiné vrstvě je nutné změnit fokusační vzdálenost pomocí galvoskeneru nebo využít mechanickou osu Z. S rostoucím úhlem sklonu šikmé plochy bude výška obráběné vrstvy stále stejná, ale plocha, kterou lze obrábět ve stejné vrstvě bude užší [6, 57].



Obr. 19 – Vliv ohniskové vzdálenosti při mikroobrábění šikmé plochy [57]

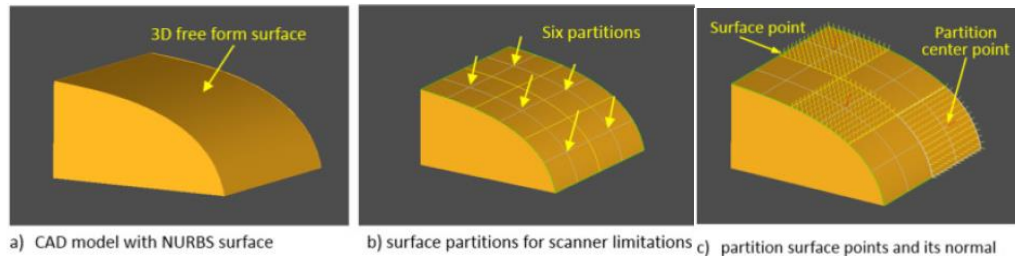
O svislých plochách v případě laserového mikroobrábění nelze uvažovat, jelikož tyto plochy nelze žádným způsobem obrábět. Jejich povrch je totiž rovnoběžný s osou laseru a nelze tedy docílit vzájemné interakce laseru a povrchu dílce [1].

Kinematiku laserových zařízení lze rozdělit do několika kategorií, a to jak podle počtu nebo druhu mechanických nebo optických os, tak i podle toho, zda s nimi lze obrábět pouze rovné nebo i šikmé plochy.

5.2.1. Vícesosé způsoby mikroobrábění

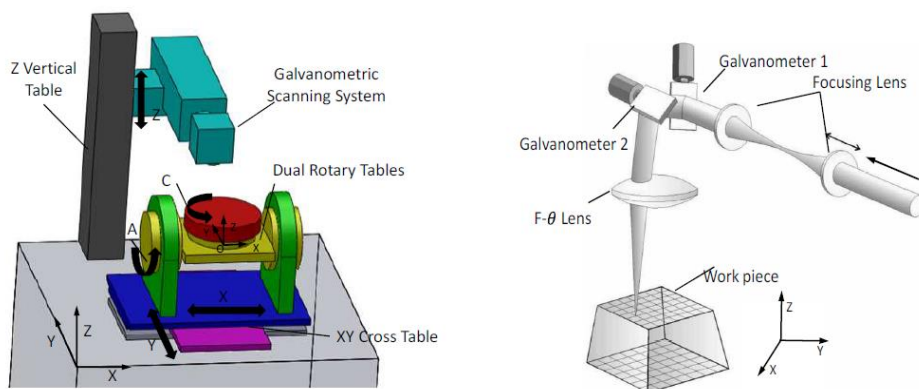
Mezi vícesosé způsoby mikroobrábění patří takové aplikace, při nichž je během obrábění využito přídavných rotačních a lineárních os. Jedná se o doplnění mikroobrábění o využití osy Z u galvoskeneru, která je tvořena pomocí pohyblivé čočky, jež umožňuje posun ohniska podél osy paprsku. Dále se jedná o přídavné rotační mechanické osy, které jsou uspořádané podle konkrétního laserového zařízení. Zároveň dochází během obrábění k synchronnímu pohybu několika, nebo dokonce všech os obsažených v laserovém zařízení [6, 59]

Nejčastějším přístupem k texturování volných povrchů při víceosém způsobu mikroobrábění je metoda mozaikování/rozdělení (Obr. 20). Povrch dílce je pomocí vhodného softwaru rozdělen na skenovací pole a vrstvy s přihlédnutím k omezením velikosti pole galvoskenneru a velikosti rozsahu fokusační vzdálenosti. Během mikroobrábění se mechanické osy chovají velmi podobně jako u konvenčního obrábění, pouze zajišťují vhodné umístění obrobku, tedy středu každého pole, tak, aby normála obráběného pole směřovala do osy laseru a zároveň dráha paprsku byla v ohniskové rovině. Zbýlý pohyb laserového paprsku po povrchu obráběného dílce zajišťuje galvoskenner [6].



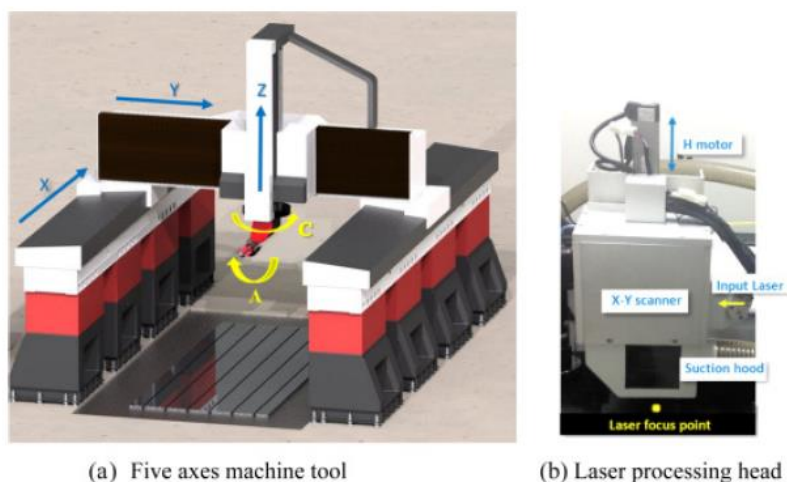
Obr. 20 – Schéma rozdělení volného povrchu dílce do několika polí s jejich normálami k povrchu [57]

První metodou, jak lze zkonstruovat laserové zařízení pro účely laserového mikroobrábění, je použití konvenčního 5osého CNC systému, který je již hojně používán pro ostatní technologie (jako je např. frézování), kde je však u laserového zařízení místo rotačního vřetene umístěn galvoskenner, viz Obr. 21. Tento koncept lze označit jako 5+3 osé laserové zařízení. Pohyblivý 5osý stůl zajišťuje správné umístění dílce tak, aby byl povrch kolmo k ose laseru, a samotný pohyb laseru v jednotlivých polích je zajištěn galvoskennerem [59].



Obr. 21 – Schéma konstrukčního uspořádání 5+3osého laserového zařízení s kolíbkovým uspořádáním [44]

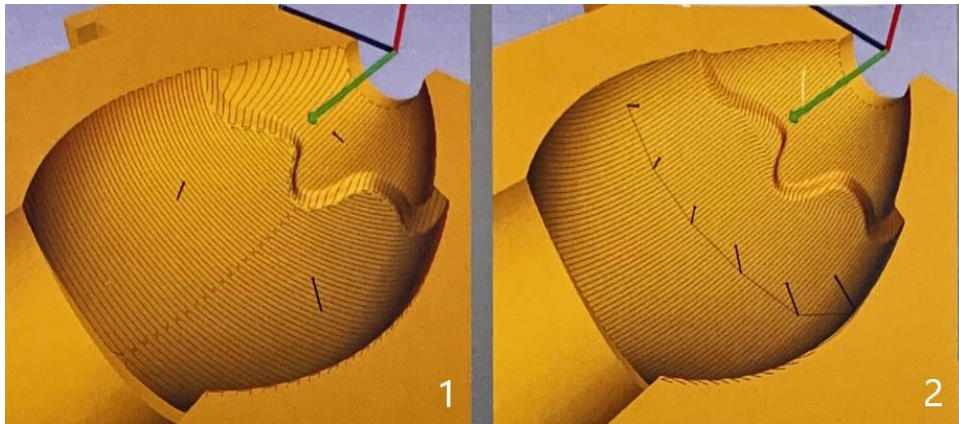
Druhý způsob, jak lze zkonstruovat laserové zařízení s víceosou kinematikou se stejným konceptem 5+3 os, je velmi podobný jako v předešlém případě. Znovu se vychází z konstrukce konvenčního 5osého CNC systému, jen s jiným konstrukčním uspořádáním rotačních os, které jsou umístěné na vřeteni. Na Obr. 22 je vyobrazeno laserové zařízení zkonstruované z portálového obráběcího stroje, který má dvouosé sklopné vřeteno, na kterém je umístěn galvoskenner [57].



Obr. 22 – Schéma konstrukčního uspořádání 5+3osého laserového zařízení s portálovým uspořádáním a dvouosým skllopným vřetenem [57]

Někteří významní výrobci laserových zařízení přišli s odlišným způsobem konstrukce laserových zařízení. Pro svá zařízení používají stejné standardní prvky, jež jsou zmiňovány výše, tedy pohyblivé stoly, pohyblivá ramena a galvoskenery, ale vývoj zařízení je v těchto případech odlišný od již zmiňovaných konceptů, kde je spojena kinematika konvenčního obráběcího stroje s galvoskenery. Tato zařízení jsou konstruována od základů jako laserové zařízení a během konstrukce je více bráno v potaz, jak proces laserového mikroobrábění probíhá. Je tedy uvažováno s tím, že by měl být laserový paprsek normálově k obráběnému povrchu a měl by být správně zafokusován na povrchu součásti. Důležitou součástí laserového zařízení je i řídicí systém, který je v tomto případě při výrobě zařízení koprodukován. Díky tomu dochází k lepší kompatibilitě mezi softwarem a hardwarem a lze dosáhnout lepšího, plynulejšího a simultánního ovládní mechanických os. Zároveň lze simulovat kinematiku obrábění a detekci kolizí v softwarovém prostředí. Tyto kombinace spolu s pevně integrovaným ovládním umožňují přesné a rychlé mikroobrábění libovolných komplexních 3D dílů, které si zachovává konstantní kvalitu [59, 60, 61].

V případě konceptu 5+3osého zařízení, probíhá obrábění pomocí rozdělení obráběného povrchu na jednotlivá pole a jejich postupného obrábění. Tento přístup má jednu značnou vadu, a to kvalitu povrchu a zpracování v navazujících oblastech sousedních polí. Jedním z možných řešení, jak tento problém eliminovat, je 8osé simultánní mikroobrábění (Obr. 23). Zařízení používaná za tímto účelem jsou konstrukčně shodná s již výše zmiňovanými konstrukcemi laserových zařízení. Jedná se o zařízení, která obsahují pohyblivý stůl nebo konstrukci s pohyblivým ramenem a galvoskenery. Jediným a zásadním rozdílem je, že v konceptu 8osého mikroobrábění dochází k simultánnímu pohybu všech os, jak 5-ti os mechanických X,Y,Z,A,C, tak i všech 3 os optických, obsažených v hlavně galvoskenery [62, 63].



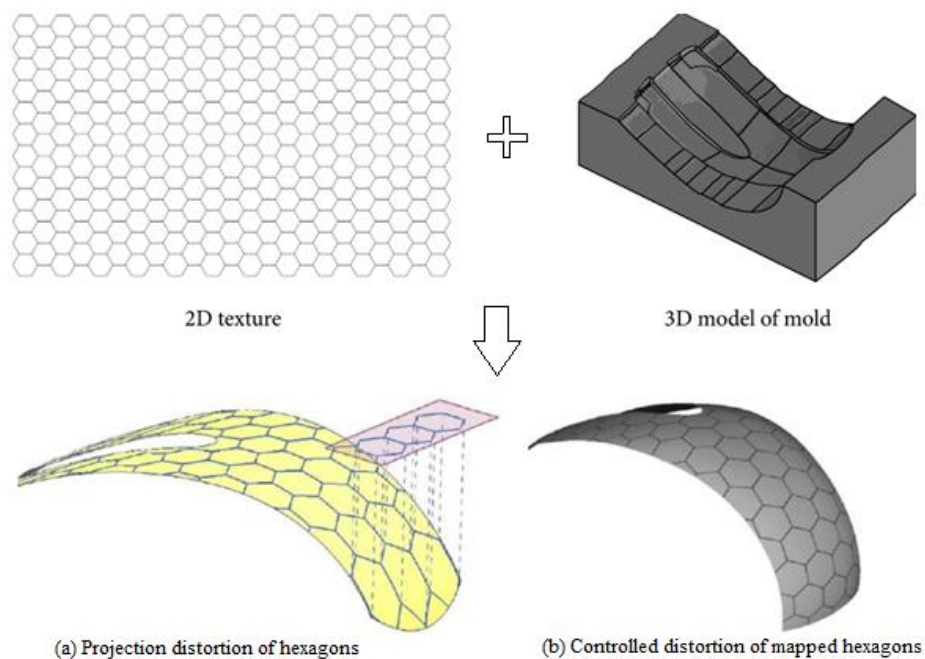
Obr. 23 – Srovnání drah 5+3osého mikroobrábění s rozdělenými oblastmi obrábění (1) a 8osé mikroobrábění bez oddělených oblastí (2) [62]

5.2.2. Ostatní způsoby

Pro tvorbu funkčních nebo dekorativních textur na volných plochách lze také využít mikroobrábění pomocí zařízení, které nevyužívají k obrábění víceosé kinematiky, ale pouze základní kartézské uspořádání mechanických os X,Y,Z spolu s galvoskenem. Níže je uvedeno několik rozdílných přístupů, jak je možno tento proces mikroobrábění provádět.

První metodou, pomocí níž lze vytvářet textury na volných plochách, je metoda nazvaná 2,5D texturování nebo též hluboké laserové gravírování [64]. Vytvořená textura umístěná na 3D volném povrchu je rozdělena do několika vrstev v ose Z. Následné obrábění laserovým paprskem probíhá v po sobě následujících vrstvách, kdy je nežádoucí materiál odstraněn. Vždy po dokončení obrábění jedné vrstvy se ohnisko paprsku posune o odpovídající hloubku ablace, tedy o jednu vrstvu níže. Jedná se v podstatě o inverzní technologii aditivní výroby [65, 66].

Druhým způsobem je metoda nazvaná 3D projekce. Textura, která má být vytvořena na povrchu dílu je vodorovně promítána na volný povrch dílce. Promítání 2D textury může být provedeno dvěma způsoby. Buď je 2D textura na volný tvar promítnuta vodorovně bez ohledu na tvar volné plochy, čímž dojde k deformaci textury na nakloněných plochách (viz Obr. 24 a), nebo je při promítání bráno v potaz, jaký má volný povrch tvar, a tyto odchylky tvaru jsou kompenzovány (viz Obr. 24 b). 2D textura je tedy v tomto druhém případě na volném povrchu nabalena a při pohledu normálově k povrchu má každý segment textury totožný tvar, bez známek deformace.



Obr. 24 – Proces mapování textury při metodě 3D projekce [59,67].

Při mikroobrábění metodou 3D projekce je obráběná plocha rozdělena do polí o definované velikosti, kdy jsou v každém poli pouze části textury, které odpovídají rozsahu hloubky ostroty galvoskenery. K pohybu mezi jednotlivými poli a hladinami Z jsou použity mechanické osy [64, 66].

Použití této jednoduché metody 3D projekce, kdy jsou mechanické osy omezeny pouze na lineární pohyby, má nevyhnutelně své limity. Hlavní nevýhodou je nemožnost pozicování laserového paprsku normálově k povrchu. Tohoto stavu lze dosáhnout pouze u povrchů kolmých na osu laseru, která je konstantní. Šikmé stěny dílce musí být tedy obráběny pod určitým úhlem dopadu laseru, který zásadně ovlivňuje interakci laserového paprsku s povrchem dílce. Udává se, že až do úhlu dopadu 55° lze povrchy obrábět bez znatelné změny interakce laserového paprsku s povrchem [66]. Mezním úhlem dopadu, kdy je laserový paprsek schopen zanechat stopu na mikroobráběném povrchu, je úhel v rozmezí $70-80^\circ$, takto vytvořená dráha však již není svými parametry a vzhledem zcela konstantní [8]. Lze tedy říct, že mikroobrábění metodou 3D projekce je vhodné a použitelné pouze pro dílce, které nemají složitý komplexní tvar, který by byl složen z velkého počtu šikmých stěn [66].

6. Cíle práce

Cílem této práce je poskytnout hlubší porozumění problematice laserového mikroobrábění a identifikovat optimální podmínky pro dosažení jeho maximální účinnosti a kvality, se zaměřením zejména na detailní zkoumání vlivu druhu polarizace a úhlu dopadu laserového paprsku na proces laserového mikroobrábění obecných ploch

V některých pracích, které byly již publikovány, byl vliv polarizace studován, ale jedna se o studie vlivu polarizace na technologie laserového vrtání [4, 25] nebo laserového řezání [1,22,23]. V odvětví laserového mikroobrábění je již provedených studií popisujících vliv polarizace o poznání méně, jedná se například o studie [68] a [69]. Oproti nim však měly být poznatky zjištěné v této diplomové práci aplikovány na reálný díl, se snahou vyrobit na povrchu dílce texturu, která by byla aplikovatelná do průmyslové praxe.

Hlavním cílem této práce bylo:

- seřízení a odzkoušení technologie laserového mikroobrábění obecných ploch na dostupném laserovém zařízení pomocí funkce *3D Projection*, jež je součástí řídicího systému DMC

Aby bylo možné tohoto hlavního cíle dosáhnout, byl rozdělen na dílčí části:

- ověření a stanovení optimálních parametrů nastavení laserového zařízení pro dané druhy polarizace
- zkoumání závislosti hloubky úběru materiálu na úhlu dopadu laserového paprsku pro různé druhy polarizace během procesu mikroobrábění
- aplikace zjištěných poznatků na testovacím dílci složeném z obecných ploch a následná analýza výsledků

7. Experimentální část

Laserové mikroobrábění představuje moderní a stále se rozvíjející technologii pro velmi přesné obrábění, úpravy a tvorbu unikátních funkčních i designových povrchů, s širokým spektrem aplikací od biomedicíny po design. Jedněmi z klíčových parametrů ovlivňující proces laserového mikroobrábění jsou druh polarizace a úhel dopadu laserového paprsku. Různé hodnoty těchto dvou veličin mohou určitou měrou ovlivnit interakci mezi laserovým paprskem a povrchem materiálu, což může mít následně výrazný dopad na vlastnosti výsledného mikroobráběného povrchu.

7.1. Příprava experimentu

Experimentální část byla prováděna na zařízeních v laboratoři Průmyslové výroby a automatizace, společného pracoviště CIIRC (Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky) a Fakulty strojní ČVUT v Praze. Pro účely experimentu bylo využito laserové zařízení (detailní popis v kapitole 6.2.1.) a pro následné vyhodnocování byly použity konfokální a optický mikroskop.

Samotný experiment byl, pro lepší přehlednost a posloupnost, rozdělen do třech přípravných fází, které na sebe přímo navazovaly, a jedné testovací fáze. Výsledky zjištěné v předchozích fázích byly vždy následně použity v dalších fázích experimentu.

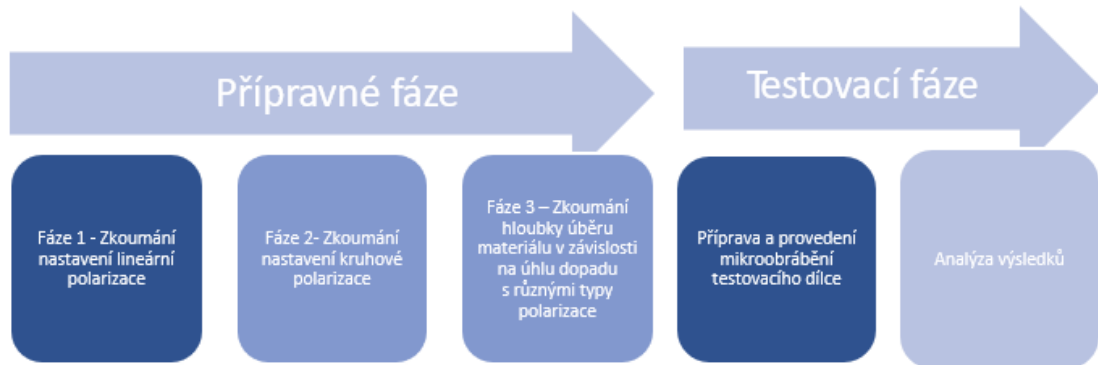
V prvních dvou přípravných fázích bylo řešeno správné nastavení laserové soustavy tak, aby ve třetí přípravné a testovací fázi bylo již možné vycházet z konkrétního a konzistentního nastavení laserového zařízení.

V první fázi bylo zkoumáno správné nastavení úhlu půl-vlnné destičky (HWP), která mění laserové záření na lineárně polarizované. Snahou bylo nastavit HWP v optické soustavě laserového paprsku tak, aby lineárně polarizovaný laserový paprsek vytvořil na povrchu dílce LIPSS v svislém a vodorovném směru.

Ve druhé fázi bylo zkoumáno správné nastavení vzájemné polohy HWP a čtvrt-vlnné destičky (QWP), tak aby bylo dosaženo kruhové polarizace. Vzhledem ke konstrukčnímu řešení laserového zařízení, konkrétně jeho optické soustavy, kdy je QWP v optické soustavě umístěna v konstantní pozici a nelze s ní rotovat, ale pouze ji vkládat do dráhy laserového paprsku, je nutné nastavit správnou vzájemnou polohu HWP a QWP pomocí rotace HWP.

Cílem třetí fáze bylo získat závislost hloubky úběru materiálu na úhlu dopadu laserového paprsku pro vertikální (s-pol), paralelní (p-pol) a kruhovou polarizaci (σ -pol), zjistit tak chování laserového paprsku s různými typy polarizace při mikroobrábění šikmé plochy a stanovit vhodný typ polarizace pro daný úhel sklonu šikmé plochy pro mikroobrábění obecných ploch tak, aby mikroobráběná textura měla konstantní hloubku úběru materiálu. Tato fáze sloužila pro nastavení správných parametrů zařízení pro obrábění obecných ploch, s důrazem zejména na stav polarizace.

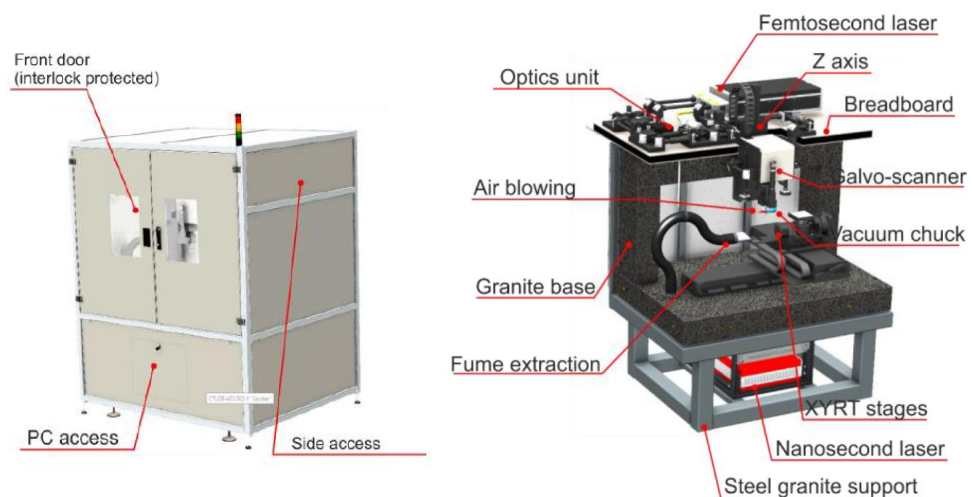
V testovací fázi byly zjištěné výsledky aplikovány na testovací dílec obsahující obecné plochy. Celý experiment byl zakončen detailní analýzou.



Obr. 25 - Schéma jednotlivých fází experimentů a jejich návaznost

7.1.1. Popis zařízení použitých při experimentech

Pro účely laserového mikroobrábění bylo po celou dobu experimentu využíváno femtosekundové laserové zařízení MASTER1 PSGFRT od společnosti eLas Company (Obr. 26) s řídicím softwarem Direct Machinig Control ve verzi 1.7.52. MASTER1 je víceosé laserové zařízení složené z třech translačních os (osy X,Y jsou v rámci pohyblivého stolu, zatímco osa Z je umístěná na pracovní hlavě) a dvou rotačních os A, C, které mají kolíbkové uspořádání na pracovním stole. Laserové zařízení MASTER1 dále obsahuje galvo skenovací hlavou, která zajišťuje vychylování laserového paprsku během procesu mikroobrábění. Zároveň jsou na bocích galvoskenneru umístěny dvě kamery pro účely zaměření polohy obráběného dílce. Součástí zařízení je také integrovaný nanosekundový laserový zdroj CARBIDE laser ovládaný softwarem CARBIDE ve verzi 3.16.1 s možností změny vlnové délky.



Obr. 26 - Laserové zařízení MASTER1 PSGFRT [70]

Níže v tabulce jsou popsány základní charakteristiky laserového zařízení MASTER1 PSGFRT a laserového zdroje CARBIDE, který je součástí zařízení:

Tab. 2 - Základní charakteristika laserového zařízení MAETRER1 PSGFRT [70]

	Osa 1 - X	Osa 2 - Y	Osa 3 - Z	Osa 4 - C	Osa 5 - A
Rozsah os	600 mm	400 mm	200 mm	$\pm 360^\circ$	$\pm 120^\circ$
Absolutní přesnost	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 0,5 \mu\text{m}$	$\pm 1,2 \mu\text{m}$	$\pm 12 \mu\text{rad}$	$\pm 12,12 \mu\text{rad}$
Opakovatelnost	0,11 μm	$\pm 0,09 \mu\text{m}$	$\pm 0,08 \mu\text{m}$	$\pm 8,31 \mu\text{rad}$	$\pm 8,31 \mu\text{rad}$
Max. rychlost	<800 mm/s	<1000 mm/s	< 150 mm/s	1500 rpm	1500 rpm

Tab. 3 - Základní charakteristika laserového zdroje CARBIDE [70]

Druh aktivního prostředí	diodový pevnolátkový laser, Yb:KGW
Vlnová délka	1030 nm, 515 nm
Max. energie pulzu (závisí na vlnové délce)	2 mJ
Frekvence opakování pulzu (závisí na vlnové délce)	3 – 200 kHz
Průměrná délka pulzu	240 fs – 10 ps

Pro vyhodnocování jednotlivých fází experimentu byly použity dva mikroskopy. Prvním použitým zařízením pro vyhodnocení získaných výsledků byl laserový konfokální mikroskop Keyence s označení VK-X 3000 viz Obr. 27 níže. Tento mikroskop je vybaven objektivy se zvětšením 2,5x, 5x, 10x, 20x, 50x a 150x a jeho maximální rozlišení je 0,01 nm. Součástí mikroskopu je stůl pohyblivý v osách X a Y s rotační osou C, pohyb stolu v těchto osách pak umožňuje polohovat snímaný vzorek dle potřeby. Pro samotné měření a zpracování snímaných dat byl použit software Multifile analyzer. Díky tomuto softwaru lze měřit hloubku, drsnost a další parametry z nasnímaného vzorku.



Obr. 27 – Laserový konfokální mikroskop Keyence VK-X [71]

Níže v tabulce jsou popsány základní charakteristiky laserového konfokálního mikroskopu Keyence VK-X 3000:

Tab. 4 - Základní charakteristika laserového konfokálního mikroskopu Keyence VK-X [71]

Maximální výkon laseru	1 mW
Vlnová délka	661 nm
Zvětšení	42 x – 28800 x
Přesnost	± 2 %
Maximální velikost vzorku	318 mm x 72 mm

Druhým optickým mikroskopem, který byl pro vyhodnocování výsledků využíván, byl optický mikroskop InfiniteFocus G5 od společnosti Alicona Imagine GmbH viz Obr. 28.



Obr. 28 - Optický mikroskop Alicona InfinityFocus G5 [72]

Optický 3D mikroskop InfiniteFocus G5 je rychlé a flexibilní zařízení umožňující analýzu a měření povrchů součástí. Lze pomocí něho získat důležité charakteristiky povrchu dílce, od jednoduchých rozměrů profilu nebo tvaru až po výsledky drsnosti povrchu Ra (2D) a Sa (3D). Zároveň, díky stolu pohyblivému v osách X a Y a funkci spojování obrazů, lze s jeho pomocí nasnímat a analyzovat větší oblasti v jednom snímku. Vzhledem k těmto jmenovaným vlastnostem se jedná o velice univerzální nástroj, který byl v rámci provedeného experimentu použit pro účely hodnocení jednak vzhledu, ale především velikosti hloubky úběru materiálu po laserovém mikroobrábění.

Níže v tabulce jsou popsány základní charakteristiky optického mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5:

Tab. 5 - Základní charakteristika optického mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5 [72]

Rozsah pojezdů	200 x 200 x 100 mm
Rozlišení	10 nm
Přesnost	0,1 μm
Objektivy	25x, 50x, 100x, 200x, 500x, 1000x
Maximální hmotnost vzorku	30 kg

7.1.2. Nastavení laserového systému

Nastavení laserového zařízení bylo provedeno v souladu s parametry předem stanovenými pro každou fázi experimentu.

Při všech experimentech bylo využito obecné nastavení laserového zdroje v prostředí CARBIDE, využívající druhou harmonickou frekvenci (vlnová délka 515 nm), s opakovací frekvencí 200 kHz a maximálním výkonem 21 W. Nastavení řídicího softwaru laserového zařízení DMC proběhlo pomocí výchozího nastavení dodaného výrobcem softwaru určeného pro mikroobrábění pomocí druhé harmonické frekvence. Jedinou změnou v tomto nastavení byla redukce maximálních hodnot posuvů během obrábění.

Parametry, které byly měněny v rámci jednotlivých fází experimentu, jsou průměrný výkon laserového zdroje P_{av} , počet opakování n_{count} , hloubka úběru z_{depth} a změna úhlu HWP, která mění druh polarizace. Dále, v rámci třetí fáze, bylo nutné měnit i úhel dopadu laserového paprsku θ_0 , což bylo provedeno za pomoci mechanické rotační osy C na pracovním stole laserového zařízení. Některé parametry, především úhel HWP, byly měněny i v rámci jednotlivých fází experimentu, proto byla pro tuto změnu stanovena konstantní hodnota kroku změny.

7.1.3. Testovaný materiál

Pro jednotlivé fáze experimentu byly vždy zvoleny jednak vhodný typ, a zároveň i vhodná forma testovacího materiálu.

Pro účely zkoumání nastavení vhodného směru lineární polarizace, a tedy sledování směru LIPSS, byla použita leštěná ocelová destička, na které bylo díky leštěnému povrchu možné sledovat vzniklé LIPSS a určit jejich směr. Pro nastavení kruhové polarizace byly použity planžety o tloušťce 0,1 a 0,2 mm. V třetí fázi probíhalo mikroobrábění na destičkách z austenitické korozivzdorné oceli AISI 316L (X2CrNiMo17-12), jejíž složení je specifikováno v Tab. 6

Tab. 6 - Složení oceli X2CrNiMo17-12

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S
max 0,03	max 2,00	max 1,00	16,5-18,5	11,0-14,0	2,0-2,5	max 0,045	max 0,030

Finální testovací část experimentu byla provedena na frézovaných vzorcích dle specifického návrhu, který vycházel z výsledků předchozích fází (materiál vzorků je totožný s materiálem použitým v třetí fázi). Obecným cílem bylo vytvořit testovací dílec, který bude obsahovat obecné plochy s různým tvarem a sklonem ploch.

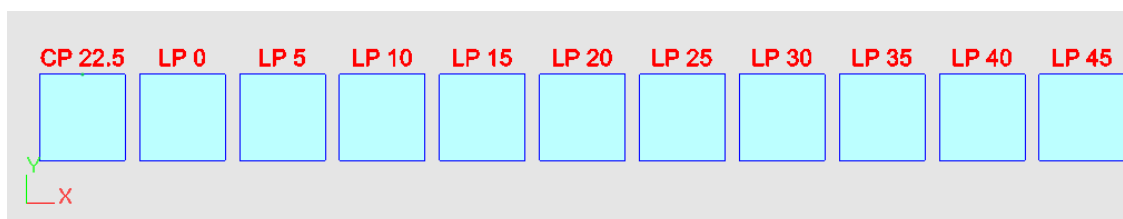
7.2. Přípravné fáze experimentální části

7.2.1. Fáze 1 - Zkoumání nastavení lineární polarizace

V první přípravné fázi experimentu byly určovány úhly nastavení HWP v optické soustavě laserového zařízení tak, aby lineárně polarizovaný laserový paprsek vytvořil na povrchu dílce LIPSS ve vertikálním a horizontálním směru a z toho bylo možné rozeznat, jaké nastavení odpovídá s-polarizaci a p-polarizaci. Žádané hodnoty úhlu natočení HWP, při kterém by mělo k těmto stavům polarizace dojít, jsou úhly 0° a 45° . Z důvodů nutnosti nastavení optické trati HWP laserového systému, bylo nutné v rámci tohoto experimentu získat a ověřit potřebné hodnoty.

Základem experimentu bylo obrobění několika sousedních čtvercových polí, kdy každé čtvercové pole bylo vyrobeno s jiným úhlem pootočení HWP. Rozsah úhlu natočení byl v rozmezí $0^\circ - 45^\circ$ s krokem 5° .

Dále bylo navíc přidáno ještě jedno pole s úhlem natočení $22,5^\circ$ a vloženou QWP v optické dráze laseru, které mělo sloužit k ověření úhlu natočení pro kruhovou polarizaci. Na leštěnou ocelovou destičku bylo tedy celkem vytvořeno jedenáct polí, schéma vytvořených polí lze vidět na Obr. 29 níže.



Obr. 29 – Schéma rozložení obráběných čtvercových polí pro účely první fáze experimentu

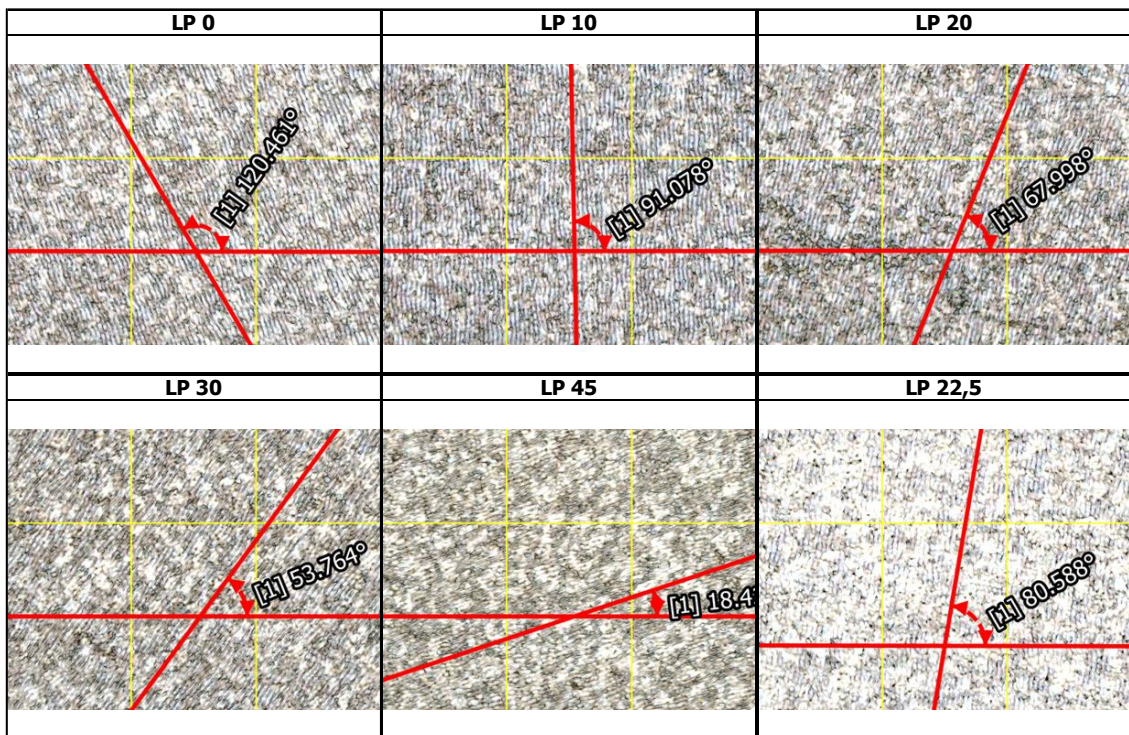
Samotné laserové obrábění probíhalo s tímto nastavením parametrů v řídicím systému DMC a laserového zdroje CARBIDE. Přesné hodnoty vybraných nastavení jsou uvedené v Tab. 7:

Tab. 7 - Přehled parametrů nastavení laserového zařízení pro první fázi

Parametr	Hodnota
Průměrný výkon [mW]	2400
Počet opakování	10
Hloubka úběru [mm]	0,05

Následně bylo nutné vyhodnotit směr LIPSS vytvořených na povrchu dílce. K těmto účelům byl použit konfokální laserový mikroskop Keyence vybavený analyzačním softwarem, díky němuž bylo možné stanovit přibližný úhel směru LIPSS. Vybrané výsledné snímky lze vidět v přehledové Tab. 8 níže:

Tab. 8 - Přehledová tabulky vybraných výsledků první fáze



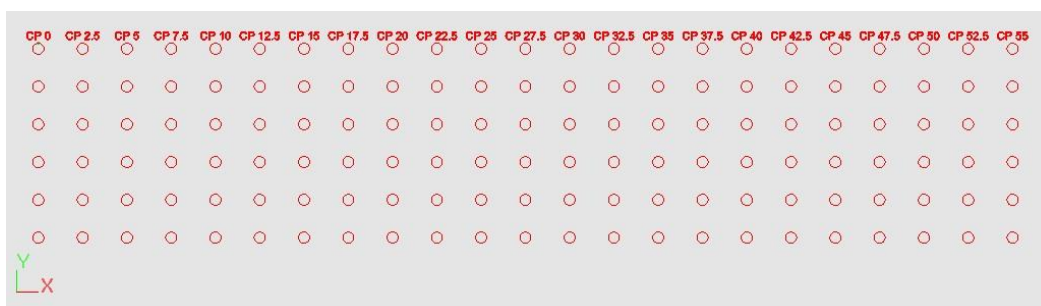
Na prvním snímku je možné vidět, že při úhlu HWP 0° nejsou vytvořené LIPSS struktury ve vertikální ani horizontálním směru, čímž byl vyvrácen předpoklad správnosti natočení HWP na 0° a 45° pro účely tvorby vertikálně a horizontálně orientovaných LIPSS. Počáteční pozice pro vertikálně a horizontálně orientované LIPSS je tedy posunuta o určitou hodnotu úhlu natočení. Oproti tomu na druhém snímku je orientace vzniklých LIPSS téměř přesně ve vertikálním směru. S ohledem na přesnost odměřování úhlu směru vytvořených LIPSS bylo bráno, že hledaný úhel natočení pro vertikální směr LIPSS je 10° . Tento směr lze též označit jako s-polarizaci. Na zbylých snímcích testovacích polí lze vidět, jak má úhel orientace LIPSS klesající, téměř lineární trend. Jelikož byl experiment navržen pouze do rozsahu úhlu 45° , plně horizontálně orientované LIPSS nebylo možné pozorovat. Další experimentální ověření nebylo v tomto případě nutné, jelikož bylo možné úhel pro horizontální orientaci LIPSS snadno odvodit z faktu, že při pootočení HWP o 45° vůči počáteční lineární polarizaci dojde ke změně polarizace o 90° . Tento fakt je navíc potvrzen postupnou změnou orientace LIPSS, která má téměř lineární průběh. Úhel natočení HWP pro horizontální orientaci LIPSS je tedy 55° . Tento směr lze též označit jako p-polarizaci.

V této přípravné fázi experimentální části bylo zjištěno správné nastavení laserového zařízení, konkrétně nastavení HWP v optické soustavě vedoucí laserový paprsek, pro vertikální (s-pol) a horizontální (p-pol) orientaci LIPSS. Správný úhel natočení HWP pro s-pol je 10° a pro p-pol je 55° . S těmito zjištěnými hodnotami bylo dále uvažováno v dalších fázích experimentu.

7.2.2. Fáze 2 – Zkoumání nastavení kruhové polarizace

Ve druhé přípravné fázi experimentální části bylo cílem zjistit, při jaké poloze HWP a QWP dochází ke vzniku kruhové polarizace. Z teoretické části je známo, že pro vytvoření kruhové polarizace je nutné, aby pootočení QWP vůči HWP bylo 45° , jinak místo kruhové polarizace vzniká polarizace eliptická. Jelikož konstrukce optické soustavy použitého laserového zařízení umožňuje pouze QWP vkládat do optické dráhy laseru, nikoliv však s ní rotovat, je nutné vzájemnou polohu QWP a HWP určit pouze pomocí natočení HWP. Zároveň je však QWP umísťována v optické dráze v neznámé poloze, tedy s neznámým možným pootočením. Hodnota úhlu nastavení HWP, která je udávána výrobcem použitého laserového zařízení pro vznik kruhové polarizace je na $22,5^\circ$. Jelikož přesnost této hodnoty udávané výrobcem laserového zařízení nebyla stoprocentně zaručena, bylo nutné ji v rámci tohoto experimentu ověřit, případně stanovit jinou správnou hodnotu.

Samotný experiment ověření nastavení kruhové polarizace byl proveden na ocelových planžetách o tloušťce 0,1 mm a 0,2 mm, do kterých bylo laserovým paprskem vyřezáno 6 sad otvorů o průměru 0,25 mm viz Obr. 30. Během mikroobrábění bylo umístěno v optické soustavě QWP a mezi sousedícími otvory byl měněn úhel HWP v rozsahu $0^\circ - 55^\circ$ s krokem $2,5^\circ$. Celkem byla tedy vytvořena matice 138 kruhových otvorů. Účelem bylo zkoumat kruhovitost vyřezaných otvorů, kdy při mikroobrábění s kruhovou polarizací by si vyřezané otvory měly zachovávat svůj původně kruhový tvar, který by neměl být nijak deformovaný a zároveň by hrany kruhových otvorů měly být bez otřepů. V případě, že se nejedná o kruhovou polarizaci, dochází k obrábění laserovým paprskem s eliptickou polarizací. Při eliptické polarizaci má jedna ze složek větší amplitudu a díky tomu dochází ve směru větší složky k deformaci kruhového tvaru otvoru, místo kruhového otvoru je tedy vytvořen otvor ve tvaru elipsy. Zároveň hrany otvoru nejsou ve směru větší amplitudy dokonale přesné a ostré. Čím je tento rozdíl amplitud jednotlivých složek větší, tím jsou větší i deformace tvaru a nepřesnost hrany otvoru ve směru větší amplitudy. Díky této skutečnosti lze snadno rozeznat, zda se jedná o kruhovou nebo eliptickou polarizaci.



Obr. 30 - Schéma rozložení obráběných otvorů pro účely druhé fáze experimentu

Mikroobrábění probíhalo s tímto nastavením parametrů v řídicím systému DMC a laserového zdroje CARBIDE. Přesné hodnoty vybraných nastavení jsou uvedené v Tab. 9:

Tab. 9 - Přehled parametrů nastavení laserového zařízení pro druhou fázi

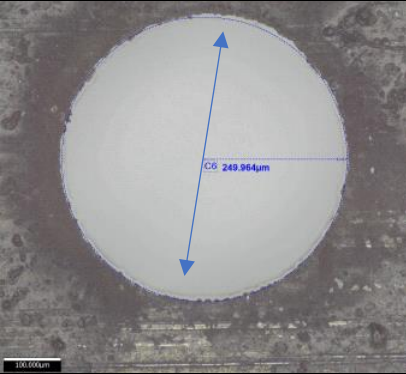

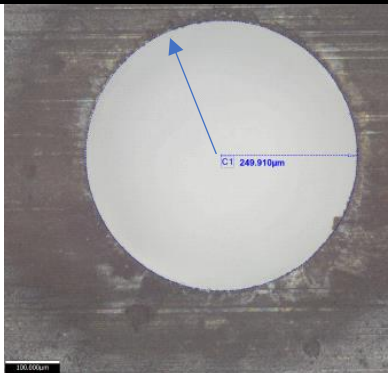
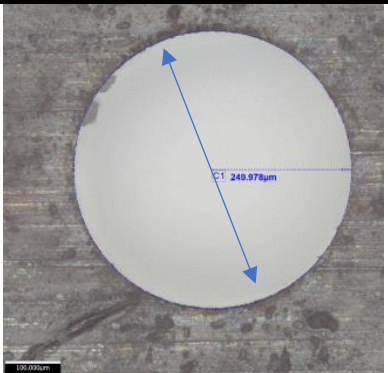
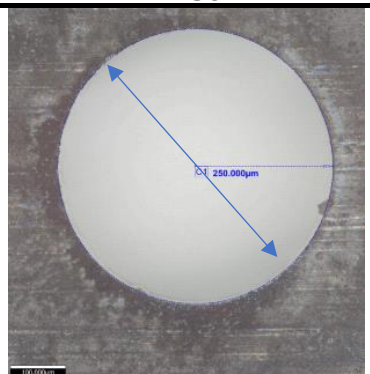
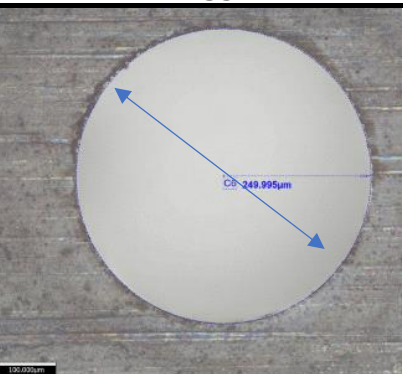
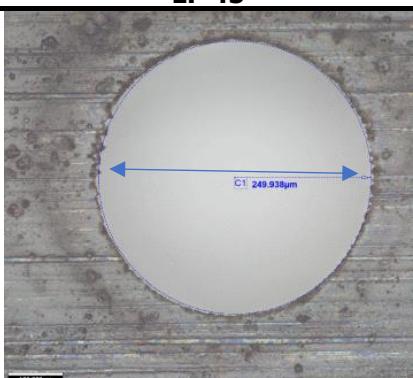
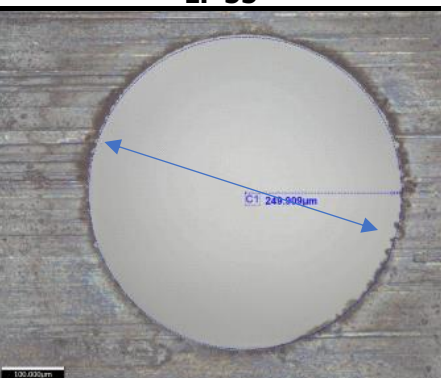
Parametr	Hodnota	
Tloušťka planžety [mm]	0,1	0,2
Průměrný výkon [mW]	400	1500
Počet opakování	750	1150
Hloubka úběru [mm]	0,05	0,05

Po obrobení obou planžet byl k vyhodnocení kruhovitosti použit optický mikroskop Alicona IFM G5 vybavený analyzačním softwarem, v jehož prostředí došlo k vyhodnocení nasnímaných dat. Pro lepší pozorovatelnost deformace kruhovitosti byly obě planžety pozorovány ze spodní strany obráběných otvorů, jelikož na dně otvoru dochází k výraznější deformaci tvaru.

Prvním zkoumaným vzorkem byla planžeta o tloušťce 0,1 mm. Při pozorování pod optickým mikroskopem byly rozdíly kruhovitosti mezi různými otvory velice nepatrné a bylo tedy téměř nemožné vyhodnotit, kdy se mělo jednat o kruhovou polarizaci. Značně viditelné rozdíly v odchylkách tvaru byly pouze při porovnání dvou krajních poloh 0° a 55° vedle sebe. Tento problém byl nejspíš způsoben příliš malou tloušťkou planžety. Planžeta byla příliš tenká na to, aby se na spodní straně vrtaných otvorů projevila chyba kruhovitosti. Z toho důvodu nebyly výsledky dále vyhodnocovány a byly brány v úvahu jen výsledky získané při obrábění planžety o tloušťce 0,2 mm.

U planžety o tloušťce 0,2 mm již bylo možné pozorovat rozdíly tvaru jednotlivých vrtaných otvorů. Níže je v Tab. 10 stručný přehled výsledků:

Tab. 10- Přehledová tabulka vybraných výsledků druhé fáze

<p style="text-align: center;">LP 0</p> 	<p style="text-align: center;">LP 10</p> 
<p style="text-align: center;">LP 20</p> 	<p style="text-align: center;">LP 25</p> 
<p style="text-align: center;">LP 30</p> 	<p style="text-align: center;">LP 35</p> 
<p style="text-align: center;">LP 45</p> 	<p style="text-align: center;">LP 55</p> 

Pro větší přehlednost byly všechny snímky doplněny kružnicí o průměru 249 – 250 μm , kdy bylo snahou tyto kružnice vepsat do vytvořených otvorů, a vytvořit tak etalon tvaru o průměru totožném s hodnotou nastavenou v programu při mikroobrábění, který bude pro všechny otvory stejný. Dále byla při vyhodnocování do hodnocených snímků doplněna šipka, která zvýrazňuje směr největší deformace a místa s největším poškozením hran otvorů. Šipka zároveň označuje směr složky s větší amplitudou v případech, kdy došlo k obrábění eliptickou polarizací, namísto kruhové polarizace.

Z výsledků je patrné, že k největším deformacím tvaru a hran otvorů došlo v krajních polohách zvoleného rozsahu. Především se jednalo o pozice nastavení úhlu HWP na 0° , 45° a 55° . Jediným rozdílem je, že poloha směru deformace je v případě úhlu 0° , v porovnání s úhly 45° a 55° , otočená přibližně o 90° . Tento výsledek je pouze dalším potvrzením správnosti výsledků první fáze. U otvorů, které byly v rozsahu úhlu nastavení HWP od 0° do $17,5^\circ$ byl pozorován sestupný trend míry deformace a vad tvaru otvorů. Opačný vzestupný trend míry deformace bylo možné začít pozorovat u hodnot v rozsahu úhlu nastavení od 30° do 55° . Pouze čtyři otvory byly shledány jako vyhovující, jednalo se o otvory odpovídající úhlu nastavení HWP v rozmezí od 20° do $27,5^\circ$. Rozdíly mezi nimi byly jen velmi nepatrné, a proto z nich nebylo možné vybrat jednu konkrétní hodnotu. Bohužel pro další postup v experimentu však bylo zvolení jedné přesné hodnoty úhlu nastavení HWP, která bude označena za polohu pro kruhovou polarizaci laserového paprsku, nezbytné. Jelikož do nalezeného rozsahu vhodných hodnot pro kruhovou polarizaci spadá i hodnota uváděná výrobcem laserového zařízení, bylo v tomto případě přihlédnuto k tomuto faktu a hodnota $22,5^\circ$ byla prohlášena jako směrodatná hodnota úhlu nastavení HWP pro kruhovou polarizaci laserového paprsku.

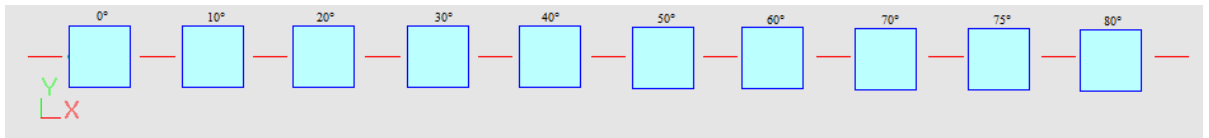
7.2.3. Fáze 3 – Zkoumání hloubky úběru materiálu v závislosti na úhlu dopadu s různými typy polarizace

Třetí přípravná fáze zahrnovala zkoumání vlivu druhu polarizace při mikroobrábění šikmých ploch, především z hlediska možných rozdílů hloubek úběru materiálu h_{abl} pro různé polarizace.

Pro tuto fázi byl vytvořen experiment, který se skládal z mikroobrábění destičky, na které byly vytvořeny tři sady čtvercových polí, každá sada pro jiný druh polarizace (σ -pol, s-pol, p-pol). Zároveň byla během obrábění každé sady destička postupně mezi sousedícími čtvercovými poli naklápěna pomocí mechanické osy A o daný úhel tak, aby bylo u každého pole dosaženo jiného úhlu sklonu obráběné plochy. Spolu s úhlem sklonu obráběné plochy se úměrně k tomu měnil i úhel dopadu laserového paprsku θ_0 . Rozsah naklápění vzorku pomocí mechanické osy A byl $0^\circ - 70^\circ$ s krokem 10° , dále byla přidána ještě dvě pole s úhlem naklonění 80° a 85° pro možnost lepšího pozorování maximálního úhlu sklonu obráběné plochy, kdy ještě dochází k efektivnímu úběru materiálu. Celkem tedy v každé sadě bylo 10 čtvercových polí, viz Obr. 31, kdy se každé pole obrábělo při stejném nastavení, ale s jiným úhlem naklonění testovací destičky.

Do každé sady byly ještě přidány úsečky, které byly umístěny mezi jednotlivá čtvercová pole. Tyto úsečky sloužily pro orientaci, zaměřování správné pozice os X a Y a nastavení osy Z tak, aby bylo dosaženo správné fokusační vzdálenosti v jedné přímce pro všechna pole z dané sady.

Testovací destička byla před zahájením experimentu pečlivě připevněna k pohyblivému stolu laserového zařízení tak, aby nedošlo k pohybu destičky při naklápění stolu a vnesení chyby do výsledků experimentu.



Obr. 31 - Schéma rozložení obráběných otvorů pro účely třetí fáze experimentu

Nastavení řídicího systému DMC pro jednotlivé typy polarizace bylo provedeno dle výsledných hodnot přípravných fází 1 a 2. Ostatní nastavení řídicího systému DMC a nastavení laserového zdroje byly pro všechny tři stavy polarizace totožné. Přesné hodnoty vybraných nastavení jsou uvedené v Tab. 11:

Tab. 11 - Přehled parametrů nastavení laserového zařízení pro třetí fázi

Typy polarizace	
úhel HWP pro σ -pol	22,5° + QWP
úhel HWP pro p-pol	55°
úhel HWP pro s-pol	10°
Parametr	Hodnota
Průměrný výkon [mW]	1600
Počet opakování	131
Hloubka úběru [mm]	0,1

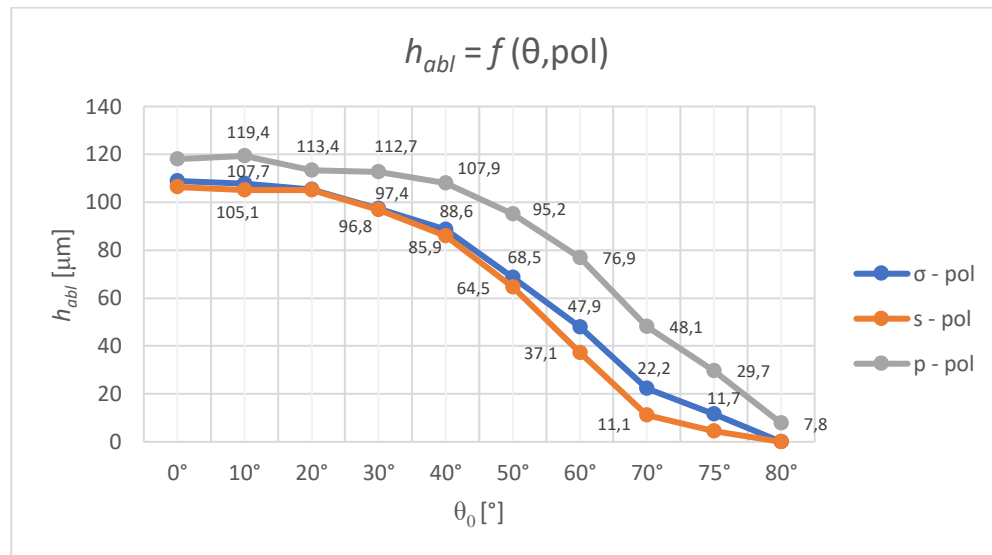
Ukázku testovací destičky po dokončeném mikroobrábění všech 3 sad čtvercových polí je možné vidět níže na Obr. 32.



Obr. 32 - Testovací destička po provedení experimentu třetí fáze

Pro vyhodnocení celkové hloubky úběru materiálu h_{abl} u všech tří sad čtvercových polí byl použit optický mikroskop Alicona IFM G5. V prostředí analyzačního softwaru byla nasnímána jednotlivá pole a pomocí měřicích funkcí byla

získána příslušná hloubka úběru materiálu pro každé pole. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky a z těchto hodnot byl následně vytvořen graf, který je možné vidět níže na Obr. 33.



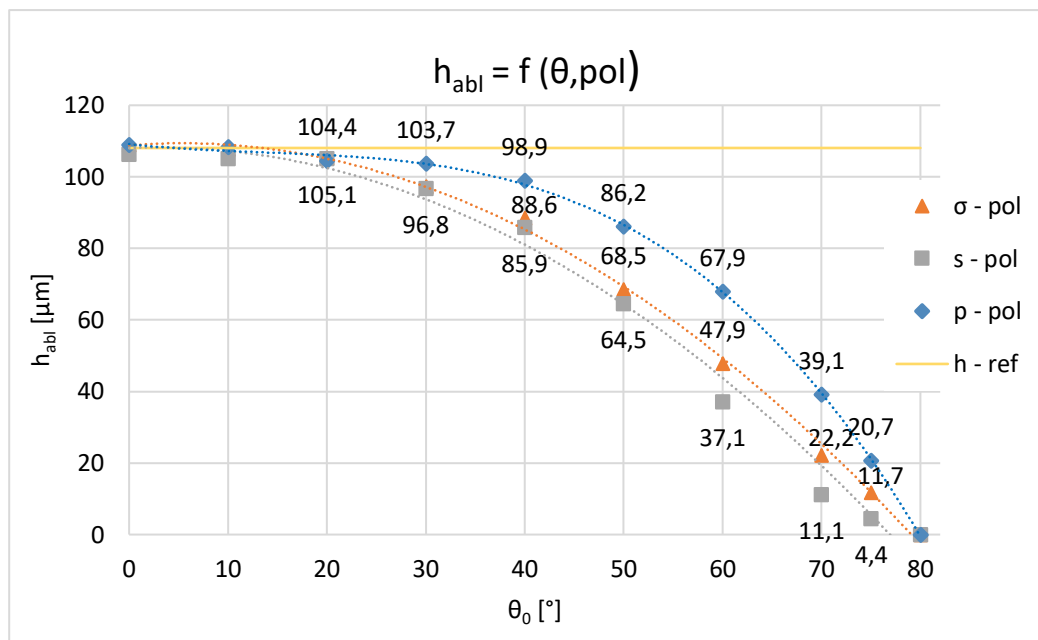
Obr. 33 - Graf závislosti úběru materiálu na úhlu sklonu obráběné plochy s různými typy polarizace

Z grafu závislosti hloubky úběru materiálu na úhlu sklonu obráběné plochy s různými typy polarizace je na první pohled patrné, že největší hloubky úběru materiálu bylo dosaženo při mikroobrábění s horizontální lineární polarizací (p-pol).

Při porovnávání křivek pro s-pol (oranžová křivka) a σ -pol (modrá křivka) lze na grafu vidět, že přibližně do úhlu sklonu obráběné plochy 20°-25° si obě křivky zachovávají téměř konstantní hloubku úběru materiálu. Při dalším růstu úhlu sklonu obráběné plochy dochází k poklesu hloubky úběru. Průběh obou křivek je srovnatelný do úhlu sklonu obráběné plochy 30°. Od tohoto bodu se křivky rozcházejí a u s-pol začíná být pokles hloubky úběru materiálu strmější. I když je tento rozdíl malý, při zvyšujícím se úhlu sklonu obráběné plochy rozdíl mezi jednotlivými křivkami narůstá. Zároveň v případě, kdy by byl během mikroobrábění použit větší počet opakování, by byl rozdíl mezi křivkami rovněž výraznější.

Při porovnání křivky pro p-pol se zbylými dvěma křivkami je největším rozdílem, že je průběh hloubky úběru materiálu konstantní téměř až do hodnoty úhlu sklonu obráběné plochy 35°. Za tímto bodem začíná křivka pro p-pol klesat. Průběh jejího poklesu lze považovat za lineární až do hodnoty 80°, kdy byl experiment ukončen.

Pro lepší možnost srovnání všech tří křivek závislosti hloubky úběru materiálu na úhlu sklonu obráběné plochy pro odlišné typy polarizací byl vytvořen graf, který je níže na Obr. 34. Do tohoto grafu byla přidána referenční křivka maxima hloubky úběru materiálu h_{ref} a byly v něm sjednoceny začátky všech křivek. Toto sjednocení bylo provedeno z důvodu vyšších počátečních hodnot hloubky úběru materiálu u p-pol, oproti zbylým dvěma polarizacím. Zároveň byly hodnoty pro jednotlivé typy polarizace doplněny polynomicou spojnicí trendu třetího stupně.



Obr. 34 - Srovnávací graf závislosti úběru materiálu na úhlu sklonu obráběné plochy s různými typy polarizace

Z grafu na Obr. 34 je mnohem výrazněji vidět, jak značný je rozdíl mezi p-pol a ostatními dvěma typy polarizace. Pro vhodnější relativní porovnání byly vypočteny procentuální poklesy hloubky úběru materiálu pro jednotlivé polarizace. Vypočtené hodnoty jsou vypsány v Tab. 12.

Tab. 12 - Procentuální pokles hloubky úběru materiálu pro různé typy polarizace

	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
σ -pol	2,4%	9,9%	18,0%	36,6%	55,7%	79,5%	89,2%
s-pol	2,8%	10,4%	20,5%	40,3%	65,7%	89,7%	95,9%
p-pol	3,4%	4,0%	8,5%	20,3%	37,2%	63,8%	80,8%

Z Tab. 12 je zřejmé, že k nejmenšímu procentuálnímu poklesu hloubky úběru materiálu docházelo v případě p-pol. V případě s-pol a σ -pol byl trend poklesu hloubky úběru materiálu téměř srovnatelný. Do hodnoty sklonu obráběné plochy 50° byl rozdíl mezi hodnotami pouze v jednotkách procent. Od hodnoty úhlu sklonu obráběné plochy 60° byl rozdíl mezi s-pol a σ -pol mnohem výraznější a dosáhl hodnoty rozdílu 10%.

Při porovnání procentuálního poklesu hloubky úběru materiálu pro s-pol a p-pol bylo dosaženo mnohem zajímavějších výsledků. Při úhlu sklonu 20° byl sice rozdíl mezi polarizacemi pouze v řádu několika desetin procent. S rostoucím úhlem sklonu obráběné plochy byl však rozdíl mnohem výraznější. Například při úhlu sklonu 30° je rozdíl poklesu hloubky úběru materiálu mezi polarizacemi více jak dvojnásobný ve prospěch p-pol a stejně tomu je i při úhlu sklonu 40°. Při dalším nárůstu úhlu sklonu tento rozdíl klesal, i přesto však nebyl zanedbatelný.

Z výsledků experimentu v rámci třetí fáze je zřejmé, že vhodným typem polarizace, který lze použít pro texturování obecných ploch, je buď p-pol, nebo σ -pol, která je kolmá na směr sklonu obecné plochy. Hlavním důvodem pro výběr p-pol je

především zachování konstantní hloubky úběru materiálu při vyšších úhlech sklonu obráběné plochy. Další předností p-pol je, že během obrábění bylo dosaženo lehce vyšší hloubky úběru materiálu než v případě s-pol a σ -pol, při stejných podmínkách obrábění, tudíž mikroobrábění s tímto typem polarizace lze považovat za efektivnější než u zbylých dvou typů polarizace. U σ -pol je značnou výhodou, oproti nezvolené s-pol, že během mikroobrábění nezáleží na směru sklonu obráběné plochy, lze tedy všechny plochy obrábět s jedním nastavením úhlu natočení HWP, jak již bylo zmíněno v teoretické části této práce.

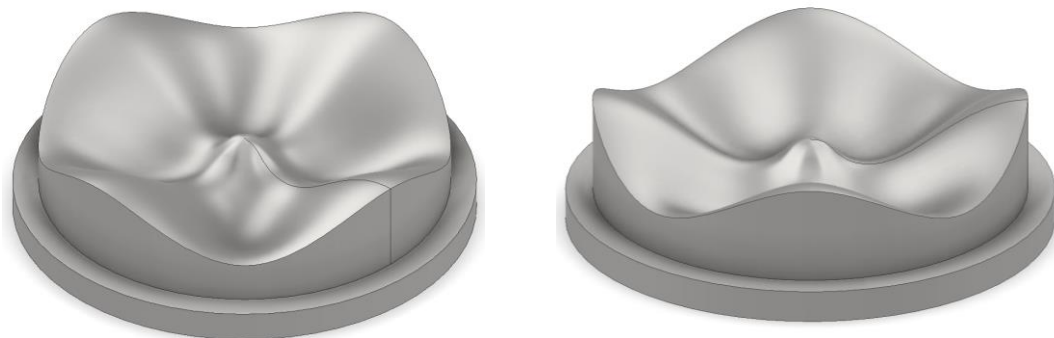
7.3. Testovací fáze experimentální části

Po dokončení všech přípravných fází, během kterých bylo zjištěno správné nastavení laserového zařízení pro různé druhy polarizací a průběh interakce laserového paprsku s povrchem dílce s určitým sklonem obráběné plochy, bylo možné přistoupit k provedení závěrečného experimentu. V této části práce byl autorem ověřen technologický postup výroby daného dílce pomocí laserového mikroobrábění. Experiment pro testovací část spočíval v tvorbě textury na navrženém dílci, jehož povrch bude složen z obecných ploch a bude při jeho mikroobrábění použita kruhová (σ -pol) a horizontální lineární polarizace (p-pol).

7.3.1. Příprava vzorku a dat pro laserový systém

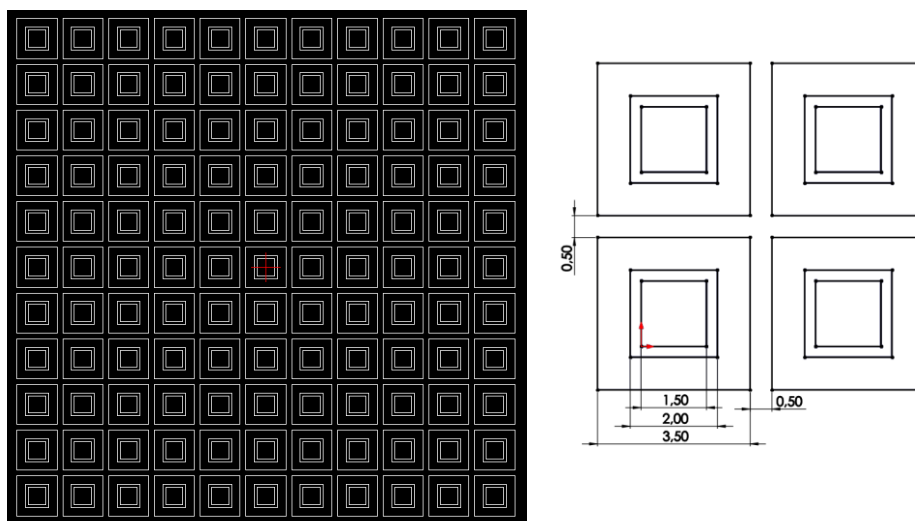
Pro uskutečnění experimentu bylo nutné navrhnout a nechat vyrobit díl, který bude složen z obecné plochy. Před samotným návrhem bylo nutné stanovit maximální úhel sklonu šikmých ploch v rámci obecné plochy. Na základě výsledků třetí přípravné fáze a požadavku maximální odchylky hloubky vytvořené textury, byla hodnota maximálního úhlu sklonu šikmých ploch stanovena na 45° (snahou bylo, aby hloubka úběru obráběného materiálu dosáhla i u šikmých ploch vždy minimálně 80 % hodnoty hloubky úběru materiálu u rovné plochy). Snahou bylo vytvoření modelu, který bude obsahovat co nejvíce rozdílných ploch a různých přechodů.

Finální verze testovacího dílce je složena ze čtyř segmentů „sedlového“ tvaru, které jsou osově symetrické. Vzhled modelu testovacího dílce je možné vidět na Obr. 35. Vnější průměr obecné plochy je 40 mm a její výška je 8 mm, průměr podstavce je 45 mm a celková výška je 12 mm (detailnější popis viz Příloha 1). Maximální sklon šikmé plochy je přibližně 46° . Samotná výroba byla dle zadání zajištěna Ústavem výrobních strojů a zařízení ČVUT. Pro účely vložení modelu do programu řídicího systému DMC bylo dále nutné exportovat model testovacího dílce do formátu STEP.



Obr. 35 - Model testovacího dílce

Dalším krokem bylo vytvoření vzoru textury, která bude umístěna na obecnou plochu testovacího dílce. Pro experiment byla vytvořena textura složená z čtverců (Obr. 36) s délkou strany 3,5 mm a mezerou mezi jednotlivými čtverci 0,5 mm. Stejně jako u modelu testovacího dílce bylo i v tomto případě nutné vzor exportovat do požadovaného formátu, který bude kompatibilní s řídicím systémem DMC. V případě vzoru textury se jednalo o formát DXF.



Obr. 36 - Vzory textury čtverce

7.3.2. Provedení experimentu

Experiment byl proveden na dvou kusech testovacího dílce. Pro každý kus byla použita jiná polarizace. Jen kus byl obroben se σ -pol a druhý kus byl vyroben s p-pol. Na oba kusy byla vyrobena totožná textura čtverců, aby bylo možné kusy vzájemně porovnat a stanovit případné rozdíly v polarizacích při mikroobrábění obecných ploch.

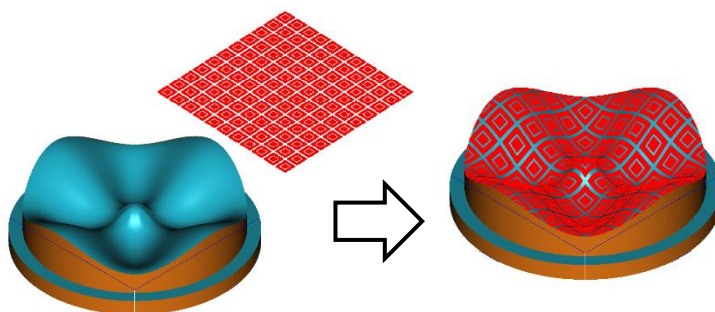
Před samotným zahájením mikroobrábění testovacích dílců bylo nutné vhodně seřídit řídicí systém DMC a laserový zdroj. Také bylo nutné vytvořit program pro každý testovací dílec zvlášť. V rámci programů pro mikroobrábění bylo nutné provést správné seřízení CAD modelu testovacího dílce a textury ve virtuálním prostředí řídicího

systému DMC pomocí kamery, s reálným kusem umístěným na pohyblivém stole laserového zařízení. Dále bylo nutné nastavit laserový zdroj, především jeho výkon. Bylo snahou, aby u obou dvou porovnávaných dílců proběhlo mikroobrábění se stejným průměrným výkonem laserového zdroje přibližně $P_{avg} \approx 1600$ mW. Program byl dále doplněn o několik základních funkcí, jako jsou zapnutí odsávání, pauzy mezi důležitými segmenty programu a jiné důležité funkce pro správný a bezchybný běh programu.

V rámci řídicího systému DMC bylo dále nutné přidat do programu procesu mikroobrábění funkci *Stitching*. Jedná se o funkci, která napomáhá k rozdělení textury na segmenty, které je možné vyrábět najednou. Funkce *Stitching* se používá v případech, kdy je textura větší, než je pole galvoskenery, nebo v případech, kdy je rozdělení textury do segmentů nutné z důvodu obrábění strmých ploch, které není možné vhodně obrobit v jedné hladině Z. Pomocí *Stitching* funkce lze strmé plochy rozdělit do několika hladin Z, jejichž maximální velikost je dána hodnotou maximální hloubky ostrosti laserového paprsku. V rámci funkce *Stitching* bylo možné zvolit metodu *Grid* (mřížka), spočívající v rozdělení celého vzoru textury na menší pole, která mají podobné vlastnosti (jako jsou hladina Z či vzájemná blízká pozice X a Y), nebo metodu *Object centering* (centrování objektu) spočívající v rozdělení textury na jednotlivé objekty textury, které se vyrábějí vždy se zaměřením na střed daného objektu.

Pro účely experimentu byla jako vhodnější metoda vybrána *Object centering*, a to z důvodu, že vyráběná textura je sama o sobě rozdělena do samostatných segmentů čtvercových polí. Při obrábění jednotlivých segmentů by proces obrábění měl být stabilnější a plynulejší, což by mohlo mít pozitivní vliv na výslednou texturu. Zároveň v případě mikroobrábění s p-pol by bylo žádoucí, aby bylo umožněno měnit nastavení úhlu natočení HWP v rámci jednotlivých polí, což by metoda *Object centering* mohla umožňovat. V návaznosti na standardní vybavení použitého laserového zařízení nebylo možné metodu *Object centering* využít. Hlavním důvodem byla absence dynamické optické osy Z, kterou použitý laserový systém nedisponuje, ale pro správné fungování metody *Object centering* je tato dynamická optická osa Z nezbytná. Proto byla v obou programech pro testovací dílce použita metoda *Grid*, která texturu rozdělila do segmentů podle srovnatelných hladin Z.

Samotný dialog pro výrobu textury byl velice jednoduchý a skládal se pouze z modelu textury a funkce *3D projection*, která zajišťuje kolmou projekci textury na povrch obecného tvaru vloženého dílu (Obr. 37).



Obr. 37 – Provedení funkce *3D projection* v řídicím systému DMC

Pro obrábění prvního testovacího kusu byla všechna nastavení velice jednoduchá. Model i texturu bylo možné vložit bez jakýchkoli nutných úprav, záleželo pouze na správném slícování modelu, textury a reálného kusu. Jelikož se celý kus obráběl pouze s σ -pol, tedy s nastavením HWP na $22,5^\circ$ a umístěním QWP do optické soustavy, nebylo nutné nijak toto nastavení během výrobního procesu měnit. Parametry programu řídicího systému DMC a laserového zdroje byly nastaveny podle hodnot viz Tab. 13 níže.

Tab. 13 - Přehled parametrů nastavení laserového zařízení pro první testovací dílec

Parametr	Hodnota
Průměrný výkon [mW]	1600
Počet opakování	58
Hloubka úběru [mm]	0,1

V případě druhého testovacího dílce, který měl být vyroben s použitím p-pol, byla příprava programu pro mikroobrábění o něco složitější, jelikož bylo nutné během procesu obrábění zajistit správnou orientaci směru p-pol vzhledem ke sklonu obráběné plochy. Řídicí systému DMC bohužel žádnou funkci adaptabilního řízení orientace polarizace vzhledem k obráběnému tvaru nenabízí. Bylo tedy nutné texturu rozdělit do jednotlivých segmentů a přiřadit jim vhodnou orientaci úhlu natočení HWP tak, aby byl daný segment textury obroběn právě p-pol. Jak vyplývá z výsledků třetí přípravné fáze, aby bylo dosaženo obrábění p-pol, musí být orientace polarizace kolmá na směr největšího sklonu.

Jelikož se vyráběná textura skládá z jednotlivých čtvercových polí, bylo tohoto rozdělení využito a pro každé pole textury byl nalezen vhodný úhel natočení HWP. Samotné přiřazení hodnot úhlu natočení HWP pro jednotlivá pole textury bylo provedeno na základě analýzy povrchu v softwaru Autodesk Inventor 2021, díky které bylo možné zobrazit zakřivení povrchu pomocí barevného spektra (Obr. 38 a). Dále byla pro určování vhodného úhlu natočení HWP využita funkce *Slicing* řídicího systému DMC, která umožňovala rozdělení modelu testovacího dílce do vrstev o dané velikosti. Při pohledu shora na model rozdělený do jednotlivých vrstev bylo možné vidět vrstevnice obecných ploch, které usnadňovaly identifikaci strmosti jednotlivých obecných ploch modelu. Spolu s možností na model promítnout danou texturu, viz Obr. 38 b, šlo funkci, která přiřazování hodnot úhlu natočení HWP značně zjednodušila.



Obr. 40 - Přehledový snímek barevně odlišených výrobních částí v prostředí DMC

Po rozdělení a přípravě textury bylo možné přejít k nastavení parametrů obrábění. Finální parametry programu řídicího systému DMC a laserového zdroje byly nastaveny podle hodnot viz Tab. 14 níže.

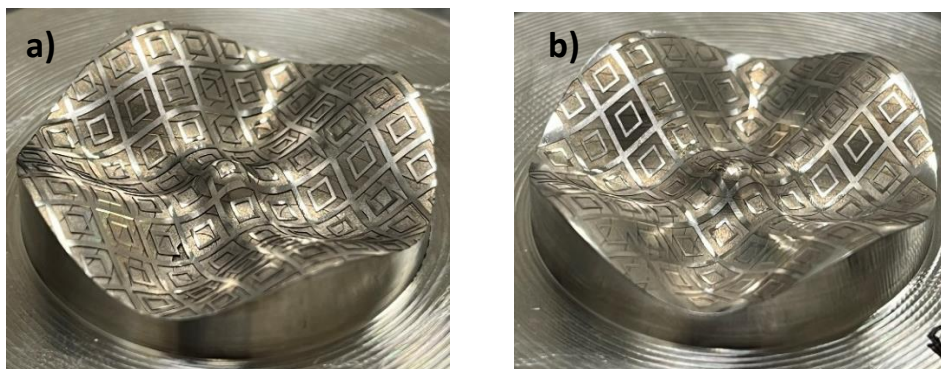
Tab. 14 - Přehled parametrů nastavení laserového zařízení pro druhý testovací dílec

Parametr	Hodnota
Průměrný výkon [mW]	1600
Počet opakování	32
Hloubka úběru [mm]	0,1

Oproti prvnímu testovacímu dílci, který byl vyráběn se σ -pol, došlo v případě mikroobrábění s p -pol k redukci počtu opakování n_{count} z 58 na 32 opakování. Důvodem této změny byla vysoká náročnost obsluhy, jelikož v řídicím systému DMC nebylo možné vložit všechny výrobní části do jednoho programu, ale bylo nutné výrobní části rozdělit do samostatných programů, které byly spouštěny jednotlivě jeden po druhém.

7.3.3. Výsledky testovací části

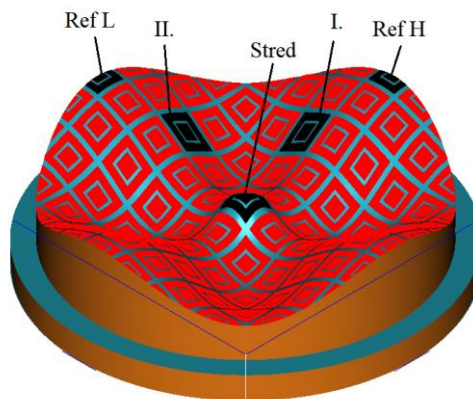
Oba testovací dílce s vyrobenou texturou čtverce je možné vidět na Obr. 41 níže.



Obr. 41 - Testovací dílec s texturou obrobenu s σ -pol (a), s p -pol (b)

Na první pohled obě vytvořené textury na testovacích dílcích odpovídaly návrhu, který byl vytvořen v rámci řídicího systému DMC během vytváření programu pro mikroobrábění. Velikosti a umístění polí odpovídají návrhu. Jediným neočekávaným prvkem, který se objevil na obou testovacích dílcích, byly výstupky v textuře, které odpovídají vrstevnicím (hladinám Z), v kterých byly jednotlivé části čtvercových polí textury vyráběny.

Pro analýzu a možnost porovnání vyrobených textur s jiným druhem polarizace z hlediska úběru materiálu bylo nutné použít optický mikroskop Alicona IFM G5. Jelikož celá textura obsahuje celkem 89 čtvercových polí, pro samotné vyhodnocení byly měřeny a analyzovány hloubky úběru materiálu pouze v několika vybraných místech. Místa, v nichž bylo měření provedeno, jsou zakreslena na schématu viz Obr. 42. Jednalo se v první řadě o dvě krajní referenční hodnoty nacházející se na levém (Ref L) a horním kraji (Ref H). Dalšími hodnocenými pozicemi pak byly střed textury a dvě pole (I. a II.), která se nacházejí na místě, kde dochází k největší změně sklonu a tvaru plochy v rámci jednoho čtvercového pole textury.

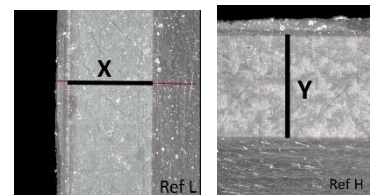


Obr. 42 - Schéma vybraných polí pro měření hloubky úběru materiálu

U obou testovacích dílců v rámci každého pole byly zkoumány hloubky úběru materiálu v jednom až čtyřech místech. Pro každé místo bylo nasnímáno celkem sedm hodnot hloubek úběru materiálu. Z těchto hodnot byla vypočtena průměrná hodnota společně se směrodatnou odchylkou. Vypočtené průměrné hloubky jsou přehledně sepsány do Tab. 13-16 níže. Přehledové snímky u tabulek zobrazují přesná místa, kde byly hodnoty odečteny.

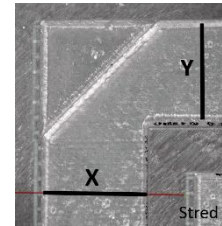
Tab. 15 - Vypočtené hodnoty hloubek úběru materiálu pro pole Ref L a Ref H

Označení pole	Ref L	Ref H	Ref L	Ref H
Místo	X	Y	X	Y
Typ polarizace	σ -pol		p-pol	
Hloubka úběru [μm]	94,92	96,49	54,73	45,12
Směrodatná odchylka	0,79	0,33	0,77	3,59
Průměr [μm]	95,70		49,92	



Tab. 16 - Vypočtené hodnoty hloubek úběru materiálu pro pole Stred

Označení pole	Stred			
Místo	X	Y	X	Y
Typ polarizace	σ -pol		p-pol	
Hloubka úběru [μm]	85,68	85,35	43,51	45,30
Směrodatná odchylka	2,32	2,76	3,39	1,28
Průměr [μm]	85,52		44,41	

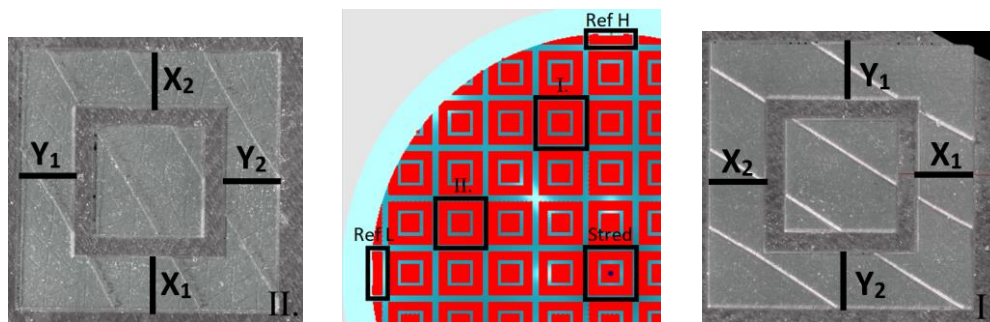


Tab. 17 - Vypočtené hodnoty hloubek úběru materiálu pro pole I.

Označení pole	Pole I.							
Místo	X1	X2	Y1	Y2	X1	X2	Y1	Y2
Typ polarizace	σ -pol				p-pol			
Hloubka úběru [μm]	95,57	84,04	80,52	77,20	54,95	44,49	47,31	39,54
Směrodatná odchylka	1,25	1,94	0,97	1,78	0,71	1,28	1,55	1,58
Průměr [μm]	84,33				46,57			

Tab. 18 - Vypočtené hodnoty hloubek úběru materiálu pro pole II.

Označení pole	Pole II.							
Místo	Y2	Y1	X2	X1	Y2	Y1	X2	X1
Typ polarizace	σ -pol				p-pol			
Hloubka úběru [μm]	77,59	83,59	89,39	101,58	41,99	47,04	42,39	56,87
Směrodatná odchylka	2,20	0,86	1,29	1,01	1,09	0,93	1,54	0,88
Průměr [μm]	88,04				47,07			



Obr. 43 - Přehledové schéma měřených míst pro Pole I. a Pole II.

Místa měření X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 označují místa se stejnou pozicí, tedy místa se stejným sklonem a tvarem obráběné plochy.

7.3.4. Analýza výsledků

Jelikož byl v programu pro mikroobrábění u každého z testovacích kusů nastaven odlišný počet opakování, nebylo možné srovnání hloubek úběru materiálu provést přímo. Jako nejvhodnější metoda pro porovnání hloubek vytvořených textur s odlišným typem polarizace bylo zvoleno procentuální porovnání poklesu hloubek úběru materiálu.

Jako první bylo provedeno procentuální porovnání poklesů hloubek úběru materiálu mezi jednotlivými poli jako celky. V Tab. 19 níže jsou vypsány průměrné

hodnoty vypočtené z naměřených hodnot v rámci daných polí. Ve spodní části tabulky jsou hodnoty hloubek úběru materiálu přepočteny na hodnoty procentuálního poklesu hloubek úběru materiálu. Jako referenční hodnoty pro σ -pol i p-pol byly zvoleny průměry hodnot naměřených v rámci polí Ref L a Ref H, aby bylo možné jednotlivé hodnoty mezi sebou snadněji porovnat. Povrch, na kterém jsou tato dvě pole, má z celého volného povrchu testovacího dílce nejmenší změnu tvaru a nejmenší křivost v rámci jednoho pole textury. Během mikroobrábění těchto referenčních polí by měl být proces obrábění nejstabilnější a mělo by zde dojít k nejmenším odchylkám od mikroobrábění povrchu, který je kolmý na osu laserového paprsku.

Tab. 19 - Procentuální porovnání hloubek úběru materiálu mezi jednotlivými poli

	Ref L, Ref H	Stred	Pole I.	Pole II.
Průměrná hloubka úběru σ -pol [μm]	95,704	85,516	84,333	88,039
Průměrná hloubka úběru p-pol [μm]	49,924	44,406	46,573	47,070
Hloubka úběru pro σ -pol [%]	100,0%	89,4%	88,1%	92,0%
Hloubka úběru pro p-pol [%]	100,0%	88,9%	93,3%	94,3%
rozdíl %		-0,5%	5,2%	2,3%

Z výsledků v Tab. 19 je zjevné, že rozdíly v hodnotách procentuálního poklesu hloubek úběru materiálu jsou na první pohled relativně malé, avšak pro účely zkoumání vlivu polarizace na hodnotu hloubky úběru materiálu nejsou ani takto nízké rozdíly zanedbatelné.

Vzájemné porovnání procentuálních poklesů hloubek úběru v případě pole s názvem “Střed“ nemá význam, jelikož i v případě testovacího dílce, kde byla použita p-pol, byla pro toto konkrétní pole umístěné ve středu textury použita kruhová polarizace z důvodu symetrického tvaru a zakřivení ve všech směrech. Vzniklou odchylku 0,5% v rámci tohoto pole lze brát jako důsledek použití rozdílného počtu opakování pro mikroobrábění s σ -pol a p-pol.

V případě polí označených “Pole I.“ a “Pole II.“ je rozdíl procentuálních poklesů hloubek mezi σ -pol a p-pol v řádu jednotek procent. Jedním z důvodů, proč tento rozdíl nedosahuje větší hodnoty, může být použití málo progresivních hodnot nastavení řídicího systému DMC a laserového zdroje, které by se spíše použily při reálné výrobě. Díky tomu by pak procentuální rozdíl v hloubkách úběru materiálu mezi polarizacemi mohl být větší. Dalším důvodem může být tvarová složitost plochy, na které bylo pole textury vytvořeno, jelikož se jedná o místo na povrchu testovacího dílce s největší změnou tvaru a zakřivením. Z tohoto důvodu bylo provedeno ještě jedno dílčí srovnání, a to procentuální porovnání poklesů hloubek úběru materiálu, které bylo provedeno pouze pro pole s označení “Pole I.“ a “Pole II.“. Byly porovnávány průměrné hodnoty hloubek úběru materiálu v jednotlivých místech, v nichž bylo provedeno měření v rámci těchto dvou polí. Jelikož jsou pole na sebe zrcadlově symetrická, průměrná hodnota hloubky úběru materiálu byla vypočtena z hodnot naměřených na místech, která jsou k sobě vzájemně zrcadlově postavena.

V Tab. 20 jsou vypsány vypočtené průměrné hodnoty pro jednotlivá měřená místa. Ve spodní části tabulky jsou přepočty na procentuální poklesy hloubek úběru materiálu vůči referenci.

Tab. 20 - Procentuální porovnání hloubek úběru materiálu mezi měřenými místy pro Pole I. a Pole II.

	Ref L, Ref H	X1	X2	Y1	Y2
Průměrná hloubka úběru σ -pol [μm]	95,704	98,574	86,714	82,057	77,398
Průměrná hloubka úběru p-pol [μm]	49,924	55,913	43,437	47,175	40,762
Hloubka úběru σ -pol [%]	100,0%	103,0%	90,6%	85,7%	80,9%
Hloubka úběru p-pol [%]	100,0%	112,0%	87,0%	94,5%	81,6%
rozdíl %		9,0%	-3,6%	8,8%	0,7%

V Tab. 20 je možné vidět, že rozdíly mezi jednotlivými porovnávanými místy jsou značně nekonzistentní. V místech X1 a Y1 se rozdíl procentuálního poklesu hloubek úběru materiálu blíží téměř 10 %, což již lze označit jako znatelný rozdíl a lze tedy říci, že vliv polarizace má při procesu mikroobrábění své opodstatnění. Na druhou stranu z výsledků zároveň vyplývá, že v případě místa s označením X2 je tomu přesně naopak a při mikroobrábění s p-pol v tomto místě došlo k většímu poklesu hloubky úběru materiálu než při použití σ -pol. U posledního, čtvrtého měřeného místa s označením Y2 se rozdíl poklesu hloubky úběru materiálu blíží jednomu procentu, lze tedy říci, že v tomto místě není příliš velký rozdíl mezi oběma polarizacemi.

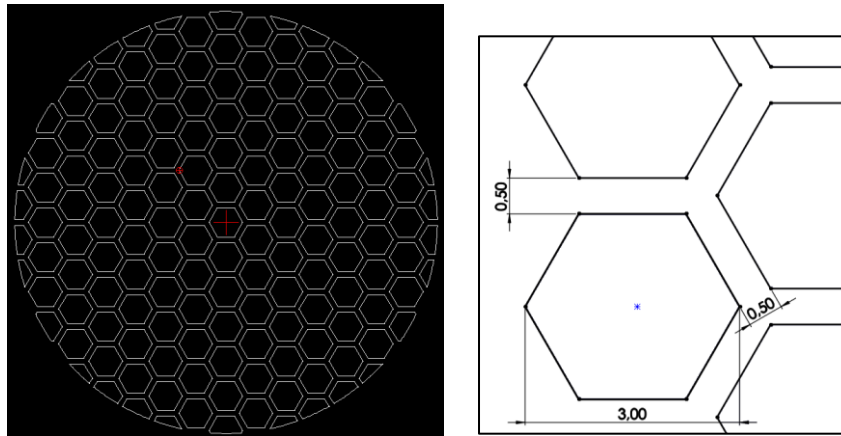
Na základě výsledků procentuálního poklesu hloubek úběru materiálu pro jednotlivá pole a částečně pak na základě výsledků dílčího srovnání procentuálního poklesu hloubek úběru materiál pro “Pole I.” a “Pole II.” lze říci, že typ polarizace má na mikroobrábění jistý vliv, který nelze zcela zanedbat, a při mikroobrábění s použitím p-pol lze dosáhnout menšího poklesu hloubek úběru materiálu při obrábění ploch s větším sklonem než při použití σ -pol.

Zároveň je nutné uvést, že na základě výsledků dílčího srovnání procentuálního poklesu hloubek úběru materiál pro “Pole I.” a “Pole II.”, je při mikroobrábění s p-pol, potřeba zvážit správnost rozdělení a volbu vhodného nastavení úhlu natočení HWP vůči obráběnému místu tak, aby bylo zajištěno, že úhel natočení HWP skutečně dává za vznik p-pol, a nikoliv jinému typu polarizace.

7.4. Přenos znalostí na jiný typ struktury

Pro ověření, zda je možné využít stejného principu mikroobrábění s využitím funkce *3D projection* spolu s funkcí *Stitching* k tvorbě libovolné textury pro praktické aplikace, byl obroben ještě jeden kus testovacího dílce, během jehož obrábění bylo využito nastavení progresivnějších podmínek obrábění. Především se jedná o nastavení parametrů, díky kterým lze dosáhnout efektivnějšího obrábění a zároveň lze díky nim zkrátit výrobní čas.

Pro účely provedení experimentu byl použit stejný testovací díl se sedlovým tvarem jako v předešlém experimentu. Textura, která byla na testovací díl vyráběna, byla však změněna. Vizualizaci této textury je možné vidět na Obr. 44 níže. Jedná se o texturu, která je složená z polí ve tvaru šestiúhelníků ($r_0=1,5$ mm), kde je mezi jednotlivými poli mezera přibližně 0,5 mm.



Obr. 44 - Vzor textury s šestiúhelníky

I přestože z analýzy výsledků vyplývá, že vhodnějším typem polarizace pro mikroobrábění obecných ploch s proměnlivým sklonem plochy je polarizace typu p-pol, má použití tohoto typu polarizace určitá omezení. Jedním, a tím největším, je složitost přípravy programu pro mikroobrábění, především se jedná o komplikovanost správného nastavení úhlu natočení HWP tak, aby byla obráběná plocha obrobena skutečně p-pol. Proces správného nastavení p-pol je úměrně náročný složitosti vyráběné textury. Jelikož se vybraná textura řadí mezi složitější, a to jak kvůli samotnému šestiúhelníkovému tvaru jednotlivých polí, tak i kvůli počtu a rozložení polí na povrchu testovacího dílce, tak ačkoli by bylo lepšího výsledku dosaženo při použití p-pol, nebylo bohužel kvůli složitosti správného nastavení programu a řídicího systému možné mikroobrábění šestiúhelníkové textury s p-pol provést, a byla pro účely výroby textury použita σ -pol.

Parametry, které byly nastaveny v programu řídicího systému DMC a laserového zdroje jsou sepsány v Tab. 21 níže.

Tab. 21 - Přehled parametrů nastavení laserového zařízení pro progresivní obrábění

Parametr	Hodnota
Opakovací frekvence [kHz]	600
Průměrný výkon [mW]	5000
Počet opakování	40
Hloubka úběru [mm]	0,1

K největší změně v použitých parametrech pro mikroobrábění došlo především u laserového zdroje. Došlo k téměř trojnásobnému navýšení průměrného výkonu a opakovací frekvence. Takto nastavené parametry by měly odpovídat podmínkám, které se v praxi pro účely mikroobrábění běžně používají.

Testovací dílec s vyrobenou texturou šestiúhelníků je možné vidět na Obr. 45 níže.



Obr. 45 – Testovací dílec s texturou šestiúhelníků

Na Obr. 45 lze vidět, že vzniklá textura odpovídá vytvořenému návrhu. Stejně jako u předešlých testovacích dílců s texturou čtverců, se však i nyní v textuře šestiúhelníků objevily výstupky, které odpovídají vrstevnicím. Dalším pozorovaným neočekávaným prvkem, který se objevil na dně obráběných polí, je pravidelný trojúhelníkový pattern.

Zhodnocení, zda změna parametrů nastavení vedla k větší efektivitě a časové úspoře, bylo provedeno na základě porovnání velikosti obráběných ploch vůči celkovému výrobnímu času, dále bylo do hodnocení zahrnuto i hledisko hloubky úběru materiálu. V obou směrech byly výsledky pozitivní. Z hlediska časové efektivity došlo v případě mikroobrábění s progresivnějšími parametry k úspoře a poklesu výrobního času na jednotku plochy (mm^2) o 15 %. Zároveň bylo dosaženo větší hloubky úběru materiálu, a to přibližně o 18-24 %, v závislosti na porovnávaném místě.

7.5. Diskuse dosažených výsledků

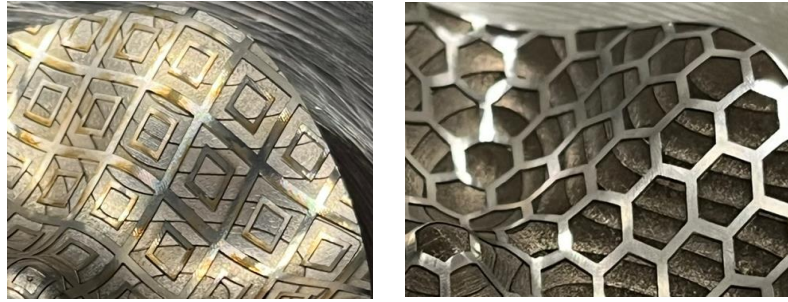
Z výsledků testovací části experimentu, je zřejmé, že při obrábění obecných ploch s proměnlivým sklonem lze při použití p-pol dosáhnout větší hloubky úběru materiálu, než je tomu při mikroobrábění s σ -pol.

Při použití p-pol bylo v první řadě dosaženo, při stejném nastavení laserového zařízení (stejný výkon, počet opakování), vyšší hloubky úběru materiálu na obráběné ploše kolmé k ose laserového paprsku než u σ -pol, a to přibližně o 10 % (což je patrné z rozdílných počátků křivek pro p-pol a σ -pol v grafu na Obr. 33), což je v souladu s výsledky studie [73]. Důvodem tohoto rozdílu v hloubce úběru materiálu při použití různých polarizací je odlišná účinnost energie laserového paprsku (zesílení elektrického pole indukovaného LSFL). Zároveň byl pozorován i menší procentuální pokles hloubky úběru materiálu se stoupajícím sklonem obráběné plochy než v případě použití σ -pol. Je však nutné vzít v úvahu, že rozdíl mezi jednotlivými polarizacemi byl při

porovnání procentuálního poklesu hloubky úběru materiálu, vztaženého k referenčním hodnotám, v řádu jednotek procent. Zároveň nelze přehlédnout nekonzistentní výsledky hloubek úběru materiálu v místech s různou mírou sklonu a změnou tvaru v případě použití obou typů polarizací.

V případě mikroobrábění s p-pol je navíc nutné brát v úvahu vysokou náročnost přípravy dat a nastavení řídicího systému. Stěžejní je při jejím použití zejména správné rozdělení a volba vhodného nastavení úhlu natočení HWP tak, aby bylo zajištěno, že úhel natočení HWP při obrábění daného místa s určitou mírou a směrem sklonu skutečně dává za vznik p-pol, a nikoliv jinému typu polarizace. V případě námi prováděného experimentu bylo nastavení úhlu natočení HWP provedeno na základě analýzy povrchu a následného ručního přiřazení hodnot úhlů natočení HWP dle výsledků tvarové analýzy, jelikož používaný řídicí systém DMC (ani žádný jiný dostupný program) nenabízel tuto funkci, ani žádnou funkci jí podobnou, která by se správným nastavením úhlu natočení HWP pomohla. Použitý ruční způsob přiřazování nastavení úhlu natočení HWP na základě tvarové analýzy má výrazná omezení, a to především z hlediska přesnosti a časové náročnosti, což pak značně limituje možnost jejího použití u složitějších textur. Pro správné nastavení úhlu natočení HWP i pro tvarově složitější textury by bylo příhodnější použití počítačové techniky s vhodnými algoritmy, díky kterým by bylo možné mikroobráběnou obecnou plochu spolu s texturou rozdělit podle zvolených kritérií (velikost pole, míra a intenzita sklonu plochy) do segmentů se stejnými nebo podobnými vlastnostmi a následně tyto segmenty vyrábět společně s vhodně přiřazeným úhlem natočení HWP. Díky těmto počítačovým algoritmům by bylo možné dosáhnout přesnějších výsledků s menší mírou chybovosti a s větší opakovatelností. Výsledky, kterých by díky nim bylo dosaženo by byly pravděpodobně konzistentnější, a to především z hlediska docílení konstantní hloubky úběru materiálu na celém mikroobráběném povrchu. Jejich použití by umožnilo vyrábět libovolné textury bez ohledu na tvar textury i tvar povrchu, kde bude textura vyrobena. Zároveň by tyto algoritmy mohly být zabudované v samotném řídicím systému laserového zařízení, aby byla zajištěny kompatibilita a opakovatelnost, současně by toto řešení přispělo i k uživatelské přívětivosti řídicího systému.

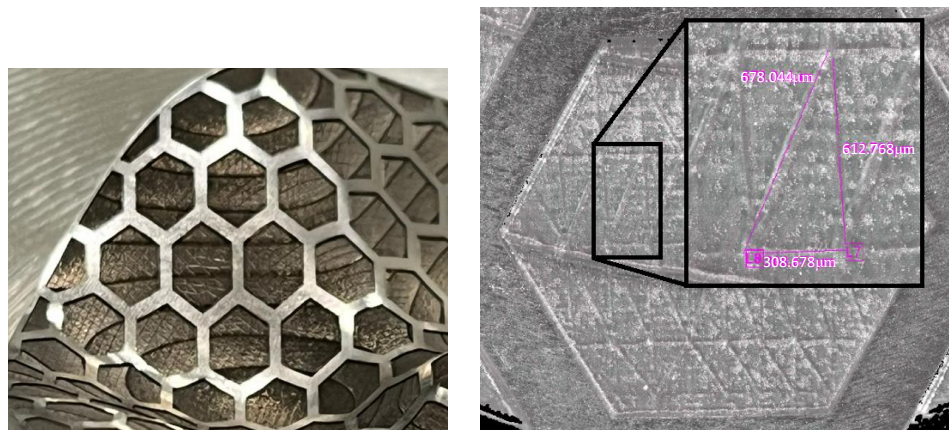
Při hodnocení vzhledu výsledné obrobené textury u všech třech testovacích dílců (Obr. 17 a Obr. 21) vytvořená textura odpovídala návrhu, který byl nastaven v programu řídicího systému DMC. Jediným neočekávaným prvkem, který se objevil na všech třech testovacích dílcích, byly výstupky v textuře (Obr. 46), které odpovídají vrstevnicím (hladinám Z), v kterých byly jednotlivé části čtvercových polí textury vyráběny.



Obr. 46 - Ukázka vytvořených výstupků v texturách kopírující vrstevnice

Předpokládaným důvodem vzniku těchto výstupků je způsob rozdělení vyráběné textury funkcí *Stitching* s metodou *Grid*, kdy byla vyráběná textura rozdělena do polí, která se vzájemně nepřekrývají. Vlivem tzv. „tupého“ napojení jednotlivých textur prostřednictvím funkce *Stitching* byly tyto přechody zatíženy technologickým úkosem, jenž kopíruje vrstevnice. Tyto přechodové oblasti jsou ve formě výstupků, jejichž velikost (v ose Z) se liší pouze v závislosti na požadované hloubce. Lze jen těžko předpokládat, zda by ke stejnému efektu vzniku výstupků došlo i při použití metody *Object centering*, při které dochází k rozdělení textury na jednotlivé objekty, které se vyrábějí vždy se zaměřením na střed daného objektu. Bohužel k ověření této hypotézy by bylo nutné použít jiné laserové zařízení vybavené pohyblivou optickou osou Z, nebo použít stejné laserové zařízení, kterému by byla doplněna pohyblivá optická osa Z. Další možností, jak by bylo možné zabránit vzniku výstupků v textuře je použití jiného řídicího systému, který bude obsahovat vhodnější funkce pro mikroobrábění obecných ploch.

Další pozorovanou vadou, jež vznikla pouze u třetího testovacího dílce s texturou šestiúhelníků, který byl obráběn s progresivnějšími parametry, byl vytvořený pattern na dně textury viz Obr. 47.



Obr. 47 - Ukázka vytvořeného patternu na dně šestiúhelníkové textury

Při dalším zkoumání, bylo zjištěno, že za vznik patternu na dně textury je odpovědný typ formátu modelu testovacího dílce, který byl vložen do programu řídicího systému. Při znovuootevření modelu testovacího dílce v CAD softwaru a zobrazení modelu testovacího dílce jako drátového modelu byl vzor sítě drátového modelu totožný s patternem vytvořeným na testovacím dílci. Lze tedy konstatovat, že formát STEP použitý pro model testovacího dílce, který byl jedním z formátů doporučených výrobcem

řídícího systému DMC, není zcela vhodným formátem pro účely mikroobrábění textur. Na základě tohoto zjištění by bylo zajímavé provést další experimenty, které by měly za cíl zkoumat, jaký typ formátu modelu a případně i textury je z formátů doporučených výrobcem řídicího systému DMC nejvhodnější.

Zjištěné výsledky této diplomové práce poukazují na odchylky hloubek úběru materiálu při laserovém mikroobrábění ploch s proměnlivým sklonem, přičemž velikost těchto odchylek je ovlivněna použitým typem polarizace laserového paprsku. V případě σ -pol byla pozorovaná odchylka přibližně 10%, zatímco při použití p-pol byla odchylka nižší, pouze 5-7 %. Těchto hodnot odchylek v hloubce úběru materiálu bylo dosaženo při použití funkce *3D Projection*. Pokud by bylo požadavkem snížit jejich velikost, bylo by nutné pro účely mikroobrábění použít jinou funkci v daném řídicím systému, nebo využít řídicí systém, který by umožňoval pohyb ve více osách a šlo by s jeho pomocí provádět laserové mikroobrábění normálově k povrchu.

8. Závěr

Tato diplomová práce se věnuje tématu laserového mikroobrábění obecných ploch, její snahou bylo pokrýt již existující poznatky týkající se této problematiky a částečně je i rozšířit.

V rámci teoretické části se podařilo popsat základní princip, fungování a vlastnosti laseru. Následně byl vysvětlen princip interakce laserového paprsku s obráběným materiálem. Stěžejním bodem této části byla kapitola věnující se dopadu polarizace na složku reflektivity, která měla za cíl popsat rozdíly v interakcích laserového paprsku s odlišným typem polarizace v závislosti na úhlu dopadu laserového paprsku. V závěru teoretické části byly popsány význam a aplikace laserového mikroobrábění v průmyslové praxi.

V rámci experimentální části byly použity nabyté teoretické poznatky, na jejichž základě byl následně proveden experiment. Vlastnímu experimentu předcházelo experimentální ověření správného nastavení použitého laserového zařízení. Především se jednalo o správné nastavení požadovaných typů polarizací (pomocí vlnových retardačních destiček), u nichž byl následně zkoumán jejich vliv na průběh a výsledek mikroobrábění obecných ploch. Samotný experiment, jenž byl ústředním bodem praktické části, měl za cíl vytvoření totožné textury na navržených testovacích dílcích při použití různých typů polarizace a jejich následné porovnání z hlediska efektivity úběru materiálu, která byla hodnocena pomocí kritéria hloubky úběru materiálu. Pro tuto část experimentu byly vybrány jako nejvíce vyhovující typy polarizace s označením p-pol (horizontálně lineární polarizace) a σ -pol (kruhová polarizace).

Ze závěrečných výsledků vyplívá, že z hlediska hloubky úběru materiálu je pro účely mikroobrábění nejvhodnějším typem polarizace právě p-pol. Mikroobrábění s p-pol má však značná omezení, a to především z hlediska náročné přípravy dat a programu pro řídicí systém. Náročnost přípravy vstupních dat pak limituje použití p-pol (na rozdíl od σ -pol, u níž se s limitací použití kvůli složitosti přípravy dat nepotýkáme) u složitějších typu struktur.

Tato práce přinesla nové informace, které vedou k rozvoji poznatků týkajících se laserového mikroobrábění. Tyto nové poznatky mohou pomoci v dalším studiu této problematiky, jelikož technologie laserového mikroobrábění, společně s možností tvorby funkčních povrchů a dalšími aplikacemi, které tato technologie nabízí, je stále považována za relativně novou technologii, která ještě není zcela probádaná a zatím není odhalen celý její potenciál, který by bylo možné následně aplikovat do průmyslové praxe.

9. Zdroje

- [1] BUCHFINK, Gabriela. The laser as a tool: a light beam conquers industrial production. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2007. ISBN 978-3-8343-3072-7.
- [2] Laserové mikroobrábění pikosekundovými pulzy. MM Průmyslové spektrum. [online] 9.3.2022 [cit.2023-10-23] Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-mikroobrabeni-pikosekundovymi-pulzy>
- [3] SOVEJA, Adriana et al. Optimisation of TA6V alloy surface laser texturing using an experimental design approach. *Optics and Lasers in Engineering*. [online] 2008, vol. 46, no. 9. s. 671-678. ISSN 0143-8166 . DOI: 10.1016/j.optlaseng.2008.04.009
- [4] ORAZI, Leonardo et al. Ultrafast laser manufacturing: from physics to industrial applications. *CIRP Annals*. [online] 2021, vol. 70, no. 2, s543-566. ISSN 0007-8506. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.05.007
- [5] BRENNER, Andreas et al. Efficient production of design textures on large-format 3D mold tools. *Journal of Laser Applications*. [online] 2020, vol. 32, no. 1. DOI: 10.2351/1.5132401
- [6] KARKANTONIS, Themistoklis et al. Laser micro-machining of freeform surfaces: Accuracy, repeatability and reproducibility achievable with multi-axis processing strategies. *Precision Engineering*. [online] 2022, vol. 78, s.233-247. ISSN 0141-6359. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2022.08.009
- [7] HAASLER, Dennis. *Tiefbohren in Metallen mittels ultrakurzen Laserpulsen*. 2022.
- [8] OVERMEYER, Ludger et al. Laser patterning of thin film sensors on 3-D surfaces. *CIRP Annals*. [online] 2012, vol. 61, no. 1, s.215-218. ISSN 0007-8506. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.087
- [9] SCHAEFFER, Ronald. *Fundamentals of laser micromachining*. CRC press, 2012. ISBN 978-1439860557
- [10] Průmyslové lasery (1) – princip laseru. MM Průmyslové spektrum [online]. 13. 3. 2012. [cit. 2023-10-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru>
- [11] PASCHOTTA, Rüdiger. Modes. In: *2023 RP Photonics AG* [online]. 28. 11. 2023. [cit. 2023-10-29] Dostupné z: <https://www.rp-photonics.com/modes.html>
- [12] EDMUND OPTICS. Why use a flat top laser beam? *Edmund Optics* [online]. [cit. 2023-11-10] Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/why-use-a-flat-top-laser-beam/>
- [13] Laser beam spot size calculator. In: *Lasercalculator* [online]. [cit. 2023-11-06] Dostupné z: <https://www.lasercalculator.com/laser-spot-size-calculator/>

- [14] MARTÍNEZ-CONDE, Alejandro et al. Review: Comparative analysis of CO2 laser and conventional sawing for cutting of lumber and wood-based materials. *Wood Science and Technology*. [online] 2017, vol. 51, no. 4. DOI: 10.1007/s00226-017-0914-9
- [15] LEDNEV, V. Laser beam profile influence on LIBS analytical capabilities: single vs. multimode beam. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. [online] 2010. [cit. 2023-10-29] Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Laser-beam-profile-influence-on-LIBS-analytical-vs.-Lednev-Pershin/7f8e0710dc1706cab4b5be413609b8a19c3f18ef>
- [16] Beam quality and strehl ratio. *Edmund Optics* [online]. [cit. 2023-11-06] Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/beam-quality-and-strehl-ratio/>
- [17] Understanding laser beam parameters leads to better systém performance and can save money. *Coherent* [online] 2012 [cit. 2023-11-06] Dostupné z: https://content.coherent.com/legacy-assets/pdf/Understanding-Beam-Parameters_FORMFIRST.pdf
- [18] An introduction to polarization. *Laser Focus World* [online]. 31.5.2016. [cit. 2023-10-15] Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/sponsored/edmund-optics/article/16571944/an-introduction-to-polarization>
- [19] Laser polarization: The importance of polarization in laser applications. *Edmund Optics* [online]. [cit. 2023-10-15] Dostupné z: <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/lasers/the-importance-of-polarization-in-laser-applications/>
- [20] SAITO, Yuika et al. z-Polarization sensitive detection in micro-Raman spectroscopy by radially polarized incident light. *Journal of Raman Spectroscopy* [online]. 2008, vol. 39, no. 11. DOI: 10.1002/jrs.1953
- [21] Understanding waveplates and retarders. *Edmund Optics* [online]. [cit. 2023-10-21] Dostupné z: <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/optics/understanding-waveplates/>
- [22] HIROHITO NISHI*, Hiromi IWAMOTO, Naoyuki UJIIE and Kunimitsu YAJIMA. Transparent Waveplate (Retarder) of ZnSe for High Power CO2 Lasers. *Set technical review* [online] 2015. [cit. 2023-11-06] Dostupné z: https://sumitomoelectric.com/sites/default/files/2020-12/download_documents/81-14.pdf
- [23] ORISHICH, A., Golyshev, A., Shulyatyev, V., Galev, R., Kudryavtsev, A.. Beam polarization effect on the surface quality during steel cutting by a CO2 laser. *Journal of Laser Applications*. [online] 2018, vol. 30, no. 1. DOI: 10.2351/1.5020365
- [24] GOLYSHEV, Alexander A., Orishich A.M., Shulyatyev, V.. Effect of the laser beam polarization state on the laser cut surface quality. *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS* [online] 2015, [cit. 2023-12-05] Dostupné

z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Lasers-in-Manufacturing-Conference-2015-Effect-of-Golyshev-Orishich/aea73d424014af7f91e2a8d87c58fa3c30742226>

[25] GRUNER, Andreas, Joerg SCHILLE and Udo LOESCHNER. Experimental study on micro hole drilling using ultrashort pulse laser radiation. *Physics Procedia*. [online] 2016, vol. 83, s. 157-166. ISSN 1875-3892. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.030

[26] NAEEM, Mohammed. Laser processing of reflective materials. *Laser Technik Journal*. [online] 2013, vol. 10, no. 1. DOI: 10.1002/latj.201390001

[27] Indhu, R., Vivek, V., Sarathkumar, L. et al.. Overview of Laser absorptivity measurement techniques for material processing. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* [online]. 2018, vol. 5, no. 4. DOI: 10.1007/s40516-018-0075-1

[28] LEITZ, Karl-Heinz et al. Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses. *Physics Procedia*. [online] 2011, vol. 12. s 230-238. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.128

[29] X. Liu, D. Du and G. Mourou, Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, [online]. 10.1997. vol. 33, no. 10, s. 1706-1716, DOI: 10.1109/3.631270.

[30] CERAMI, Loren R. et al. Femtosecond Laser Micromachining. In: *Springer eBooks*. [online] 2013. DOI: 10.1007/978-3-319-00017-6_12

[31] CHENG, Jian et al. A review of ultrafast laser materials micromachining. *Optics and Laser Technology*. [online] 2013, vol. 46 s. 88-102. ISSN 0030-3992. DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.06.037

[32] PASCHOTTA, Rüdiger. Pulse energy. *RP Photonics AG* [online]. 28. 11. 2023. [cit. 2023-11-10] Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/pulse_energy.html

[33] PASCHOTTA, Rüdiger. Optical intensity. *RP Photonics AG* [online]. 28. 11. 2023. [cit. 2023-11-10] Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/optical_intensity.html

[34] PASCHOTTA, Rüdiger. Peak power. *RP Photonics AG* [online]. 28. 11. 2023. [cit. 2023-11-11] Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/peak_power.html

[35] AHMMED, K. M. Tanvir, Colin A. GRAMBOW and Anne-Marie KIETZIG. Fabrication of Micro/Nano structures on metals by femtosecond laser micromachining. *Micromachines*. [online] 2014, vol. 5, no. 4. DOI: 10.3390/mi5041219

[36] MISHRA, Sanjay and Vinod YADAVA. Laser Beam MicroMachining (LBMM) – A review. *Optics and Lasers in Engineering*. [online] 2015, vol. 73. s.89-122. ISSN 0143-8166 DOI: 10.1016/j.optlaseng.2015.03.017

[37] RAČIUKAITIS, Gediminas et al. Accumulation effects in laser ablation of metals with high-repetition-rate lasers. *Proceedings of SPIE*. [online] 2008. DOI: 10.1117/12.782937

[38] ORAZI, Leonardo et al. Ultrafast laser manufacturing: from physics to industrial applications. *CIRP Annals*. [online] 2021, vol. 70, s.543-566 no. 2. ISSN 0007-8506. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.05.007

- [39] GREGORČIČ, Peter et al. Formation of laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on tool steel by multiple picosecond laser pulses of different polarizations. *Applied Surface Science*. [online] 2016, vol. 387, s.698-706, ISSN 0169-4332 . DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.06.174
- [40] REBOLLAR, Esther, Marta CASTILLEJO and Tiberio A. EZQUERRA. Laser induced periodic surface structures on polymer films: From fundamentals to applications. *European Polymer Journal*. [online] 2015, vol. 73, s. 162-174, ISSN 0014-3057. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2015.10.012
- [41] XU, Jing et al. Femtosecond laser-induced cross-periodic structures on a crystalline silicon surface under low pulse number irradiation. *Applied Surface Science*. [online] 2015, vol. 326, s.216-221. ISSN 0169-4332. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.11.124
- [42] A. San-Blas, N. Casquero, N. Pérez, M. Martínez-Calderon, L. Sanchez-Brea, J. Buencuerpo, S. M. Olaizola, A. Rodríguez. Polarization conversion on nanostructured metallic surfaces fabricated by LIPSS. *SPIE 10906*. [online] 2019, Laser-based Micro- and Nanoprocessing XIII, 109061H. DOI: doi.org/10.1117/12.2506982
- [43] ORAZI, Leonardo et al. Ultrafast laser manufacturing: from physics to industrial applications. *CIRP Annals*. [online] 2021, vol. 70, no. 2. ISSN 0007-8506. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.05.007
- [44] WU, Yan et al. Kinematic analysis and simulation of MID laser direct structuring equipment. *Advanced Materials Research*. [online] 2012, vol. 590. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.590.236
- [45] ORAZI, Leonardo et al. CNC paths optimization in laser texturing of free form surfaces. *Procedia CIRP*. [online] 2015, vol. 33, s. 440-445. ISSN 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2015.06.100
- [46] MAO, Bo et al. Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. [online] 2020, vol. 53. ISSN 1526-6125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.02.009
- [47] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha, Vydavatelství: MM publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2
- [48] MILLER, Philip R., Aggarwal, R., Doraiswamy, A et al. Laser micromachining for biomedical applications. *JOM*. [online] 2009, vol. 61, no. 9. DOI: 10.1007/s11837-009-0130-7
- [49] DUSSER B., SAGAN Z., Soder H., FAURE N. et al. Controlled nanostructures formation by ultra fast laser pulses for color marking. *Optics Express*. [online] 2010, vol. 18, s. 2913-2924. DOI: doi.org/10.1364/OE.18.002913
- [50] LU, Ping and R.J.K. WOOD. Tribological performance of surface texturing in mechanical applications—a review. *Surface Topography*. [online] 2020, vol. 8, no. 4. DOI: 10.1088/2051-672x/abb6d0

- [51] MISHRA, Sanjay and Vinod YADAVA. Laser Beam MicroMachining (LBMM) – A review. *Optics and Lasers in Engineering*. [online] 2015, vol. 73, s.89-122. ISSN 0143-8166. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2015.03.017
- [52] YANG, Jianjun et al. Femtosecond laser-induced surface structures to significantly improve the thermal emission of light from metals. *Applied Physics B*. [online] 2011, vol. 106, no. 2. DOI: 10.1007/s00340-011-4834-3
- [53] Microelectronics. *Assemcorp*. [online] 16. 1. 2023. [cit. 2023-11-16] Dostupné z: <https://www.assemcorp.com/en/products/microelectronics.html>
- [54] HOWELL-SMITH, S, Rahnejat, H, King, PD et al. Reducing in-cylinder parasitic losses through surface modification and coating. *Journal of Automobile Engineering*, [online] 2014, vol. 228. s. 391-402. ISSN 0954-4070. DOI: doi.org/10.1177/0954407013512626
- [55] MORADI, Sona et al. Femtosecond laser irradiation of metallic surfaces: effects of laser parameters on superhydrophobicity. *Nanotechnology*. [online] 2013, vol. 24, no. 41. DOI: 10.1088/0957-4484/24/41/415302
- [56] WANG, Yonghua et al. One-step method using laser for large-scale preparation of bionic superhydrophobic & drag-reducing fish-scale surface. *Surface & Coatings Technology*. [online] 2021, vol. 409. ISSN 0257-8972. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126801
- [57] JIANG, Ming et al. Large scale layering laser surface texturing system based on high speed optical scanners and gantry machine tool. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. [online] 2017, vol. 48, s. 113-120. ISSN 0736-5845. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.03.005
- [58] CAD/CAM software framework design for the laser micromachining device driven by two stages. *IEEE Conference Publication* [online]. 1. 8. 2010. DOI: 10.1109/ICEPT.2010.5582662.
- [59] ZHOU, Yongquan et al. Advances in 5-axis CNC laser machining system. *Atlantis Press*. [online] 2017. DOI: 10.2991/icmmcce-17.2017.253
- [60] Laserové texturování - Řada AgieCharmilles LASER P. *GF Machining Solutions*. [online]. [cit. 2023-11-15] Dostupné z: <https://www.gfms.com/cs-cz/machines/laser/laser-texturing/laser-p-series.html>
- [61] 5 axis processing. *Direct machining control*. [online]. [cit. 2023-11-16] Dostupné z: <https://directmachining.com/applications/5-axis-processing>
- [62] FLEMMER, J., Willenborg, E.. 8-axes simultaneous processing with 5 mechanical and 3 optical axes. *Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT*. 6.2011
- [63] Laser – MACHINING AND SURFACE TREATMENT BY LASER FEMTOSECOND. *FEMTO Engineering*. [online]. [cit. 2023-11-15] Dostupné z: <https://www.femto-engineering.fr/en/lazer/>
- [64] Engraving and 3D processing. *Direct machining control*. [online]. [cit. 2023-11-16] Dostupné z: <https://directmachining.com/applications/laser-engraving>

- [65] WANG, Cheng and Xiaoyan ZENG. Study of laser carving three-dimensional structures on ceramics: Quality controlling and mechanisms. *Optics and Laser Technology*. [online] 2007, vol. 39, no. 7, s.1400-1405. ISSN 0030-3992. DOI: 10.1016/j.optlastec.2006.10.010
- [66] DIACI, Janez et al. Rapid and flexible laser marking and engraving of tilted and curved surfaces. *Optics and Lasers in Engineering*. [online] 2011, vol. 49, no. 2, s.195-199. ISSN 0143-8166. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2010.09.003
- [67] ZHOU, Yongquan et al. Computer texture mapping for laser texturing of injection mold. *Advances in Mechanical Engineering*. [online] 2014, vol. 6. DOI: 10.1155/2014/681563
- [68] JAGDHEESH, R., A. VALARMATHI and Sivakumar MANICKAM. Influence of laser beam polarization on micromachining of crystalline silicon using ultrafast laser pulses. *ResearchGate* [online]. [cit. 2023-12-23] 2015. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/281630854_Influence_of_Laser_Beam_Polarization_on_Micromachining_of_Crystalline_Silicon_Using_Ultrafast_Laser_Pulses
- [69] LIU, Yuhan et al. Polarization Effects on Laser-Inscribed Angled Micro-Structures. *Applied Surface Science*. [online] 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4597095
- [70] MASTER1 PSGFRT Femtosecond Laser micromachining system for precise manufacturing: Návod k použití. Vilnius, Litva, 2020
- [71] 3D Laser Scanning Microscope VK-X3000 Series User's Manual. *KEYENCE International Belgium*. [online] [cit. 2023-12-05] Dostupné z: https://www.keyence.eu/products/microscope/laser-microscope/vk-x3000/index_pr.jsp
- [72] InfiniteFocus G5plu. *Technical Documentation Brochure*. [online]. [cit. 2023-12-10] Dostupné z: <https://pdf.directindustry.com/pdf/bruker-alicon/infinitefocus/20759-756212.html>
- [73] SHIN, Shigemitsu et al. Polarization effects on ablation efficiency and microstructure symmetry in femtosecond laser processing of materials—developing a pattern generation model for laser scanning. *Optics Express*. 2022, vol. 30, no. 11. DOI: 10.1364/oe.459377

10. Přílohy

Příloha 1 – Výkres testovacího dílece

