

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ovlivnění smáčivosti povrchu laserovými technologiemi

Autor: **Šimon Syrovátka**

Vedoucí práce: **Ing. Pavel Kožmín, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

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

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

Jméno a příjmení: **Šimon SYROVÁTKA**
Osobní číslo: **S15B0345P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Název tématu: **Ovlivnění smáčivosti povrchu laserovými technologiemi**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

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

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Postup řešení
4. Realizace a vyhodnocení
5. Závěr

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

Seznam odborné literatury:

- **RASHID A. GANEEV. Laser - Surface Interactions. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. ISBN 9789400773417.**
- **DAHOTRE, Narendra B. a Sandip P. HARIMKAR. Laser fabrication and machining of materials. New York, N.Y.: Springer, c2008. ISBN 978-0-387-72344-0.**
- **JYOTSNA DUTTA MAJUMDAR, Indranil MANNA a EDITORS. Laser-assisted fabrication of materials. Berlin: Springer, 2013. ISBN 9783642283598.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Kožmín, Ph.D.**
HOFMEISTER s.r.o.

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

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2018**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 18. října 2017

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne

.....

podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora, firmy HOFMEISTER s.r.o. a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Pavlu Kožmínovi, Ph.D. a panu doc. Ing. Miroslavu Zetkovi Ph.D. za jejich pomoc a cenné rady při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Adamu Čermákovi, Ph.D. a panu Miloslavu Kubátovi z firmy HOFMEISTER, s.r.o. za umožnění výroby a testování navržených povrchových struktur a také za jejich nesmírnou ochotu při konzultacích týkajících se mé práce. Také bych chtěl poděkovat panu doc. Mgr. Šimonu Kosovi, Ph.D. a panu Ing. Martinu Jarošovi z Katedry fyziky Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni za jejich pomoc při testování vlastností povrchů vyrobených vzorků.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Srovátka	Jméno Šimon	
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie – technologie obrábění		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kožmín, Ph.D.	Jméno Pavel	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU – FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Ovlivnění smáčivosti povrchu laserovými technologiemi		

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	50	TEXTOVÁ ČÁST	40	GRAFICKÁ ČÁST	10
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato bakalářská práce se zabývá uplatněním laseru v oboru povrchového inženýrství. Jejím hlavním cílem je vyrobení povrchových struktur, které by ovlivnily vlastnosti původního materiálu. Jedná se především o smáčivost povrchu, konkrétněji o zvýšení hydrofobních vlastností. Výroba těchto typů povrchových struktur byla realizována pomocí laserového mikroobráběcího stroje, jež disponuje ultrakrátkou délkou pulzu s velmi přesným rozmitáním laserového paprsku. V závěru této práce jsou vyhodnoceny vyrobené povrchové struktury a stanoveny parametry, které ovlivňují vznik i účelovost těchto povrchových struktur.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">smáčivost, laser, laserové technologie, povrchové struktury, kontaktní úhel, hydrofobní povrch</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Srovátka	Name Šimon		
FIELD OF STUDY	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kožmín, Ph.D.	Name Pavel		
INSTITUTION	ZČU – FST – KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	The influence of the laser technologies on the surface wettability			

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

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	50	TEXT PART	40	GRAPHICAL PART	10
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This bachelor thesis deals with the use of laser in the field of surface engineering. Its main objective is to produce surface structures that would affect the properties of the original material. It is mainly the wettability of the surface, more particularly the increase in hydrophobic properties. The production of these types of surface structures was realized by using laser machine with ultrashort pulses. At the end of this work, the surface structures are evaluated and the parameters influencing the origin and purpose of these surface structures are set.</p>
KEY WORDS	wettability, laser, laser technology, surface structure, contact angle, hydrophobic structure

OBSAH

Seznam tabulek	2
Seznam obrázků	3
Seznam zkratk	5
1 Úvod	6
1.1 Cíl práce	6
1.2 Představení firmy	6
2 Analýza současného stavu	8
2.1 Povrch a povrchové struktury	8
2.2 Přehled vlastností povrchů ovlivnitelných laserem.....	9
2.3 Charakteristika laseru	12
2.3.1 Volba laseru pro tvorbu superhydrofobních povrchů	13
2.3.2 Laserové technologie pro povrchové strukturování	13
2.4 Současný přístup v oblasti navrhování povrchových struktur pro změnu smáčivosti povrchu	15
2.4.1 Technologie LIPSS – výroba nanostruktur	16
2.4.2 Modifikované povrchy s mikrostrukturami a nanostrukturami	19
3 Praktická část	21
3.1 Charakterizace vzorků	21
3.2 Návrh velikostí a tvaru struktur	22
3.3 Stanovení parametrů laserového strukturování	25
3.4 Výroba navržených povrchových struktur	28
3.4.1 Povrchové struktury – díry	28
3.4.2 Povrchové struktury – kvádry	30
3.4.3 Shrnutí vyrobených povrchových struktur	33
3.5 Vyhodnocení smáčivosti povrchu	34
3.5.1 Laserem neupravený, pouze broušený povrch – etalon	34
3.5.2 Povrchové struktury – díry	34
3.5.3 Povrchové struktury – kvádry	35
3.5.4 Shrnutí měření smáčivosti povrchových struktur	37
4 Závěr	38
5 Seznam použité literatury a další zdroje	39
Seznam příloh	41

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Chemické složení vzorkového materiálu [%] [21]

Tabulka 2: Rozměry kvádrů

Tabulka 3: Rozměry děr

Tabulka 4: Rozměry vln

Tabulka 6: Parametry laseru

Tabulka 7: Velikosti průměrů spotů

Tabulka 8: Úhly smáčivosti u povrchových struktur – díry

Tabulka 9: Úhly smáčivosti u povrchových struktur – kvádry

Tabulka 10: Úhly smáčivosti vytvořených povrchových struktur v porovnání s etalonem (zvýrazněné hodnoty značí povrchy, u kterých se zvýšila hydrofobicita v porovnání s etanolem)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Vliv struktury povrchu pevné látky na smáčivost povrchu [1]

Obrázek 2: Velikost mikrostruktur [5]

Obrázek 3: Velikost nanostruktur [5]

Obrázek 4: Povrchová struktura vytvořena pomocí laseru, která snižuje tření povrchu s mazivem [8]

Obrázek 5: Příklad povrchové struktury, která snižuje velikost odrazu světla [10]

Obrázek 6: Rozdělení povrchů podle úhlu smáčivosti [1]

Obrázek 7: Příklad struktury povrchu s hydrofobními vlastnostmi [12]

Obrázek 8: Fotografie z měření smáčivosti povrchu Al₂O₃ (horní řada fotografií – kapka vody dopadající na čistý povrch Al₂O₃, spodní řada fotografií – kapka vody dopadající na plochu ošetřenou laserem) [11]

Obrázek 9: Typy struktur vytvořené pomocí FSS technologie, 1. řada (centrálně spojené), 2. řada (smyčkové tvary), 3. řada (plné tvary), 4. řada (jejich kombinace) [17]

Obrázek 10: Systémy fungující na principu DLA technologie. Použití fokální čočky s posuvným vzorkem (a). Použití galvoskenery (b) [17]

Obrázek 11: Povrch listu lotosu [18]

Obrázek 12: Model drážek (vlevo) a mřížky (vpravo) [19]

Obrázek 13: Modely se strukturami LIPSS [19]

Obrázek 14: Graf závislosti úhlu smáčivosti na velikosti drážky (trojúhelníková značka – vzorek s drážkami, čtvercová značka – vzorek s drážkami se strukturami LIPSS, šedá kruhová značka – vzorek s mřížkami, černá kruhová značka – vzorek s mřížkami se strukturami LIPSS) [18]

Obrázek 15: Kapka vody na modelu drážek se strukturami LIPSS, kde byl naměřen úhel smáčivosti $\Omega = 153^\circ$ (vlevo) a kapka vody na modelu mřížek se strukturami LIPSS, kde byl naměřen úhel smáčivosti $\Omega = 158^\circ$ (vpravo) [18]

Obrázek 16: Srovnání mezi kapkami na neopracovaném povrchu (uprostřed) a dvou laserově opracovaných površích s drážkami a mřížkami [19]

Obrázek 17: Povrchová mikrostrukutra vyrobená pikosekundovým laserem [20]

Obrázek 18: Výkres pro výrobu vzorků

Obrázek 19: Model struktury kvádrů vytvořené v programu CATIA

Obrázek 20: Model struktury děr vytvořené v programu CATIA

Obrázek 21: Model struktury kvádrů s LIPSSy vytvořené v programu CATIA

Obrázek 22: Model struktury vln vytvořené v programu CATIA

Obrázek 23: Fotografie vyrobených povrchových struktur

Obrázek 24: Vytvořené laserové spoty v obráběném materiálu nasnímané pomocí přístroje Alicona InfiniteFocus

Obrázek 25: Graf pro určení ablačního prahu

Obrázek 26: Povrchová struktura – díra var. 1 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus

Obrázek 27: Povrchová struktura – díra var. 2 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus

Obrázek 28: Povrchová struktura – díra var.3 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus

Obrázek 29: Povrchová struktura – díra var. 4 nasnímaná pomocí přístroje Alicona InfiniteFocus

Obrázek 30: Povrchová struktura – díra var. 5 nasnímaná pomocí přístroje Alicona InfiniteFocus

Obrázek 31: Povrchová struktura – kvádr var. 1 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus

Obrázek 32: Povrchová struktura – kvádr var. 2 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus

Obrázek 33: Povrchová struktura – kvádr var. 3 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus

Obrázek 34: Povrchová struktura – kvádr var. 4 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus

Obrázek 35: Povrchová struktura– kvádr var. 5 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus

Obrázek 36: Fotografie vyrobených povrchových struktur

Obrázek 37: Úhel smáčivosti referenčního vzorku 10 sekund po dopadu kapky na povrch (vlevo) a těsně po dopadu kapky na povrch (vpravo)

Obrázek 38: Úhel smáčivosti vzorku se strukturami – díry (var. 5) 10 sekund po dopadu kapky na povrch (vlevo) a těsně po dopadu kapky na povrch (vpravo)

Obrázek 39: Úhel smáčivosti vzorku povrchových struktur – kvádry (var. 2) 10 sekund po dopadu kapky na povrch (vlevo) a těsně po dopadu kapky na povrch (vpravo)

SEZNAM ZKRATEK

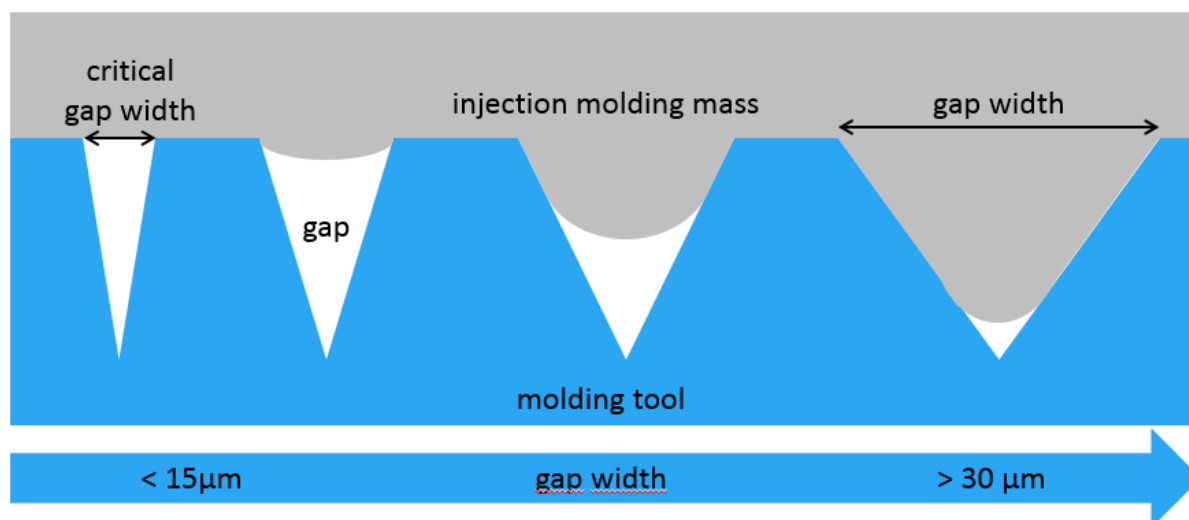
NÁZEV VELIČINY	ZNAČKA VELIČINY	JEDNOTKY VEIČINY
střední aritmetická úchylka povrchu	R_a	μm
délka pulzu	τ_p	s
vlnová délka	λ	m
opakovací frekvence	f_p	Hz
velikost spotu laserového paprsku	d	m
poloměr laserového paprsku	r_o	m
energie v pulsu	E_p	J
velikost ablačního prahu	E_{th}	J
hustota energie v pulsu	F_{th}	J/m^2
skenovací rychlost laseru	v_f	mm/s
překrytí pulzů ve směru posuvu laserového paprsku	S_p	%
překrytí pulzů ve směru přísuvu laserového paprsku	H	%
úhel smáčivosti	Ω	°
průměrný výkon laserového zdroje	P_{av}	W

1 ÚVOD

Při obrábění povrchu materiálů se v dnešní době využívají vyspělé technologie, např. s využitím laseru, které jsou velmi investičně a provozně nákladné, avšak perspektivní se širokými možnostmi využití. V průmyslu je laserová technologie často používána k řezání, svařování, vrtání, značení různých materiálů či k dekorativním účelům, ale jejich kvalit může být využito právě i při mikroobrábění, jako např. při výrobě funkčních struktur na površích strojních komponentů.

Obrábění struktury laserem může mít za výsledek významnou změnu vlastností povrchu. Tímto způsobem lze mimo jiné například ovlivnit smáčivost povrchu, drsnost povrchu nebo změnit reflektivní vlastnosti povrchu.

Smáčivost je schopnost kapaliny přilnout k povrchu pevných látek. Tato schopnost závisí na struktuře povrchu pevné látky, která má vliv na velikost kontaktního úhlu mezi kapalinou a povrchem pevné látky – vliv struktury povrchu je ilustrován na obrázku 1. Povrchy se z hlediska smáčivosti dělí na hydrofilní, hydrofobní, a superhydrofobní, a to na základě velikosti kontaktního úhlu, který lze měřit pomocí několika metod (např. metoda staticky přichycené kapky).



Obrázek 1: Vliv struktury povrchu pevné látky na smáčivost povrchu [1]

1.1 Cíl práce

Cílem této práce je navrhnout takovou povrchovou strukturu na vzorku z korozi-vzdorné oceli, kterou by bylo možné vyrobit pomocí laseru a která by změnila výše zmíněnou smáčivost výchozího povrchu ve prospěch hydrofobních až superhydrofobních vlastností.

1.2 Představení firmy

Většina experimentální části byla realizována ve spolupráci s firmou HOFMEISTER, s. r. o., proto je vhodné se o této firmě krátce zmínit.

Firma HOFMEISTER, s. r. o. je česká rodinná firma se sídlem v Plzni. Oficiální podnikání v rámci firmy bylo zahájeno v roce 1990, ačkoliv je možné tvrdit, že vznik této firmy může být datován již do roku 1928. Jedná se o strojírenskou firmu, která se specializuje na výrobu

a prodej nástrojů, nářadí, měřidel, forem, přípravků apod. Dále se firma zabývá CNC obráběním, certifikovanou kontrolou a laserovým popisem. V roce 2007 bylo ve firmě vytvořeno specializované centrum, které se zaměřuje na vývoj hybridních řezných nástrojů z uhlíkových kompozitů, speciálních řezných nástrojů pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů (Ti, Ni slitiny, kompozitní a sendvičové materiály), funkčních povrchů na obrobených plochách aj. Firma je držitelem certifikátů ISO 9001:2008, ISO/TS 16964 a ČSN EN ISO 140001 [2, 3].

2 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

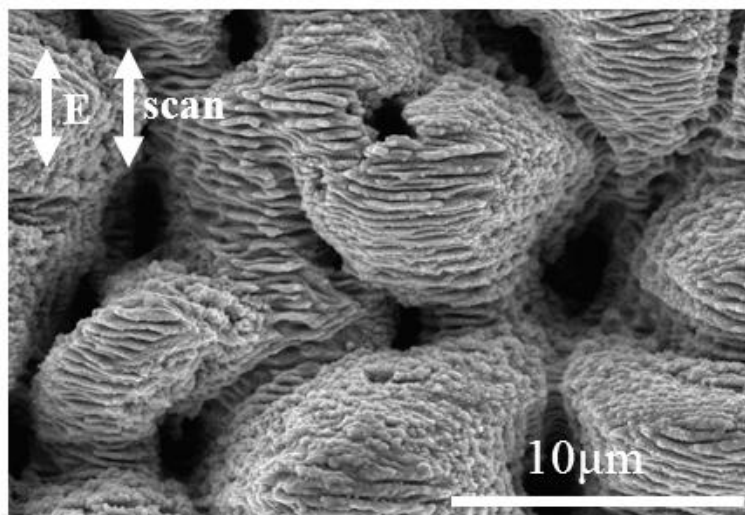
Ke splnění vytyčeného cíle bylo nejprve nutné zpracovat rozbor současného stavu z pohledu vyskytujících se povrchových struktur, laserových technologií, charakteristiky povrchů a jejich hodnocení.

2.1 Povrch a povrchové struktury

Na povrchu materiálu lze pomocí laseru vytvářet mnoho druhů struktur lišících se tvarem. Nejzákladnější dělení těchto struktur je pomocí jejich velikosti. Pro ovlivnění vlastností povrchu daného obráběného materiálu se využívá především vytvoření povrchových mikrostruktur a nanostruktur.

Mikrostruktury

Mikrostruktura povrchů je charakterizována rastrovým opakováním strukturních tvarových jednotek v řádech mikrometrů, přičemž nemusí být vždy tvořena pouze kompaktní pevnou fází, může obsahovat i póry různých velikostí (viz obrázek 2). Mikrostruktura povrchu materiálu může výrazně ovlivnit jeho fyzikální i chemické vlastnosti [4].

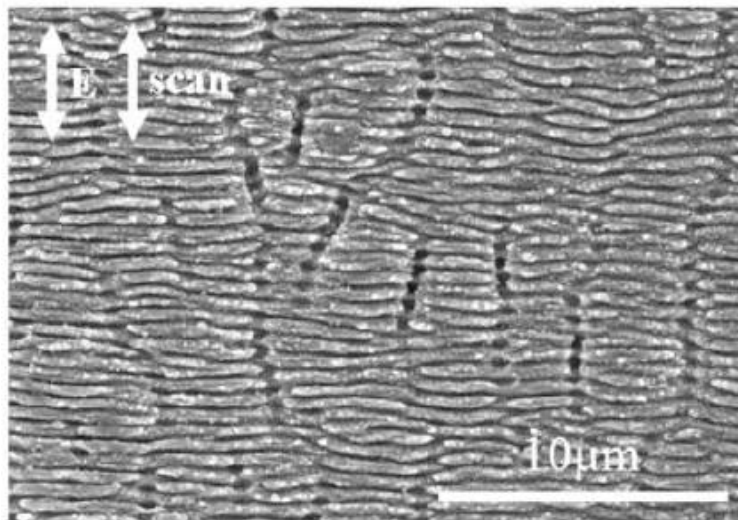


Obrázek 2: Velikost mikrostruktur [5]

Nanostruktury

Jako nanostruktury lze označit tvarové oblasti částic a struktur, které se rozměrově pohybují v intervalu mezi 1 nm až 100 nm [6] (viz obrázek 3). Přestože rozměry tvarů nanostruktur nabývají nepatrných hodnot, mohou významně ovlivňovat vlastnosti povrchu. Tento významný vliv se projevuje například u smáčivosti povrchu. Vytvořením nanostruktur se speciálními

velikostmi a jejich orientací lze dosáhnout z původně hydrofilního povrchu až superhydrofobní (viz podkapitola technologie LIPSS).



Obrázek 3: Velikost nanostruktur [5]

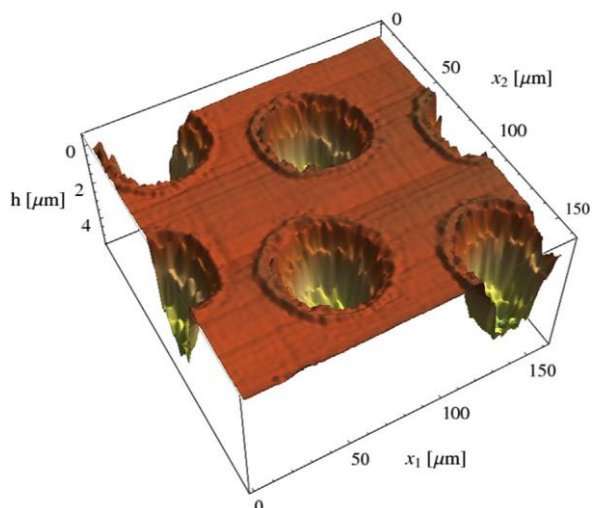
2.2 Přehled vlastností povrchů ovlivnitelných laserem

Pro strojírenskou produkci je důležité, aby výsledné výrobky disponovaly požadovanou kvalitou a vlastnostmi povrchu. Těchto kvalitativních požadavků lze dosáhnout různými způsoby obrábění materiálu. Využitím laseru lze ovlivnit zejména odolnost proti opotřebení, optické vlastnosti a smáčivost.

Odolnost proti opotřebení

Odolnost proti opotřebení je žádaná vlastnost u všech mechanicky namáhaných průmyslových výrobků. Zvýšením odolnosti proti opotřebení je prodloužena životnost samotného výrobku, což lze považovat za významný ekonomický přínos.

Hlavní obor, který se zabývá mechanickým opotřebením v souvislosti se třením, se nazývá tribologie. Jedná se o vědní obor, který se zabývá chováním dotýkajících se povrchů ve vzájemném pohybu nebo při pokusu o vzájemný pohyb. Tento pohyb může být obecně kluzný, valivý, nárazový nebo kmitavý. Ve skutečnosti se často uplatňují dva i více druhů pohybu současně. Mezi tribologické procesy patří: kontaktní procesy, procesy tření, procesy opotřebení a procesy mazání [7]. Příklad povrchové struktury snižující tření povrchu s mazivem je uveden na obrázku 4.

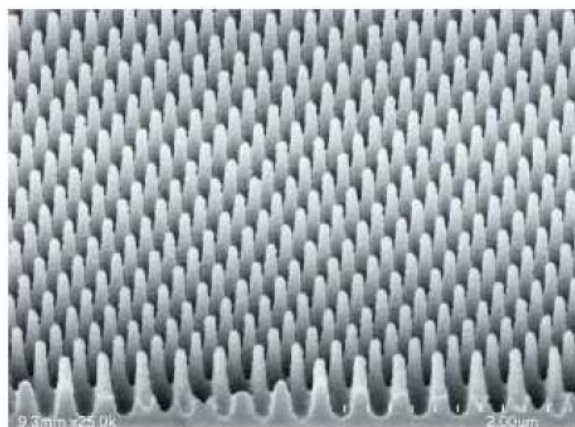


Obrázek 4: Povrchová struktura vytvořena pomocí laseru, která snižuje tření povrchu s mazivem [8]

Optické vlastnosti

Optické vlastnosti lze zařadit mezi významné vlastnosti povrchů uplatňující se ve strojírenském průmyslu, které lze modifikovat využitím laserové technologie. Obecně lze říci, že optické vlastnosti charakterizují odezvu materiálů na dopadající elektromagnetické záření. Dopadající záření je každým materiálem částečně odraženo, částečně propuštěno a částečně pohlceno. Optické vlastnosti definující odezvu materiálu na dopadající záření jsou pak označovány jako propustnost, odrazivost a pohltivost. Příklad struktury, která byla vytvořena za účelem zvýšení odrazivosti je, pro ilustraci, uvedena na obrázku 5. Kvůli zachování termodynamické rovnováhy může být pohlcené záření materiálem emitováno. Relativní schopnost materiálu vyzařovat záření materiálu je označována jako emitance [9].

Optické vlastnosti povrchů se mohou využívat například ve vojenském průmyslu, kde za využití materiálů s upravenými vlastnostmi povrchu laserem lze docílit toho, že objekt s tímto povrchem je těžko zaznamenaný jak radary, tak i pouhým okem.



Obrázek 5: Příklad povrchové struktury, která snižuje velikost odrazu světla [10]

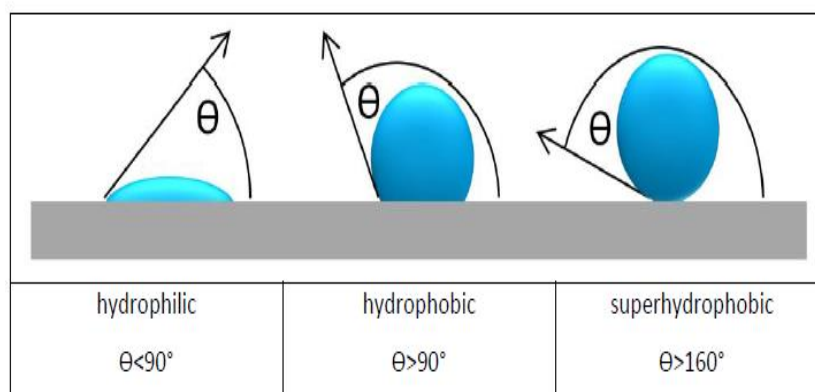
Smáčivost

Ovlivnění smáčivosti povrchu pomocí laseru je hlavní náplní této bakalářské práce. Smáčivost ve strojírenství může hrát roli při vývoji nových funkčních povrchů, při navrhování nových

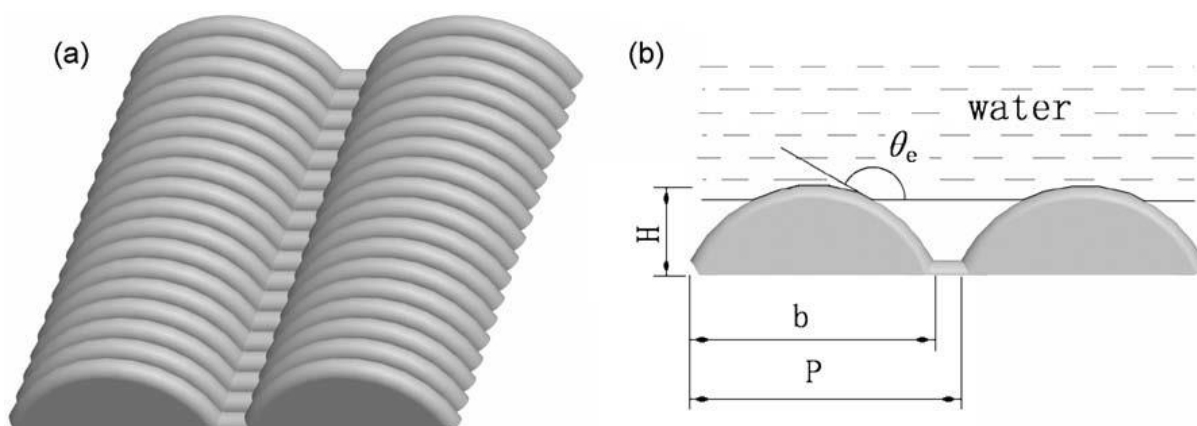
obráběcích technologií ve vztahu s řeznou kapalinou nebo při výrobě obrobků s přesně danými povrchovými vlastnostmi. Například v leteckém průmyslu je velkým problémem vytváření námraz, které negativně ovlivňuje provoz a leteckou bezpečnost letadel a vrtulníků [11]. Právě v tomto průmyslu se využívají tzv. superhydrofobní povrchy, díky jejichž modifikovaným vlastnostem je možné předejít tvorbě námraz nebo je alespoň výrazně omezit.

Nejhrubší stupnicí kvality smáčivosti je kategorizace na hydrofilnost (snaha povrchu kapalinu přijmout) a hydrofobnost (snaha povrchu kapalinu odpudit). Za kvantifikační veličinu smáčitelnosti byl přijat tzv. kontaktní úhel (úhel smáčivosti).

Obrázek 6 představuje rozdělení povrchů podle úhlu smáčivosti. Kontaktní úhel od 0 do 90 stupňů charakterizuje hydrofilní povrch, kontaktní úhel nad 90 stupňů charakterizuje hydrofobní povrch a kontaktní úhel nad 160 stupňů charakterizuje superhydrofobní povrch.



Obrázek 6: Rozdělení povrchů podle úhlu smáčivosti [1]



Obrázek 7: Příklad struktury povrchu s hydrofobními vlastnostmi [12]

Kontaktní úhel lze měřit několika metodami:

Metoda staticky přichycené kapky měří kontaktní úhel goniometrem pomocí optického podsystému zachycujícího profil čisté kapaliny na pevném podkladu. Úhel svíraný kapalinou a rozhraním pevné látky je měřený kontaktní úhel. Současné přístroje používají systémy ve vysokém rozlišení, kamery a software pro snímání a analýzu kontaktního úhlu a dalších veličin.

Metoda dynamicky přichycené kapky je do jisté míry podobná metodě staticky přichycené kapky. Společným znakem těchto metod je určení největšího možného kontaktního úhlu, avšak pro určení kontaktního úhlu je zapotřebí, aby docházelo k dynamické změně zkoumané kapky.

Metoda pro prachové materiály umožňuje měření průměrného kontaktního úhlu a absorpční rychlosti pro prachové a porézní materiály. Obvykle je měřena i změna hmotnosti jako funkce času [13–15].

Povrchy vykazující změnu smáčivosti prostřednictvím modifikace struktury mohou mít různé podoby. Obrázek 7 představuje příklad modifikované struktury povrchu ve prospěch hydrofobních vlastností povrchu materiálu.

2.3 Charakteristika laseru

Název laser vznikl jako zkratka z anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což lze přeložit jako zesílení světla s využitím stimulované emise záření.

Laserové zařízení se skládá z aktivního prostředí, rezonátoru a zdroje energie. Jako zdroj energie může být použita např. impulzní xenonová nebo rtuťová výbojka. Dodáním energie dojde k excitaci elektronů atomů látky aktivního prostředí ze základní energetické hladiny do hladiny vyšší. Dostatečné množství takto vybuzených elektronů způsobí vznik tzv. inverzní populace. Po dosažení tohoto stavu elektrony přechází na nižší energetickou hladinu, přičemž dochází k emisi energie ve formě fotonů, které interagují s dalšími elektrony a spouštějí tak stimulovanou emisi fotonů se stejnou frekvencí a fází, tzv. koherentní záření.

Aktivní prostředí je umístěno v rezonátoru, který se skládá ze dvou zrcadel (polopropustné a odrazné). Za použití těchto zrcadel lze podpořit stimulovanou emisi a zesílit tok fotonů. Výsledný světelný paprsek opouští rezonátor přes polopropustné zrcadlo.

Lasery lze rozdělit do několika kategorií, a to podle vlnové délky emise, časového režimu provozu (kontinuální, pulsní), typu buzení (lasery buzené opticky, elektrickým výbojem, chemicky atd.), typu aktivního prostředí a délky generovaného pulsu (nanosekundové, pikosekundové, femtosekundové, atd.). Nejčastěji se lasery dělí podle použitého aktivního prostředí, a to na pevnolátkové, které patří mezi nejrozšířenější, kapalinové a plynové.

Laserové zařízení s plynovým aktivním prostředím

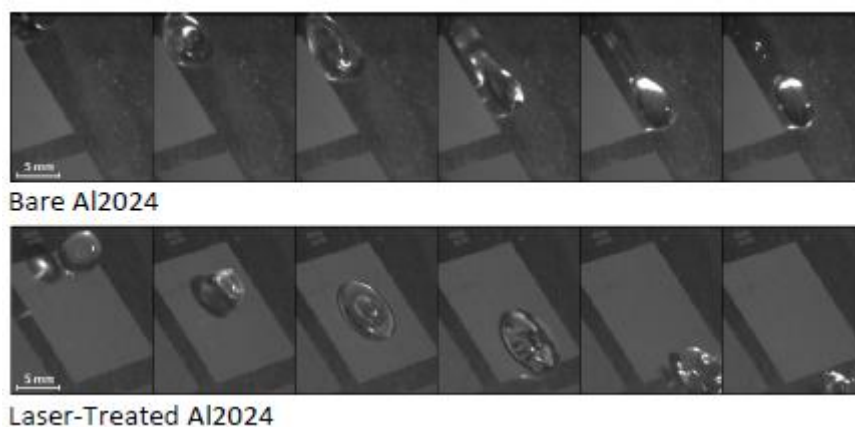
Laser, který využívá jako aktivní látku plyn nebo směs plynů, je schopný generovat záření v širokém spektrálním rozsahu (od měkkého rentgenového po infračervenou oblast). Plynové lasery lze dále rozdělit například na lasery s výbojem v plynu, dynamické plynové lasery nebo excimerové lasery. Excimerové lasery patří mezi nejpoužívanější plynové lasery. Princip excimerového laseru je založen na elektronovém přenosu v dimerních molekulách vzácných plynů a halogenů.

Laserové zařízení s pevnolátkovým aktivním prostředím

Jak již bylo řečeno, laserová zařízení s pevnolátkovým aktivním prostředím jsou jedním z patřících mezi nejrozšířenějších druhů laseru. Jejich matrice (nosiče) jsou opticky průhledné homogenní krystaly a skla (safír, granát, fluoridy, silikáty a další). Účinnost těchto laserů je velice malá (pod 1 %), což je způsobeno tím, že absorpční pásy jsou úzké a využívají proto pouze malou část energie výbojky. Účinnost je dále ovlivněna kvalitou krystalu, jeho opracováním a homogenitou aktivních příměsí [16].

2.3.1 Volba laseru pro tvorbu superhydrofobních povrchů

Pro vytváření povrchových struktur se superhydrofobními vlastnostmi lze úspěšně využít pevnolátkové lasery s krátkými až ultrakrátkými pulzy. Povrchové struktury mohou být vytvořeny pomocí laserového texturování s omezenou tepelnou interakcí mezi materiálem a laserovým paprskem. Obrázek 8 představuje fotografie pořízené vysokorychlostní kamerou z měření smáčivosti povrchu obrobeného laserem s krátkými až ultrakrátkými pulzy, které zachycují různé momenty průběhu dopadání kapky vody na povrch. Byly použity 15 μl kapky vody za pokojové teploty, které dopadaly z 30 cm výšky při sklonu vzorku s úhlem 60°. Byla zkoumána smáčivost referenčního Al2024 povrchu a povrchu Al2024, který byl upraven pomocí femtosekundového laseru ($\tau_p = 310 \text{ fs}$, $\lambda = 1030 \text{ nm}$). U povrchů ošetřených laserem (spodní řada fotografií na obrázku 8) je zřetelné, že kapky po nárazu na povrch po povrchu sklouzly a nechaly jej suchý. Na fotografiích referenčního povrchu, který nebyl ošetřen laserem (horní řada fotografií na obrázku 8), je možné pozorovat, že se kapky po nárazu rozprostřely po povrchu a pomalu stékaly dolů, kde se přibližně po 1 cm zastavily. Na základě tohoto pozorování, bylo možné tvrdit, že pevnolátkový laser s krátkými až ultrakrátkými pulzy je vhodný k obrábění povrchu materiálů s cílem získat povrch se superhydrofobními vlastnostmi [11].



Obrázek 8: Fotografie z měření smáčivosti povrchu Al2024
(horní řada fotografií – kapka vody dopadající na čistý povrch Al2024, spodní řada fotografií – kapka vody dopadající na plochu ošetřenou laserem) [11]

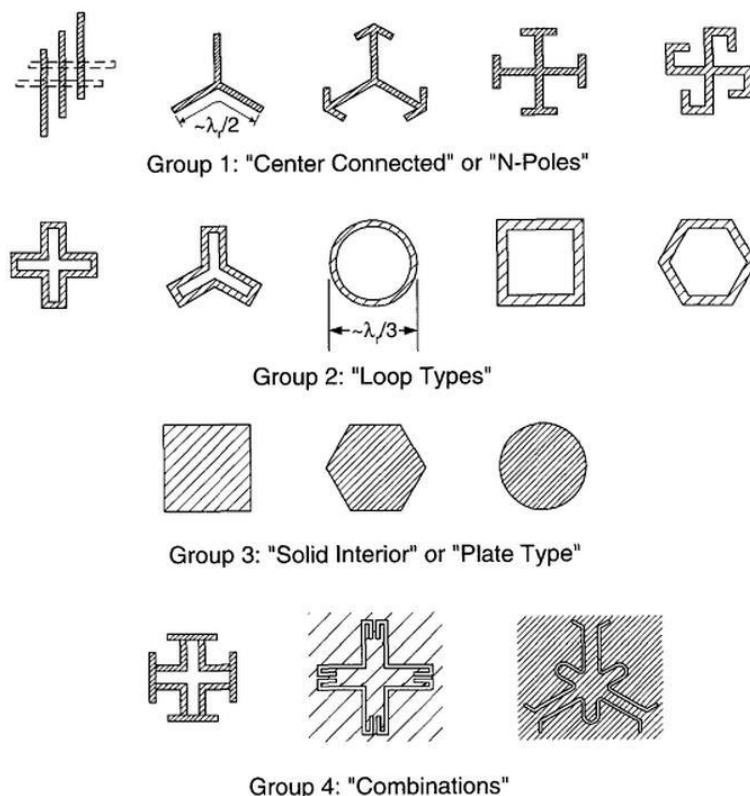
2.3.2 Laserové technologie pro povrchové strukturování

Při práci s laserem se využívá několika technologií. Tyto technologie se od sebe liší svojí cenou, účinností nebo typem používaných laserových zdrojů. Mezi základní technologie patří technologie: Frequency selective surfaces, Direct laser interference patterning a Direct laser ablation.

- *Frequency selective surfaces (FSS)*

FSS technologie se především používá pro výrobu obalů, které chrání antény proti vnějšímu prostředí. Tyto obaly lze například využít pro zakrytí předních antén letadel pro snížení odrazové plochy radarového zařízení (RCS – Radar Cross Section), díky čemuž je letadlo těžko odhalitelné pomocí radarů. Další možností využití technologie FSS je výroba optických světelných polarizátorů, které přenášejí či odrážejí vertikální nebo horizontální polarizaci.

Energické zobrazení laserového paprsku, které vzniká při použití této technologie lze rozdělit do čtyř kategorií (viz obrázek 9): centrálně spojené, smyčkovité tvary, plné tvary a jejich kombinace [17].



Obrázek 9: Typy struktur vytvořené pomocí FSS technologie, 1. řada (centrálně spojené), 2. řada (smyčkové tvary), 3. řada (plné tvary), 4. řada (jejich kombinace) [17]

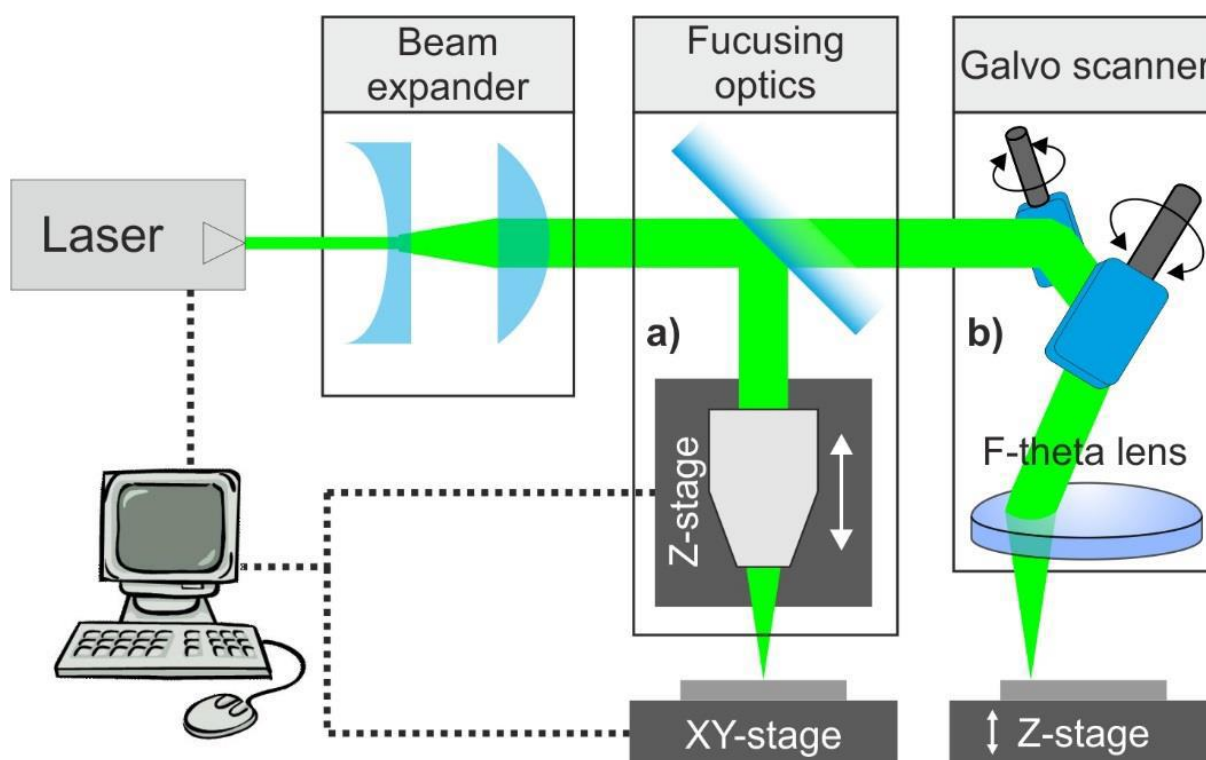
- *Direct laser interference patterning (DLIP)*

DLIP je technologie, která je založena na principu použití zrcadel, které rozdělují a usměrňují laserový paprsek. Tato optická konfigurace se většinou využívá u laserových zařízení, které využívají laserové zdroje s nanosekundovou pulsní délkou. Tato technologie se využívá pro vytváření tenkých strukturovaných vrstev a vícevrstevných kovových vrstev s opakujícími se tvary. Vytvořené struktury jsou pak používány např. pro snížení tření na kovových površích, zvyšování živostnosti použitých maziv a pro zvyšování účinnosti solárních panelů. Tato metoda se liší od metody DLA vyšší rychlostí skenovacího paprsku [17].

- *Direct laser ablation (DLA)*

V praktické části použítá metoda DLA je bezkontaktní všestranná technologie strukturování, která může být aplikována na širokou škálu povrchových elementů. Jedná se o technologii, která používá zaostřený laserový paprsek k přímé ablací materiálu. Skenovací rychlost laserového systému fungujícího na principu technologie DLA lze zvýšit pomocí laseru s vyšší pulzní frekvencí nebo použitím polygonálních skenovacích hlav, které jsou schopny v rychlostech několika desítek metrů za sekundu polohovat laserový paprsek. Skenovací hlavy zaostřují laserové spoty do relativně velkých rozměrů, což ovlivňuje velikost vyrobitelných struktur pomocí těchto skenerů.

Při práci s DLA technologií lze využít dvou konfigurací (viz obrázek 10). Obě konfigurace používají expandér laserového paprsku k následnému nastavení velikosti průměru laserového spotu. První systém funguje za využití fokusační optiky, která je umístěna na vertikální ose. Přenos laserového paprsku na povrch vzorku je umožněn pomocí pohybu samotného vzorku v ose XY. Druhý systém využívá skenovací hlavu (např. galvoskener), který pohybuje v rovině XY laserovým paprskem na stacionárním vzorku [17].



Obrázek 10: Systémy fungující na principu DLA technologie. Použití fokální čočky s posuvným vzorkem (a). Použití galvoskeneru (b) [17]

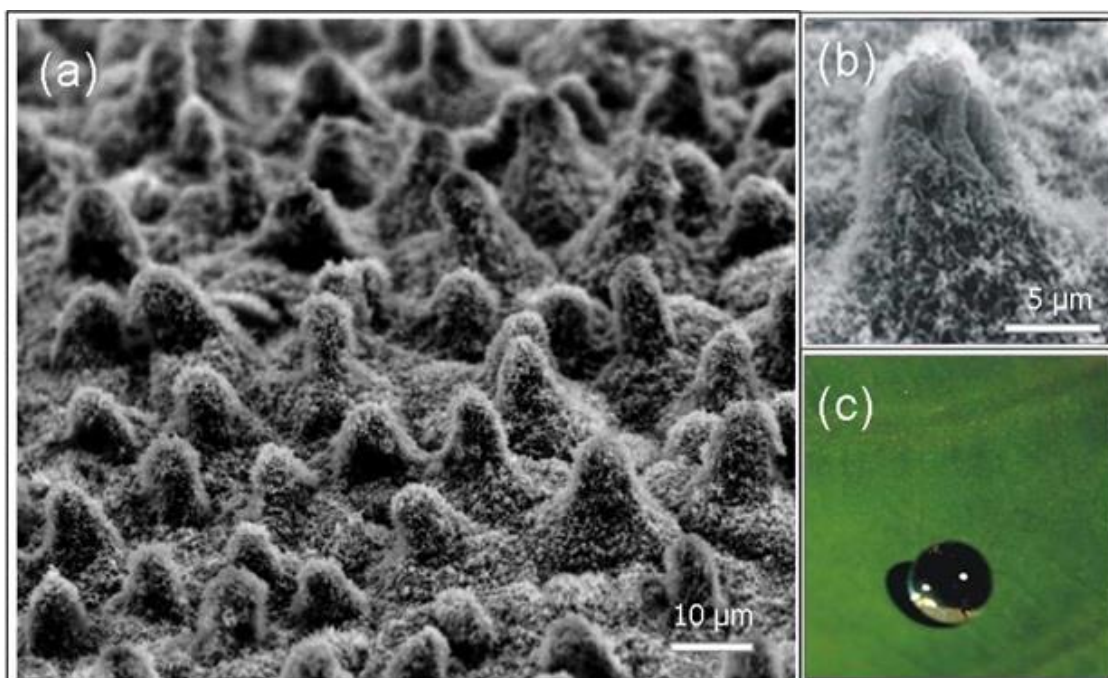
Nevýhodou této technologie je její výkonnost, která je při použití jednoho zaostřeného laserového paprsku velmi nízká, zato ji lze považovat za velmi univerzální technologii [17].

2.4 Současný přístup v oblasti navrhování povrchových struktur pro změnu smáčivosti povrchu

V dnešní době je smáčivost velice atraktivním tématem, a to z toho důvodu, že nabízí možnosti propojování různých vědních oborů. Výhodou zkoumání smáčivosti povrchů je to, že vyhodnocování smáčivosti není příliš technicky obtížné ani finančně náročné. Ve strojírenství

smáčivost zaujímá důležitou úlohu při vývoji nových funkčních povrchů, při navrhování např. nových technologií obrábění v souvislosti s intenzivním chlazením břitů rezných nástrojů, při výrobě obrobků s přesně specifikovanými vlastnostmi apod.

Existuje velké množství studií a experimentů, které se týkají ovlivněním smáčivosti. Lze však říci, že většina z nich nepřichází se zásadními inovativními myšlenkami, ale je v nich projeována snaha co nejvíce se přiblížit strukturám, které se vyskytují v přírodě (bionika). Mezi nejzajímavější přírodní zástupce s modifikovaným povrchem z hlediska chování ke kapalině, patří povrch listu lotosu (viz obrázek 11). Tento povrch vykazuje tzv. lotosový efekt, který způsobuje, že kapalina po dopadu na list zůstává ve tvaru koule a stéká po listech, aniž by se vsakovala do jejich povrchu.



Obrázek 11: Povrch listu lotosu [18]

2.4.1 Technologie LIPSS – výroba nanostruktur

V dnešním světě nejsou produkty poměřovány pouze na základě jejich funkčnosti, ale musí disponovat i doplňujícími vlastnostmi, kterými se odlišují od konkurenčních produktů. V průmyslu jsou zaváděny stále nové technologie, které zajišťují dosažení těchto doplňujících vlastností. Jednou z nich je např. technologie LIPSS (Laser induced periodic surface structures). Název této technologie lze volně přeložit do češtiny jako „pravidelné povrchové struktury vytvořené pomocí laseru“. Tato technologie se především používá pro tvorbu struktur, které jsou nanoskopické a použitelné pro téměř všechny materiály jako jsou kovy, keramika, polovodiče a polymery. Technologie LIPSS je specifická tím, že struktury vytvořené touto technologií mohou samovolně vznikat při ozařování povrchu laserem s nedostatečnou velikostí energie pro tavení nebo vypařování materiálu z ozařovaného povrchu. Dalšími parametry laseru, kterými lze ovlivnit vznik a tvar struktur vytvořených pomocí technologií LIPSS (dále už jenom struktury LIPSS), jsou vlnová délka a polarizace laserového paprsku. Změnou těchto

parametrů je možné přizpůsobit opakování a orientaci výsledných drážek, které mají většinou vlnitý nebo nepravidelný tvar.

Výrobní proces technologie LIPSS je experimentální, což znamená, že se vyrábí metodou pokus – omyl. Tento způsob výroby je problematický, protože v průmyslu je potřeba, aby výrobní procesy byly předvídatelné a opakovatelné. Pro překonání tohoto problému je zapotřebí stanovit takové struktury LIPSS, které budou jednotné a pravidelné, budou pokrývat velkou plochu a budou vznikat v závislosti na parametrech laseru a materiálu. Tímto tématem se např. zabývá nizozemská univerzita ve městě Twente. Na této univerzitě je ve vývoji nová metoda pro vypočítávání výskytů struktur LIPSS, se kterou bude možné optimalizovat parametry pro výrobu homogenních polí tvořených ze struktur LIPSS [11].

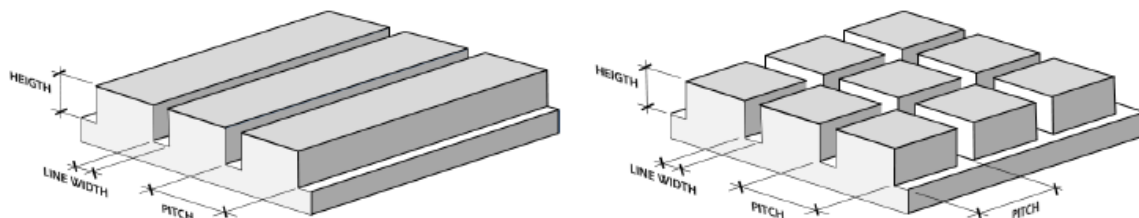
Popis metody vyvíjené nizozemskou univerzitou ve Twente

Metoda je testována za pomoci infračerveného krátkopulzního laserového systému, který působí na tenké silikonové vrstvy. Laserový paprsek skenuje povrch vrstev s měnící se energií a rychlostí. Změnou skenovací rychlosti lze dosáhnout změny překrytí pulsů laseru, což ovlivňuje přísun energie na jedno místo. Energie v jednom místě se zvyšuje při větším překrytí pulsů. Vyhodnocením parametrů materiálu, které mohou ovlivnit vznik určitého druhu struktury LIPSS, lze vypočítat a předpovědět, kdy vznikne daná struktura LIPSS na povrchu daného materiálu [11].

Srovnání povrchu se strukturou LIPSS a povrchu bez této struktury

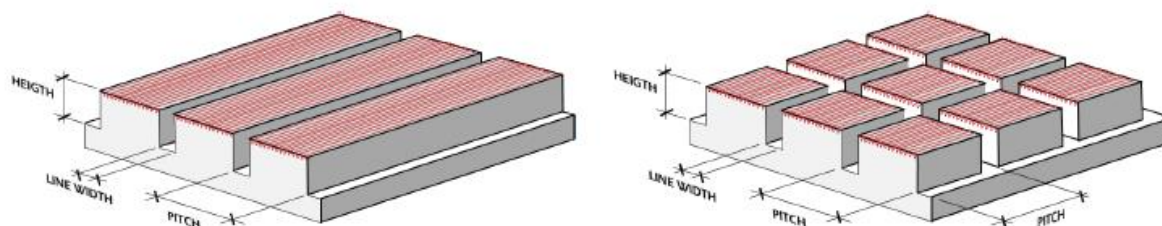
M. Martínez-Calderon et al. [19] provedli srovnání různých struktur pomocí experimentu s austenitickou nerezovou ocelí (ALSI304). Drsnost vzorkovaného materiálu byla změřena profilometrem na hodnotu $R_a = 650$ nm. Vzorek byl čištěn v ultrasonické acetonové a ethanolové lázni před a po použití laseru. K vytváření struktur byl použit safírový laserový systém o délce pulzů $\tau_p = 130$ fs a s vlnovou délkou $\lambda = 800$ nm s opakovací frekvencí $f_p = 1$ kHz.

Nejdříve byly vytvořeny na testovacím materiálu dva modely s rozměry drážek od $30 \mu\text{m}$ do $90 \mu\text{m}$ (viz obrázek 12) pomocí laserového paprsku o velikosti spotu $d = 20 \mu\text{m}$ a pulsní energii $E_p = 35 \mu\text{J}$.



Obrázek 12: Model drážek (vlevo) a mřížky (vpravo) [19]

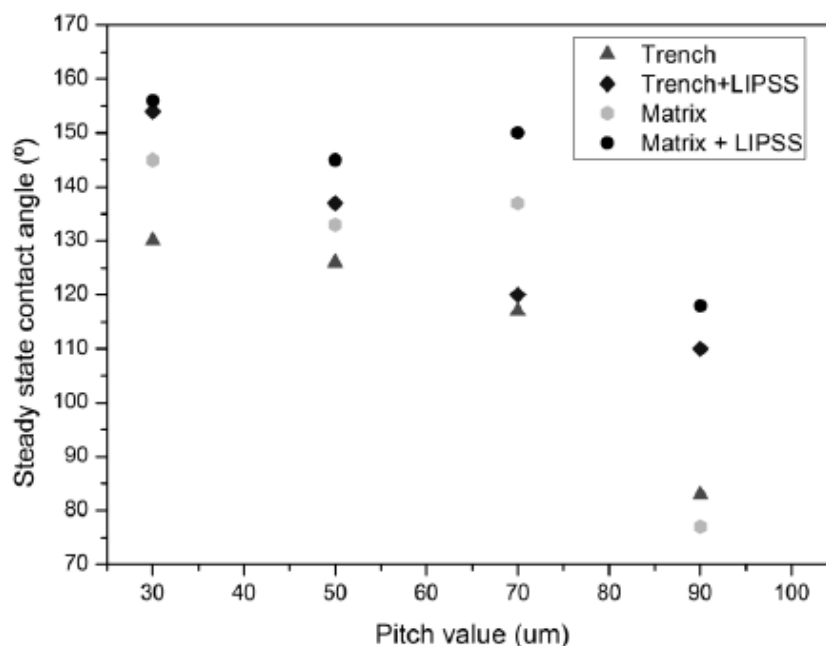
Dále byly na těchto modelech vytvořeny struktury LIPSS (viz obrázek 13), a to upravením pulsní energie na $E_p = 10 \mu\text{J}$, rozostřením laserového spotu a zvýšením skenovací rychlosti laseru na $v_f = 3$ mm/s.



Obrázek 13: Modely se strukturami LIPSS [19]

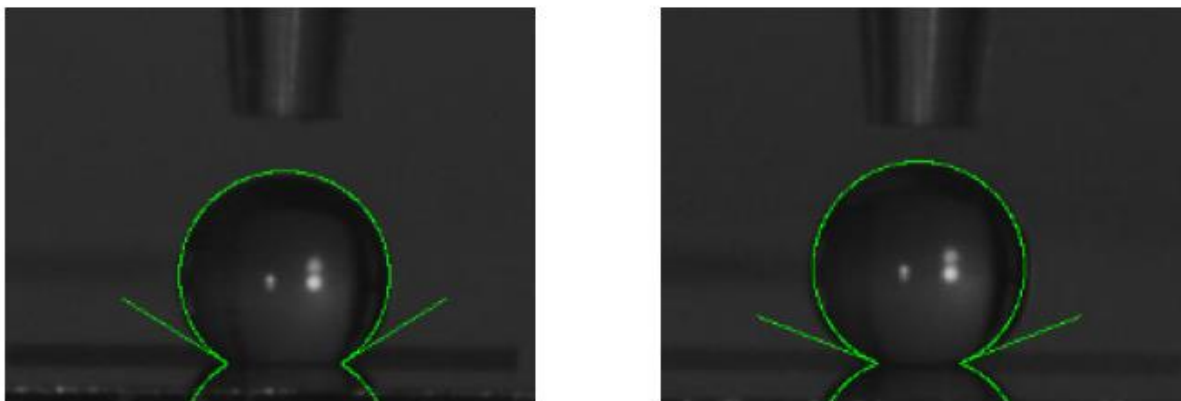
Nakonec se na vyrobených strukturách měřil statický úhel smáčivosti Ω . Toto měření bylo provedeno digitální kamerou, která měřila dopad kapky destilované vody o objemu 3,5 μl .

Na laserově neovlivněném povrchu nerezové oceli, byl naměřen úhel smáčivosti $\Omega = 75^\circ$. Při měření úhlu smáčivosti ihned po opracování povrchu laserem byl naměřený úhel smáčivosti menší než $\Omega = 30^\circ$, což je charakteristické pro hydrofilní povrchy. Dále byly vzorky uschovány v čisté místnosti, kde byly ponechány na atmosférickém vzduchu. Po 120 hodinách byly opracované povrchy znovu změřeny a bylo zjištěno, že se vzorky staly velmi hydrofobními až superhydrofobními. Tato změna k superhydrofobitě nemá svoji příčinu v drsnosti, neboť kdyby byla drsnost hlavní příčinou změny na superhydrofobní povrch, bylo by jí možné změřit již po úpravě pomocí femtosekundového laseru. Tyto nečekané změny smáčivosti lze vysvětlit průběhem chemické reakce opracovaného povrchu se vzdušným CO_2 , která vedla k hromadění sloučenin obsahujících uhlík na povrchu vzorku. Úhel smáčivosti povrchu byl měřen každý den, a až po 50 dnech jej bylo možné považovat za konstantní. Tento poznatek může být pro vytváření povrchů s modifikovanou smáčivostí zásadní, neboť hydrofobní chování povrchu nemusí nutně záviset pouze na charakteru vytvořené struktury na povrchu, ale i na schopnosti materiálu interagovat se vzdušným oxidem uhličitým [19].

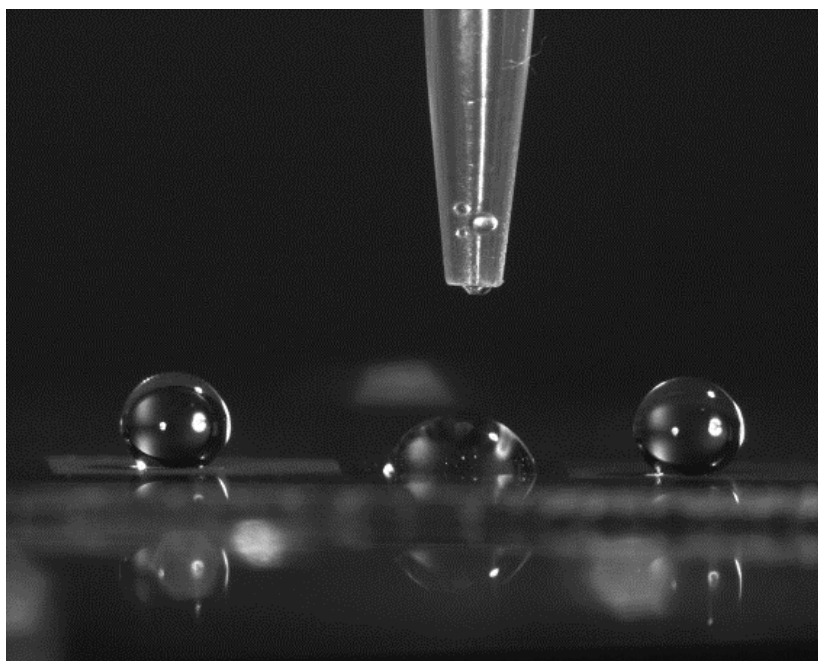


Obrázek 14: Graf závislosti úhlu smáčivosti na velikosti drážky (trojúhelníková značka – vzorek s drážkami, čtvercová značka – vzorek s drážkami se strukturami LIPSS, šedá kruhová značka – vzorek s mřížkami, černá kruhová značka – vzorek s mřížkami se strukturami LIPSS) [19]

Na obrázku 14 je uveden graf závislosti úhlu smáčivosti vyrobených struktur na velikosti povrchu. Je patrné, že s rostoucí velikostí drážky klesá velikost úhlu smáčivosti nezávisle na typu modelu nebo struktury povrchu. Vytvořením struktur LIPSS se povrchy staly hydrofobními až superhydrofobními. Největší statický úhel smáčivosti byl naměřen na modelu mřížek se strukturami LIPSS, který měl velikost $\Omega = 158^\circ$ (viz obrázek 15). Na modelu drážek se strukturami LIPSS byl naměřen úhel smáčivosti velikosti $\Omega = 153^\circ$ (viz obrázek 15). Je tedy patrné, že i typ modelu ovlivňuje velikost hydrofobicity [19].



Obrázek 15: Kapka vody na modelu drážek se strukturami LIPSS, kde byl naměřen úhel smáčivosti $\Omega = 153^\circ$ (vlevo) a kapka vody na modelu mřížek se strukturami LIPSS, kde byl naměřen úhel smáčivosti $\Omega = 158^\circ$ (vpravo) [18]



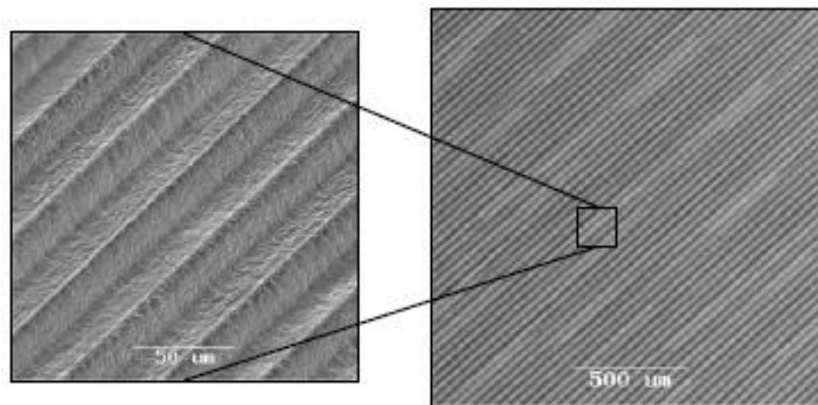
Obrázek 16: Srovnání mezi kapkami na neopracovaném povrchu (uprostřed) a dvou laserově opracovaných površích s drážkami a mřížkami [19]

2.4.2 Modifikované povrchy s mikrostrukturami a nanostrukturami

Uměle vytvořené povrchy, které se svými vlastnostmi blíží vlastnostem přírodních povrchů, jsou realizovány výrobou kombinací povrchových mikrostruktur a nanostruktur. Výroba nanostruktur, které jsou vytvářeny na vyrobených povrchových mikrostrukturách a které svými

vlastnostmi ovlivňují smáčivost daného povrchu, se provádí pomocí technologie LIPSS. Tato technologie byla již popsána v předešlé podkapitole. Výroba povrchových mikrostruktur pomocí laserového zařízení je odlišná od výroby povrchových nanostruktur pomocí laserového zařízení.

Pro výrobu povrchových mikrostruktur je vhodné použít pikosekundové (ps) laserové zařízení. Toto zařízení kombinuje vysokou procesní rychlost nanosekundových (ns) laserových zařízení s velikou obráběcí kvalitou femtosekundových (fs) laserových zařízení. Použití laserového zařízení s krátkou dobou trvání pulzů (např. 12 ps) umožňuje výrobu povrchových mikrostruktur s požadovanou kvalitou a reprodukovatelností. Pro stanovení základních pracovních parametrů laserového zařízení je třeba stanovit ablační chování vzniklé působením laserového zařízení na daný povrch. Pojem ablační chování v sobě zahrnuje míru ablace na jeden puls laserového zařízení a tepelné účinky na povrch materiálu. Tyto veličiny lze určit v závislosti na průměrné pulzní energii používaného laserového zařízení a termofyzikální vlastnosti zvoleného obráběného materiálu. Použitím určitých pracovních parametrů laserového zařízení (průměrný výkon laserového systému (P_{av}), opakovací frekvence (f_p), překrytí pulzů aj.) je možné vyrobit povrchové mikrostruktury s přesnými tvary a velikostmi [20]. Na obrázku 17 je uveden příklad povrchové mikrostruktury, která je vyrobena pomocí pikosekundového laserového zařízení.



Obrázek 17: Povrchová mikrostruktura vyrobená pikosekundovým laserem [20]

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem praktické části této práce bylo připravit takové vzorky, které by po ošetření povrchu za pomoci laserové technologie vykazovaly změnu ve smáčivosti povrchu. V rámci této části práce byly provedeny následující činnosti: návrh povrchových struktur z dostupné rešerše, fyzická příprava polotovarů vzorků, výroba povrchových struktur pomocí laseru a testování vyrobených vzorků s ohledem na smáčivost povrchu.

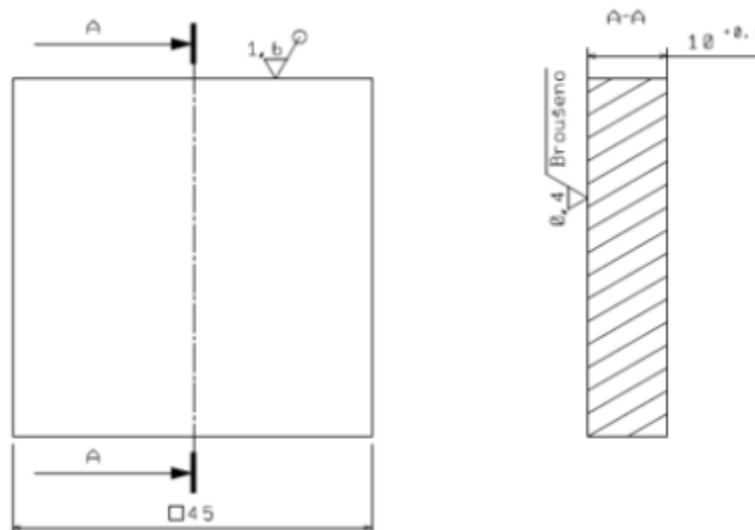
3.1 Charakterizace vzorků

Jako vzorkový materiál byla zvolena austenitická chromniklová ocel stabilizovaná titanem X6CrNiTi18-10 (ČSN 17 247), jejíž chemické složení je podrobně popsáno v tabulce 1. Materiál byl zvolen na základě provedené rešeršní činnosti. Tato ocel má vysoké zastoupení v mnoha průmyslových oblastech, které se fokusují na strukturování povrchů laserem a jeho následné aplikace.

C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	P	S
max. 0,08	max. 2,00	max. 1,00	17,0-19,0	9,5-12,0	min. 5x %C	max. 0,045	max. 0,030

Tabulka 1: Chemické složení vzorkového materiálu [hm %] [21]

Vzorky byly vyrobeny do kvádrového tvaru se čtvercovou podstavou o délce stran 45 mm a výškou 10 mm (viz obrázek 18). Tyto rozměry byly zvoleny proto, aby bylo možné vytvořit více strukturovaných ploch na jednom vzorku a rovněž aby bylo snazší vyhodnotit a změřit vzniklé funkční povrchy. Povrch byl broušen na drsnost $R_a = 0,4 \mu\text{m}$, jelikož na povrchu o vyšší drsnosti by mohly být vlastnosti vytvořených struktur zkreslené a jejich vyhodnocování a měření by bylo obtížně opakovatelné.



Obrázek 18: Výkres pro výrobu vzorků

3.2 Návrh velikostí a tvaru struktur

Návrh struktur, které ovlivňují smáčivost povrchu, resp. zvyšují jeho hydrofobicitu byl vyvozen z provedené rešerše.

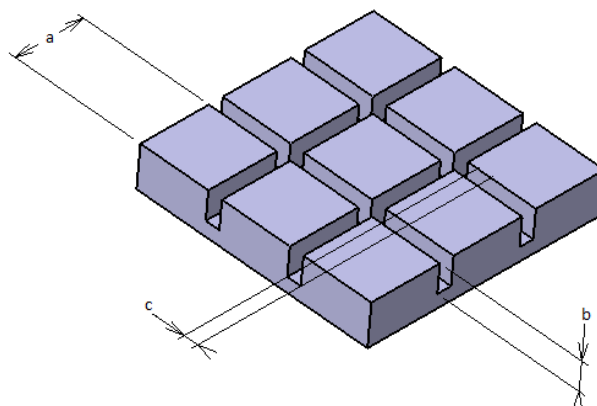
Pro výrobu funkčních ploch byly zvoleny čtyři základní tvary:

a) Kvádr

Jednotlivé rozměry jsou podrobněji popsány tabulce 2, kde parametr a je délka strany podstavy kvádrů, parametr b je výška jednotlivých kvádrů a parametr c je vzdálenost mezi jednotlivými kvádry. Model této struktury je uveden na obrázku 19.

a [μm]	b [μm]	c [μm]	
50	5	20	
	10	20	10
	20	20	13

Tabulka 2: Rozměry kvádrů



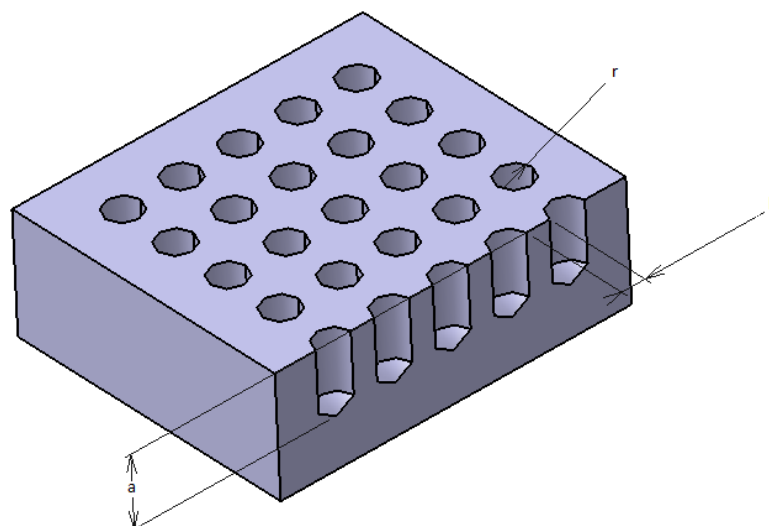
Obrázek 19: Model struktury kvádrů vytvořené v programu CATIA

b) Díra

Jednotlivé rozměry jsou podrobněji popsány v tabulce 3, kde r je poloměr jednotlivých děr, parametr a je hloubka jednotlivých děr a parametr b je vzdálenost jednotlivých děr měřena od kraje jedné díry ke kraji díry další. Model této struktury je zobrazen na obrázku 20.

r [μm]	a [μm]	b [μm]		
10	12	20	10	5
15		20	10	5
20		20	10	5

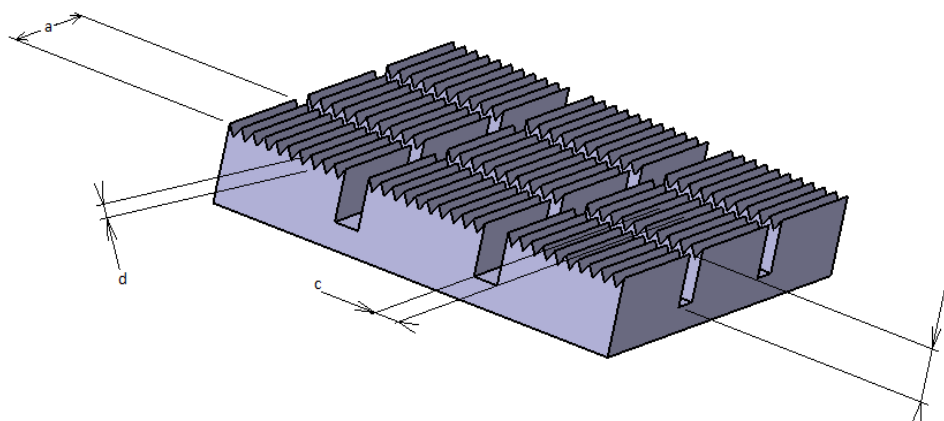
Tabulka 3: Rozměry děr



Obrázek 20: Model struktury děr vytvořené v programu CATIA

c) Kvádr s LIPPSy

Tato struktura je charakterizována parametry $a = 50 \mu\text{m}$, $b = 5 \mu\text{m}$ a $c = 20 \mu\text{m}$, kde parametr a vyjadřuje délku strany podstavy kvádrů, parametr b představuje výšku jednotlivých kvádrů, parametr c představuje vzdálenost mezi jednotlivými kvádry. Parametr d charakterizuje strukturu LIPPS, která vzniká pomocí změny polarizace laserového paprsku. Model této struktury je uveden na obrázku 21.



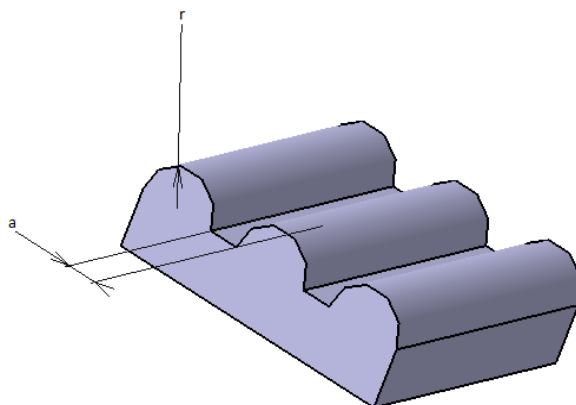
Obrázek 21: Model struktury kvádrů s LIPPSy vytvořené v programu CATIA

d) Vlna

Jednotlivé rozměry jsou podrobněji popsány v tabulce 5, kde parametr r je poloměr jednotlivých vln a parametr a je vzdálenost jednotlivých vln měřená od okrajů jednotlivých vln. Model této struktury je uveden na obrázku 22.

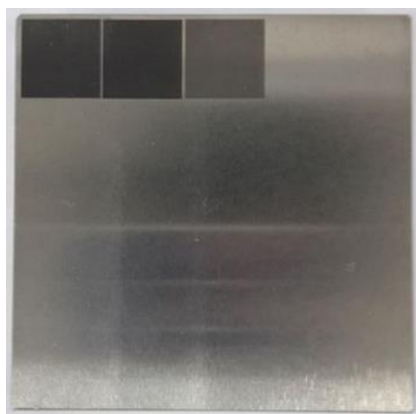
r [μm]	a [μm]
5	20
10	
20	

Tabulka 4: Rozměry vln



Obrázek 22: Model struktury vln vytvořené v programu CATIA

Jednotlivé struktury byly fyzicky vyrobeny na vzorku ve tvaru čtverců o velikosti stran 9x9 mm (viz obrázek 23).



Obrázek 23: Fotografie vyrobených povrchových struktur

3.3 Stanovení parametrů laserového strukturování

Před začátkem výroby navržených povrchových struktur bylo nutné určit správné rozsahy procesních parametrů laserového systému. Pro stanovení těchto parametrů, bylo zapotřebí vyjádřit ablační prahovou hustotu energie F_{th} pro vybraný materiál, která byla vyjádřena na základě testování. Materiál byl testován za použití různých energií pulzů E_p , k nimž byl změřen určitý průměrný výkon laserového zdroje P_{av} . Díky tomuto testování vznikly laserové spoty, pro 12 různých výkonů (viz tabulka 6) v pěti opakování, jejichž průměry byly dále změřeny, zpracovány a zaneseny do grafu (viz obrázek 25).

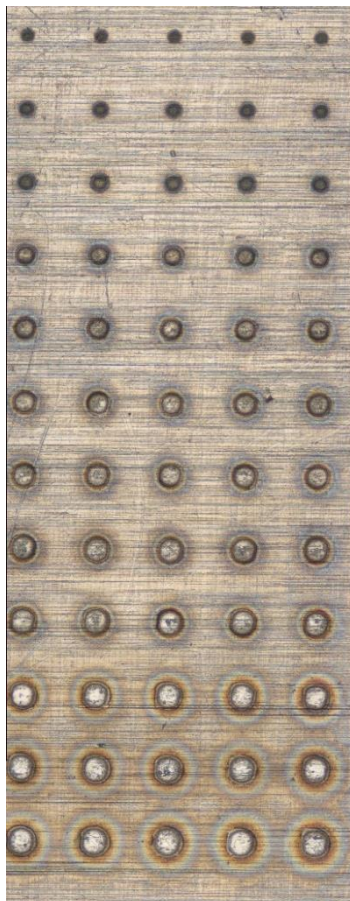
	P_{av} [W]	f_p [kHz]	E_p [uJ]	$\ln(E_p)$ [uJ]
1	0,184	200	0,92	-0,08
2	0,297		1,49	0,40
3	0,491		2,46	0,90
4	0,979		4,90	1,59
5	1,538		7,69	2,04
6	2,007		10,04	2,31
7	2,487		12,44	2,52
8	3,073		15,37	2,73
9	3,960		19,80	2,99
10	4,922		24,61	3,20
11	5,970		29,85	3,40
12	6,890		34,45	3,54

Tabulka 6: Parametry laserového strukturování

Bylo vytvořeno 60 různých laserových spotů (viz obrázek 24), jejichž parametry byly měřeny na přístroji Alicona InfiniteFocus. Měřil se průměr vzniklých spotů d , ze kterého byl vypočítán průměr pro každý jednotlivý průměrný výkon laseru P_{av} . (viz tabulka 7)

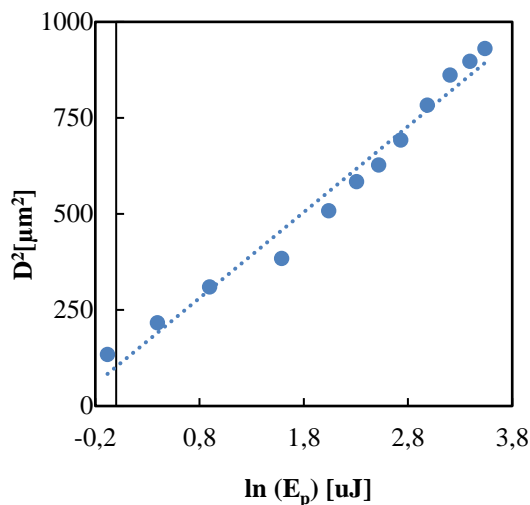
	D [μm]	D ² [μm^2]
1	11,60	134,64
2	14,72	216,54
3	17,62	310,54
4	19,60	384,28
5	22,55	508,56
6	24,17	584,43
7	25,04	627,24
8	26,31	692,24
9	27,99	783,61
10	29,36	862,08
11	29,96	897,87
12	30,50	930,54

Tabulka 7: Velikosti průměrů laserových spotů



Obrázek 24: Vytvořené laserové spoty v obráběném materiálu nasnímané pomocí přístroje Alicona InfiniteFocus

Nakonec byl sestaven graf (viz obrázek 25), kde osa x znázorňovala přirozený logaritmus energie $\ln(E_p)$ a osa y znázorňovala umocněný průměr laserových spotů D^2 . Graf byl proložen přímkou, která v průsečíku s osou x stanovila velikost ablačního prahu E_{th} .



Obrázek 25: Graf pro určení ablačního prahu

Z obecného tvaru přímky zachycující lineární průběh závislosti D^2 na $\ln(E_p)$,

$$D^2 = k \cdot \ln(E_p) + q, \quad (1)$$

byl díky lineární regresi získán předpis definující konkrétní přímku, která vznikla na základě naměřených dat

$$D^2 = 223,59 \cdot \ln(E_p) + 102,18. \quad (2)$$

Ze znalosti přesného předpisu přímky je možné určit velikost ablačního prahu E_{th}

$$0 = 223,59 \cdot \ln(E_{th}) + 102,18. \quad (3)$$

Dále bylo možné vypočítat poloměr laserového paprsku r_0 z rovnice

$$r_0 = \sqrt{\frac{k}{2}}. \quad (4)$$

Použitím výsledků z rovnice (3) a (4) byl vypočítán ablační práh hustoty energie F_{th} z rovnice

$$F_{th} = \frac{E_{th}}{\pi \cdot r_0^2} \quad (5)$$

Na základě stanovení ablační prahové hustoty energie F_{th} bylo možné určit průměrný výkon laserového systému P_{av} a opakovací frekvenci f_p pro tvorbu navržených struktur. Pro výrobu navržených povrchových vzorků byl použit rozsah průměrného výkonu laserového systému $P_{av} = 270 - 1300$ mW a opakovací frekvence $f_p = 200 - 500$ kHz. Dalšími parametry, které

ovlivňovaly výrobu navržených povrchových struktur, byly parametry překrytí pulzů ve směru posuvu laserového paprsku S_p a přísuvu H a počet opakování přejezdu laserovým svazkem. Pro výrobu navržených povrchových struktur bylo na základě provedení několika testů použito překrytí pulzů ve směru posuvu laserového paprsku v rozsahu $S_p = 2,3 - 80,7 \%$ a počet opakování přejezdu laserovým svazkem od 250 až do 1115.

3.4 Výroba navržených povrchových struktur

Po stanovení ablačního prahu vzorkového materiálu bylo možné přejít k samotné výrobě navržených povrchových struktur (viz kapitola Návrh velikostí a tvaru struktur). Výroba probíhala ve spolupráci s firmou HOFMEISTER s.r.o. Pro výrobu byl použit firemní laserový přístroj s ultrakrátkými laserovými pulzy, jehož základní parametry jsou uvedeny níže:

- $\lambda = 532 \text{ nm}$
- $\tau_p = 13 \text{ ps}$
- $f_p = 200\text{-}1000 \text{ kHz}$
- $P_{av} < 12 \text{ W}$

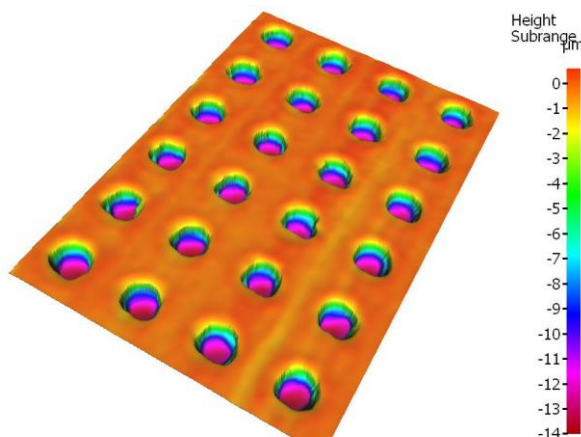
K měření velikostí vyrobených povrchových struktur, byl použit přístroj Alicona InfiniteFocus, jehož popis je uveden v příloze 1.

3.4.1 Povrchové struktury – díry

Nejdříve byly vyrobeny povrchové struktury – díry. Jednotlivé povrchové struktury se od sebe lišily poloměrem děr r a vzdáleností mezi jednotlivými dírami a . Hloubka děr byla u všech povrchových struktur $12 \mu\text{m}$. Pro výrobu byl použit průměrný výkon laserového systému $P_{av} = 300\text{--}1280 \text{ mW}$ a opakovací frekvence $f_p = 200 \text{ kHz}$. Dalšími parametry, které ovlivňovaly výrobu navržených povrchových struktur, jsou překrytí pulzů ve směru posuvu laserového paprsku a počet opakování přejezdu laserovým svazkem. Pro výrobu navržených povrchových struktur bylo na základě provedení několika testů použito překrytí pulzů ve směru posuvu laserového paprsku v rozsahu od 5% až do 82% a počet opakování přejezdu laserovým svazkem od 780 až do 1115.

Povrchová struktura – díra var. 1

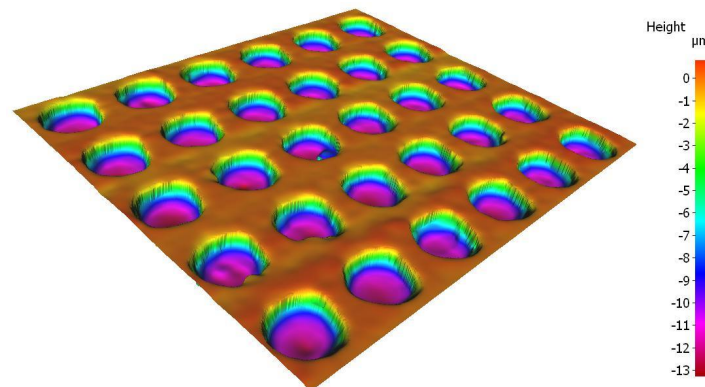
Tato povrchová struktura byla charakterizována poloměrem děr $r = 10 \mu\text{m}$ a vzdáleností mezi jednotlivými dírami $b = 20 \mu\text{m}$.



Obrázek 26: Povrchová struktura – díra var. 1 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus

Povrchová struktura – díra var. 2

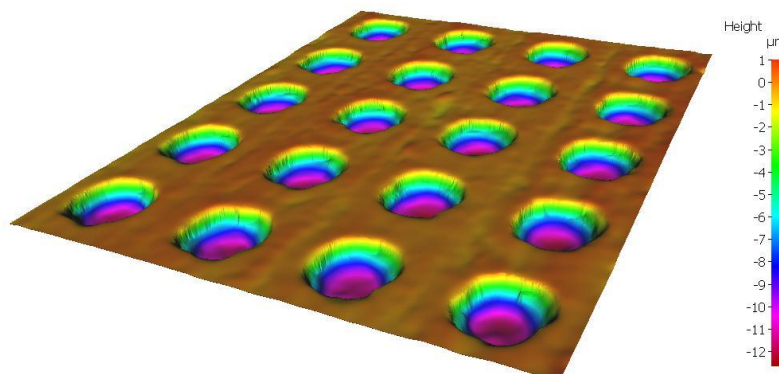
Tato povrchová struktura byla charakterizována poloměrem děr $r = 10 \mu\text{m}$ a vzdálenost mezi jednotlivými dírami $b = 10 \mu\text{m}$. Hloubka jednotlivých děr byla s ohledem na výpadek výrobního procesu pouze $9 \mu\text{m}$.



Obrázek 27: *Povrchová struktura – díra var. 2 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus*

Povrchová struktura – díra var. 3

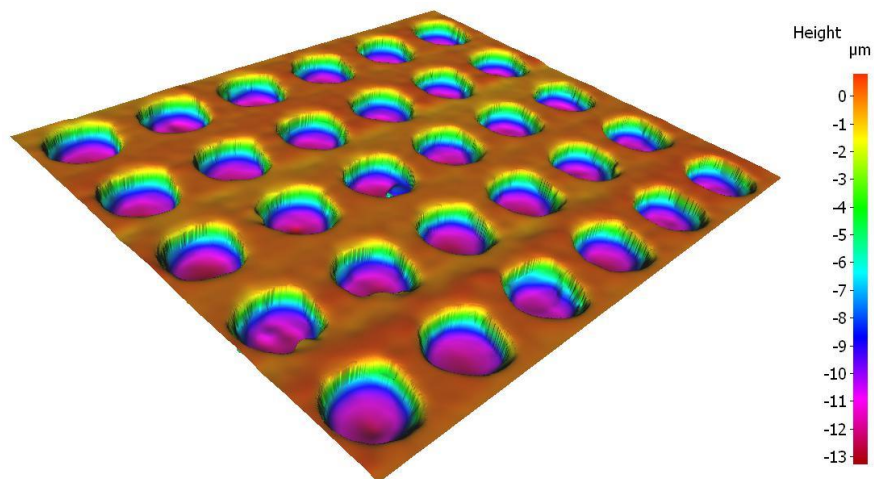
Tato povrchová struktura byla charakterizována poloměrem děr $r = 15 \mu\text{m}$ a vzdáleností mezi jednotlivými dírami $b = 20 \mu\text{m}$.



Obrázek 28: *Povrchová struktura – díra var.3 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus*

Povrchová struktura – díra var. 4

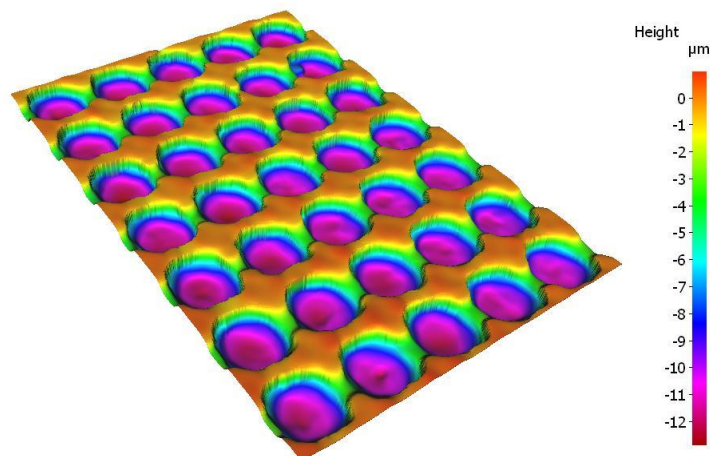
Tato povrchová struktura byla charakterizována poloměrem děr $r = 15 \mu\text{m}$ a vzdáleností mezi jednotlivými dírami $b = 10 \mu\text{m}$.



Obrázek 29: Povrchová struktura – díra var. 4 nasnímaná pomocí přístroje Alicona InfiniteFocus

Povrchová struktura – díra var. 5

Tato povrchová struktura byla charakterizována poloměrem děr $r = 15 \mu\text{m}$ a vzdáleností mezi jednotlivými dírami $b = 5 \mu\text{m}$.



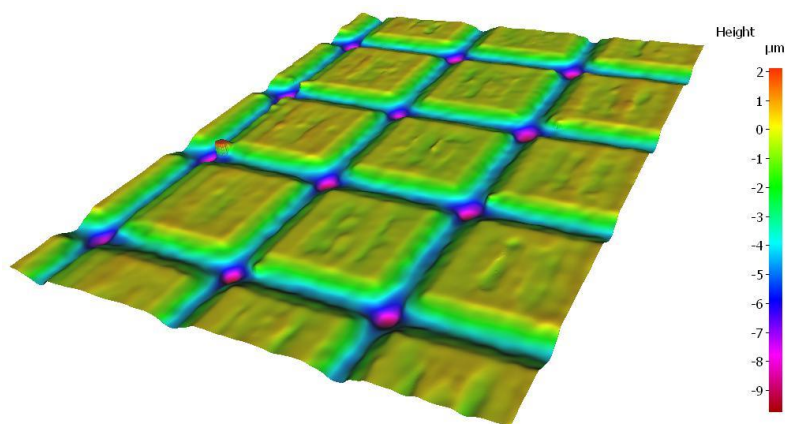
Obrázek 30: Povrchová struktura – díra var. 5 nasnímaná pomocí přístroje Alicona InfiniteFocus

3.4.2 Povrchové struktury – kvádry

Jednotlivé povrchové struktury kvádrů se od sebe lišily hloubkou drážek kvádrů b a šířkou drážek c . Podstava každého kvádrů byla vyrobena ve tvaru čtverce o velikosti strany $a = 50 \mu\text{m}$. Pro výrobu byl použit průměrný výkon laserového systému $P_{\text{av}} = 500\text{--}800 \text{ mW}$ a opakovací frekvence $f_p = 500 \text{ kHz}$. Na základě provedení několika testů bylo pro výrobu navržených povrchových struktur použito překrytí pulzů ve směru posuvu laserového paprsku v rozsahu od 77 % až do 90 % a počet opakování přejezdu laserovým svazkem od 250 až do 500.

Povrchová struktura – kvádr var. 1

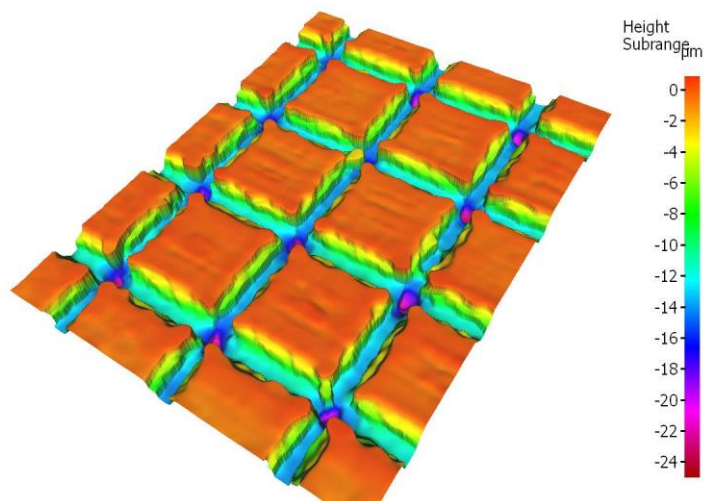
Tato povrchová struktura byla charakterizována hloubkou drážek $b = 5 \mu\text{m}$ a šířkou drážek $c = 20 \mu\text{m}$.



Obrázek 31: Povrchová struktura – kvádr var. 1 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus

Povrchová struktura – kvádr var. 2

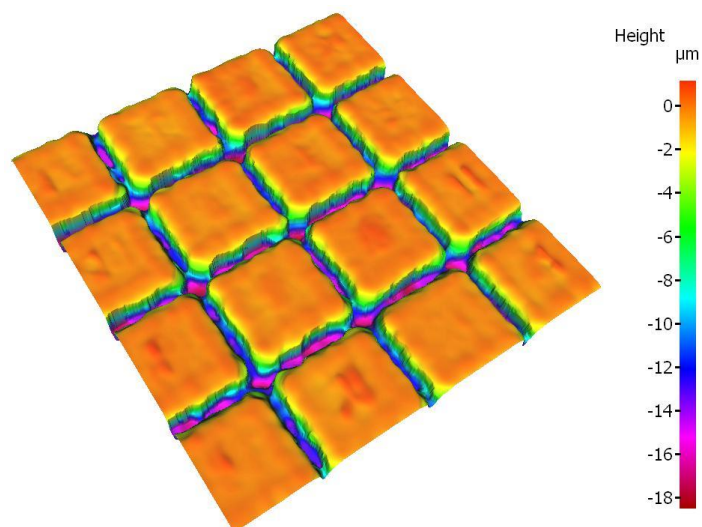
Tato povrchová struktura byla charakterizována hloubkou drážek $b = 10 \mu\text{m}$ a šířkou drážek $c = 20 \mu\text{m}$.



Obrázek 32: Povrchová struktura – kvádr var. 2 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus

Povrchová struktura – kvádr var. 3

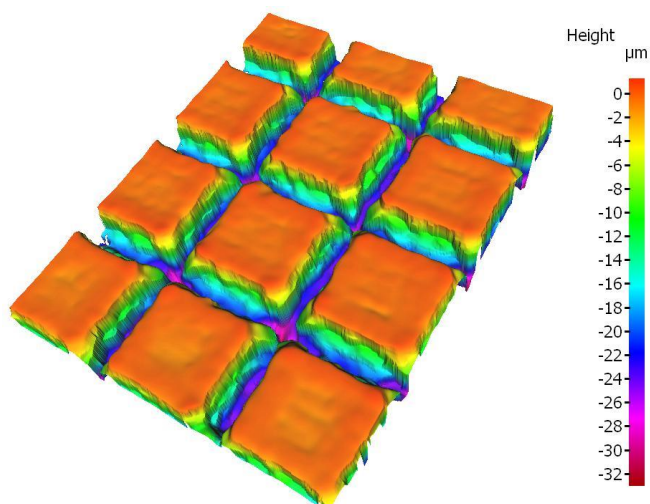
Tato povrchová struktura byla charakterizována hloubkou drážek $b = 10 \mu\text{m}$ a šířkou drážek $c = 10 \mu\text{m}$.



Obrázek 33: Povrchová struktura – kvádr var. 3 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus

Povrchová struktura – kvádr var. 4

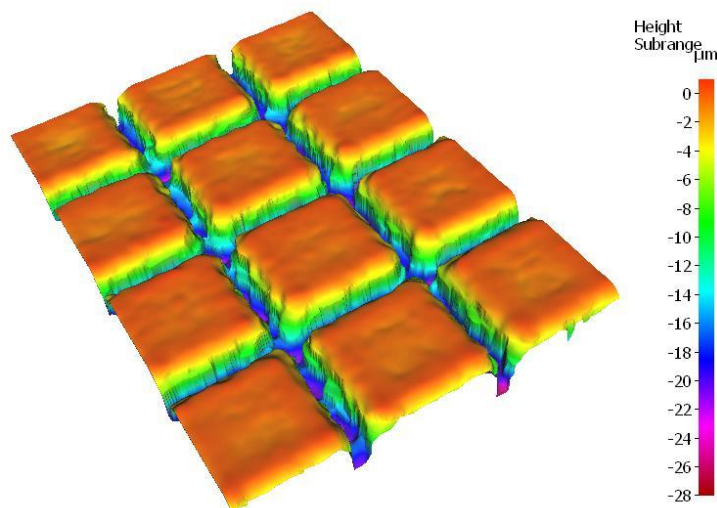
Tato povrchová struktura byla charakterizována hloubkou drážek $b = 20 \mu\text{m}$ a šířkou drážek $c = 20 \mu\text{m}$.



Obrázek 34: Povrchová struktura – kvádr var. 4 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus

Povrchová struktura – kvádr var. 5

Tato povrchová struktura byla charakterizována hloubkou drážek $b = 20 \mu\text{m}$ a šířkou drážek $c = 13 \mu\text{m}$.



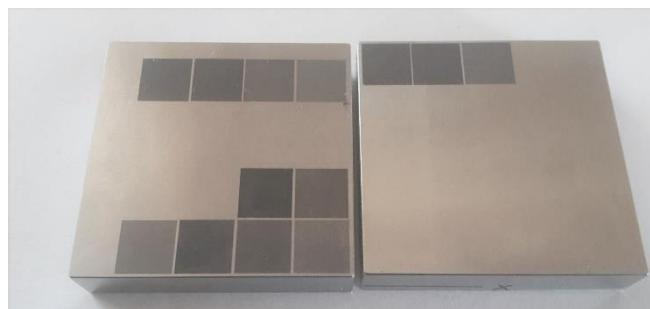
Obrázek 35: *Povrchová struktura – kvádr var. 5 nasnímaná pomocí zařízení Alicona InfiniteFocus*

3.4.3 Shrnutí vyrobených povrchových struktur

Ve spolupráci s firmou HOFMEISTER s.r.o. byly vyrobeny dvě ze čtyř typů navržených povrchových struktur. Jedná se o povrchové struktury – díry a o povrchové struktury – kvádry. Zbylé struktury nebyly vyrobeny s ohledem na provozní závadu výrobního zařízení.

Výroba povrchových struktur – díry nebyla příliš technicky náročná, jednotlivé pracovní parametry laserového zařízení pro výrobu děr bylo možné odvodit ze znalosti velikosti ablačního prahu obráběného materiálu, využitím základních matematických vzorů a vyrobením několika testovacích kusů. Největším problémem při výrobě povrchových struktur – díry byla skutečnost, že výrobní čas jednotlivých povrchových struktur byl značně dlouhý, a proto byla časově náročná i celková výroba povrchových struktur – díry.

Výroba povrchových struktur – kvádry byla náročnější než výroba povrchových struktur – díry. Při výrobě drážek s menší hloubkou bylo obtížné dosáhnout přesné hodnoty šířky drážek. Pracovní parametry laserového stroje musely být stanoveny tak, aby se vytvořily drážky kvádrů, které by byly v horizontálním i vertikálním směru shodné. Jednotlivé pracovní parametry byly rovněž stanoveny na základě zjištění ablačního prahu materiálu a vyrobením několika testovacích vzorků. Výrobní čas jednotlivých povrchových struktur – kvádry byl značně nižší než u výroby povrchových struktur – díry.



Obrázek 36: *Fotografie vyrobených povrchových struktur*

3.5 Vyhodnocení smáčivosti povrchu

Vyhodnocení vyrobených povrchových struktur proběhlo ve spolupráci s Katedrou fyziky Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni. Vyhodnocení bylo provedeno ve formě měření kontaktního úhlu kapky za využití metody staticky přichycené kapky. Pro měření byl použit přístroj Drop Shape Analyzer – DSA30E, jehož popis je uveden v příloze 1.

Samotný test byl proveden pro každou vyrobenou povrchovou strukturu. Na základě rešeršní studie [19] byly pro testování úhlu smáčivosti zvoleny kapky vody o objemu 3,5 μl . Úhly smáčivosti se byly měřeny dvakrát pro každý vzorec. Poprvé těsně po dopadu na vytvořenou povrchovou strukturu a podruhé 10 sekund po dopadu na vytvořenou povrchovou strukturu. Měření proběhlo přibližně dva týdny pro vyrobení povrchových struktur pomocí laserového zařízení.

3.5.1 Laserem neupravený, pouze broušený povrch – etalon

Nejdříve byl změřen úhel smáčivosti broušeného povrchu vzorku z austenitické chromniklové oceli stabilizované titanem X6CrNiTi18-10 (17 247) s drsností povrchu $R_a = 0,4 \mu\text{m}$.

Z obrázku 37 (vpravo) je patrné, že neupravený povrch zvoleného materiálu vykazoval hydrofobní vlastnosti, jelikož úhel smáčivosti ihned po dopadu kapky na povrch byl $\Omega_1 = 95,40^\circ$. Z porovnání kapek na obrázku 37 vyplývá, že úhel smáčivosti neupraveného povrchu se v čase zásadně neměnil, protože průměrný úhel smáčivosti naměřený 10 sekund po dopadu na povrch byl $\Omega_2 = 89,80^\circ$.



Obrázek 37: Úhel smáčivosti referenčního vzorku 10 sekund po dopadu kapky na povrch (vlevo) a těsně po dopadu kapky na povrch (vpravo)

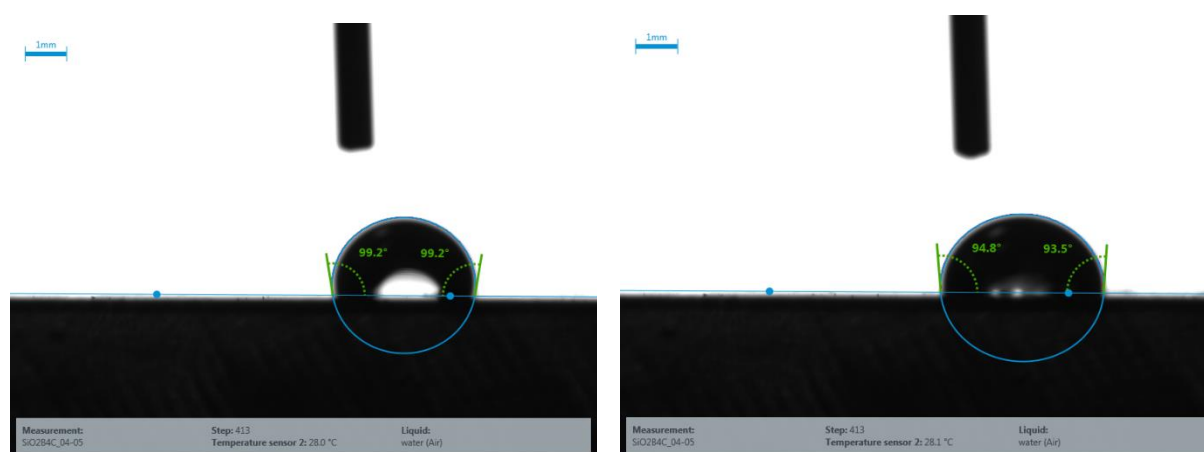
3.5.2 Povrchové struktury – díry

Úhel smáčivosti vyrobených povrchových struktur – díry byl vyhodnocován obdobně jako úhel smáčivosti etalonového povrchu. Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů smáčivosti pro každou vyrobenou povrchovou strukturu děr jsou uvedené v tabulce 8, kde parametr a je hloubka děr, parametr b je vzdálenost jednotlivých děr měřena od kraje ke kraji díry, parametr r je poloměr děr, parametr Ω_1 je průměrný úhel smáčivosti hned po dopadu kapky na povrch a parametr Ω_2 je průměrný úhel smáčivosti 10 sekund po dopadu kapky na povrch.

	a [μm]	b [μm]	r [μm]	Ω_1 [°]	Ω_2 [°]
1	12	20	10	95,10	91,10
2	9	10	10	94,35	86,65
3	12	20	15	84,55	85,15
4	12	10	15	91,40	92,50
5	12	5	15	99,20	94,15

Tabulka 8: Úhly smáčivosti u povrchových struktur – díry

Z tabulky 8 je možné vyvodit, že úhel smáčivosti lze u povrchových struktur – díry považovat za konstantní v čase. Při srovnání etalonového povrchu a povrchu se strukturami – díry lze tvrdit, že etalonový povrch je náchylný k větší proměnlivosti úhlu smáčivosti v čase. Dále je možné tvrdit, že při zmenšení vzdálenosti mezi jednotlivými okraji děr se úhel smáčivosti zvyšoval tzn. povrch vykazoval více hydrofobní vlastnosti. Zvětšováním nebo zmenšováním průměru děr nedocházelo k velkému ovlivňování smáčivosti daného povrchu. Největší hydrofobicitu ze struktur – díry vykazovala struktura s poloměrem díry $r = 15 \mu\text{m}$, vzdáleností mezi jednotlivými kraji děr $b = 5 \mu\text{m}$, u které byl naměřen úhel smáčivosti $\Omega_1 = 99,20^\circ$ a $\Omega_2 = 94,15^\circ$ (viz obrázek 38). Z toho vyplývá, že vytvořením této povrchové struktury byly vlastnosti povrchu posunuty ve prospěch hydrofobního chování. Nejmenší hydrofobicitu ze struktur – díry vykazovala struktura s poloměrem díry $r = 15 \mu\text{m}$, vzdáleností mezi jednotlivými kraji děr $b = 20 \mu\text{m}$, u které byl naměřen úhel smáčivosti $\Omega_1 = 84,55^\circ$ a $\Omega_2 = 85,15^\circ$. Vytvořením této konkrétní povrchové struktury se dosáhlo zvýšení hydrofilního chování ve srovnání s neupraveným povrchem.



Obrázek 38: Úhel smáčivosti vzorku se strukturami – díry (var. 5) 10 sekund po dopadu kapky na povrch (vpravo) a těsně po dopadu kapky na povrch (vlevo)

3.5.3 Povrchové struktury – kvádry

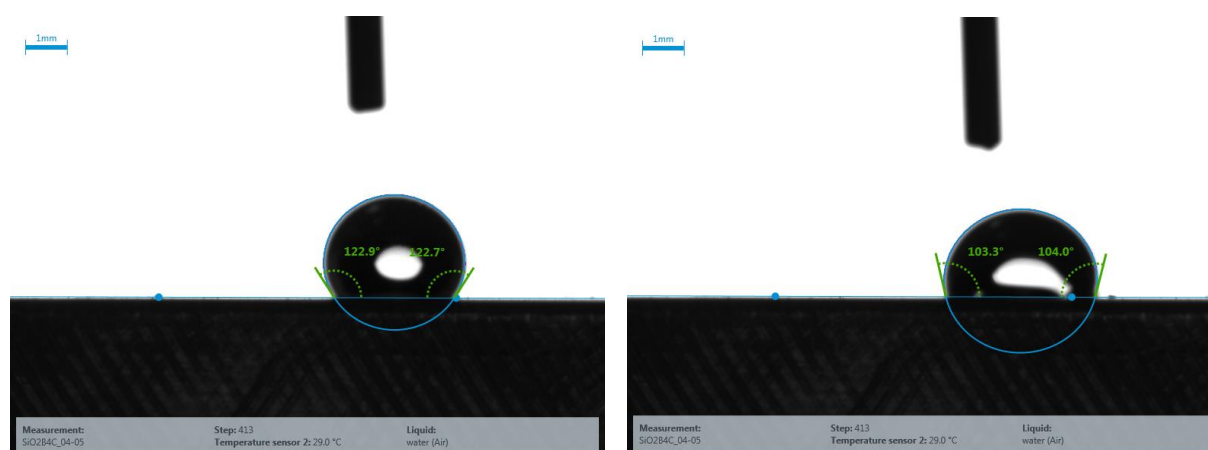
Úhel smáčivosti vyrobených povrchových struktur – kvádry byl vyhodnocován obdobně jako úhel smáčivosti etalonového povrchu. Naměřené hodnoty jednotlivých úhlů smáčivosti pro každou vyrobenou povrchovou strukturu – kvádry jsou uvedené v tabulce 9, kde parametr a je

délka strany podstavy kvádru, parametr b je výška jednotlivých kvádrů a parametr c je vzdálenost mezi jednotlivými kvádry, parametr Ω_1 je průměrný úhel smáčivosti hned po dopadu kapky na povrch a parametr Ω_2 je průměrný úhel smáčivosti 10 sekund po dopadu kapky na povrch.

	a [μm]	b [μm]	c [μm]	Ω_1 [°]	Ω_2 [°]
1	50	5	20	86,55	75,15
2	50	10	20	122,80	103,65
3	50	10	10	73,00	53,35
4	50	20	19	100,95	78,40
5	50	20	13	120,80	57,00

Tabulka 9: Úhly smáčivosti u povrchových struktur kvádrů

Po vytvoření povrchových struktur – kvádry úhel smáčivosti tohoto povrchu vykazoval větší změnu v čase (viz tabulka 9) ve srovnání s etalonovým povrchem. Rovněž je možné tvrdit, že vytvořením povrchových struktur – kvádry se úhel smáčivosti zvýšil a povrch se stal více hydrofobní. Největší hydrofobicitu ze struktur – kvádry vykazovala struktura s výškou kvádrů $b = 10 \mu\text{m}$, se vzdáleností mezi jednotlivými kvádry $c = 20 \mu\text{m}$, u které byl naměřen úhel smáčivosti $\Omega_1 = 122,80^\circ$ a $\Omega_2 = 103,65^\circ$ (viz obrázek 39). Vytvořením této povrchové struktury se projevilo více hydrofobní chování povrchu ve srovnání s povrchem neupraveným. Jako nejméně hydrofobní se ze struktur – kvádry projevila struktura s výškou kvádrů $b = 10 \mu\text{m}$, vzdáleností mezi jednotlivými kvádry $c = 10 \mu\text{m}$, u které byl naměřen úhel smáčivosti $\Omega_1 = 73^\circ$ a $\Omega_2 = 53,35^\circ$.



Obrázek 39: Úhel smáčivosti vzorku povrchových struktur – kvádry (var. 2) 10 sekund po dopadu kapky na povrch (vpravo) a těsně po dopadu kapky na povrch (vlevo)

3.5.4 Shrnutí měření smáčivosti povrchových struktur

Z provedeného měření vyplývá, že povrchové struktury – kvádry významně ovlivňují smáčivost daného povrchu, toto však nelze tvrdit o vytvořených strukturách – díry. Vytvořené povrchové struktury – díry jsou sice méně hydrofobní než vytvořené povrchové struktury – kvádry, ale jejich kontaktní úhel smáčivosti není tak výrazně proměnný v čase (viz. tabulka 10).

Hodnoty úhlu smáčivosti mohly být ovlivněny chybou způsobenou manuálním měřením. Tyto chyby mohly vzniknout například nedokonalým odkápnutím kapky od jehly přístroje Drop Shape Analyzer nebo nepřesným odměřením času při měření změny kontaktního úhlu v čase. Pro získání přesnějších výsledků, které by nebyly ovlivněny lidským faktorem, by bylo vhodné použít metodu dynamicky přichycené kapky.

Je pravděpodobné, že úhly smáčivosti povrchových struktur během doby mezi vyrobením vzorků a jejich měřením nedosáhly konstantní hodnoty kvůli stále probíhajícím chemickým reakcím na povrchu vytvořených povrchových struktur. Proto by bylo vhodné pro správnější zhodnocení vlastností povrchů ovlivněných laserem provést další měření s větším časovým rozestupem.

Varianta struktury	Ω_1 [°]	Ω_2 [°]	Ω_1 v porovnání s etalonem [°]	Ω_2 v porovnání s etalonem [°]
Díry				
1	95,10	91,10	-0,30	1,30
2	94,35	86,65	-1,05	-3,15
3	84,55	85,15	-10,85	-4,65
4	91,40	92,50	-4,00	2,70
5	99,20	94,15	3,80	4,35
Kvádry				
1	86,55	75,15	-8,85	-14,65
2	122,80	103,65	27,40	13,85
3	73,00	53,35	-22,40	-36,45
4	100,95	78,40	5,55	-11,40
5	120,80	57,00	25,40	-32,80

Tabulka 10: Úhly smáčivosti vytvořených povrchových struktur v porovnání s etanolem (zvýrazněné hodnoty značí povrchy u kterých se zvýšila hydrofobicita v porovnání s etanolem)

4 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout, vyrobit a otestovat povrchové struktury, které by ovlivnily smáčivost povrchu.

Nejsložitějším úkolem této práce bylo vyrobit navržené struktury pomocí dostupného laserového zařízení. A to z důvodu, že pro výrobu každé navržené povrchové struktury musely být použity jiné laserové parametry, které byly hledány na základě výroby desítek testovacích vzorků, u kterých se hledaly určité závislosti mezi jednotlivými laserovými parametry.

Analýza rozměrů vyrobených povrchových struktur potvrdila, že s použitým laserovým zařízením je možné vyrobit na povrchu vzorku ze zvoleného materiálu – ocel 17 247 dva typy navržených povrchových struktur a jejich výrobu opakovat. Výroba a testování zbylých navržených povrchových struktur je plánovaná v průběhu příštího akademického roku.

Testy měření statického kontaktního úhlu kapaliny (úhlu smáčivosti) prokázaly, že vyrobením povrchových struktur dochází ke změně kontaktního úhlu vůči povrchu etalonu, což indukuje změnu smáčivosti. Největší úhel smáčivosti ze všech vyrobených povrchových struktur vykazovala povrchová struktura – kvádry. Nárůst úhlu smáčivosti povrchu opatřeného touto strukturou vůči etalonovému broušenému povrchu je 27,40 °.

Pro stanovení konkrétních faktorů, kvůli kterým dochází ke změně smáčivosti povrchu, by bylo potřeba vyrobit a otestovat ještě větší množství vzorků. Vyrobené vzorky by poté mohly být testovány za použití jiné metody měření kontaktního úhlu kapaliny (např. metody dynamicky přichycené kapky), nebo za použití jiné měřicí kapaliny (např. destilované vody).

Dosažené výsledky lze aplikovat zejména při výrobě nových funkčních povrchů. Výroba těchto povrchů se může řídit podle použitého výrobního postupu, který byl otestován a lze jej považovat za předvídatelný a spolehlivý. Pracovní postup uvedený v této práci lze aplikovat pouze v případě použití materiálu (oceli 17 247) a broušeného výchozího povrchu s $R_a = 0,4 \mu\text{m}$, jelikož je úzce spojený s chemickým složením materiálu a pravděpodobně i následnými chemickými interakcemi na povrchu po výrobě. Co se týče samotných vyrobených povrchových struktur, tak jejich současná aplikovatelnost je omezena proměnlivostí kontaktního úhlu smáčivosti v čase.

S ohledem na velké množství neprobádaných faktorů vyskytnuvších se na vyrobených povrchu, by bylo přinejmenším zajímavé v dalších pracích na zmíněnou problematiku navázat a dále prohloubit příslušné poznání.

5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A DALŠÍ ZDROJE

- [1] WÄCHTER, S., CONRAD, D., et al. *Structuring of injection molding tools with ultrashort laser pulses for surface functionalization after casting*, 2015
- [2] Kdo je firma Hofmeister. *HOFMEISTER* [online]. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://www.hofmeister.cz/onas/kdo-jsme>
- [3] Inovace. *HOFMEISTER* [online]. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://www.hofmeister.cz/inovace>
- [4] KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH, D. *Úvod do studia materiálů*. 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [5] LIN, C. Y., CHENG, C. W., OU, K. L. *Micro/nano-structuring of medical stainless steel using femtosecond laser pulses*, Physics Procedia 2012.
- [6] KUBÍNEK, R., STRÁNSKÁ, V. *Úvod do problematiky nanotechnologií*.
- [7] Studijní materiály. *Katedra strojírenské technologie* [online]. [cit. 2018-02-5]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf
- [8] SCARAGGI, M., MEZZAPESA, F. P., CARBONE, G., ANCONA, A., LUGARÀ, P. M. *Minimize friction of lubricated laser-microtextured-surface by tuning microholes depth*. 2014
- [9] Nové technologie výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni. [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://tpt.zcu.cz/cz/laboratore/opticke-vlastnosti/opticke-vlastnosti>
- [10] KLING, R. *Nanotexturation inspired by Nature*. 2014.
- [11] *LASER4FUN: NEWSLETTER*. 2017, (No°2).
- [12] WU, B., ZHOU, M., LI, J., YE, X., LI, G., CAI, L. Superhydrophobic surfaces fabricated by microstructuring of stainless steel using a femtosecond laser. *Applied Surface Science*,
- [13] BARTÁKOVÁ, H., KLUSOŇ, P. *Stanovení povrchové smáčivosti tenkých vrstev a odbourávání povrchově vázaných nečistot*.
- [14] *Laser-textured masters for high throughput replication of hydrophobic surfaces: 5 th UK Industrial Laser Applications Symposium – Ultra-Short Pulse Grantham, United Kingdom, 22-23 March 2017*. Edited by Romano, J.
- [15] HOMOLA, V. *Kontaktní úhel jako kvantifikátor smáčitelnosti materiálu*.
- [16] JAROŠOVÁ, M., SULOVSÝ, P., MILDE, D. Chemické Listy. 110th ed. 2016. *Současný stav a perspektivy spojení laserové ablace s hmotnostní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem v geochemii*, p. 769–778
- [17] VOISIAT, B. *Formation of frequency selective surfaces using laser ablation methods and characterisation of their properties*. Vilnius, 2015. Doctoral dissertation. Vilnius University. Vedoucí práce Dr. Gediminas Račiukaitis.
- [18] Daily Archives: July 30, 2015: How lotus leaf make water droplets dance on its surface. *Ninithi* [online]. July 30, 2015 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <https://ninithi.wordpress.com/2015/07/30/how-lotus-leaf-make-water-droplet-dance-on-its-surface/>

[19] MARTÍNEZ-CALDERON, M., A RODRÍGUEZ, A DIAZ, M GÓMEZ-ARANZADI a S.M. OLAIZOLA. *Femtosecond laser manufacturing of highly hydrophobic hierachical structures fabricated by combining surface microstructures and LIPSS.*

[20] SIEGEL, F., KLUG, U., KLING, R. *Extensive Micro-Structuring of Metals using Picosecond Pulses – Ablation Behavior and Industrial Relevance.*

[21] Materiálové listy oceli 17 247 dle ČSN

[22] Products: InfiniteFocus. *Alicona – That's metrology!* [online]. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://www.alicon.com/products/infinitefocus/>

[23] About us. *Alicona – That's metrology!* [online]. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://www.alicon.com/about-us/>

[24] Company: About KRÜSS. *KRÜSS Advancig your Surface Science* [online]. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/company/about-kruess/>

[25] Products: Contact Angle. *KRÜSS Advancig your Surface Science* [online]. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/products/contact-angle/dsa30/drop-shape-analyzer-dsa30e/>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Použité měřicí zařízení

PŘÍLOHA č. 1

Použité měřicí zařízení

Měřicí přístroj Alicona InfiniteFocus

Firma Alicona se zabývá vývojem, výrobou a prodejem přístrojů pro optické měření drsnosti a 3D měření povrchu. Přístroj InfiniteFocus obsahuje 3D měřicí přístroj v řádech mikrometrů a přístroj pro měření drsnosti. Pro měření lze použít objektivy se zvětšením 5,10, 20 a 50. Dále je přístroj vybavený LED kruhový světlem, které slouží k snazší orientaci na zkoumaném vzorku [22, 23].



Obrázek: Měřicí přístroj Alicona InfiniteFocus [22]

Měřicí přístroj KRÜSS Drop Shape Analyzer – DSA30E

Firma KRÜSS se zabývá výrobou prvotřídních měřících přístrojů povrchu, povrchového napětí a poskytováním odborné pomoci pro používání těchto přístrojů s těmito přístroji. Především se specializují na pozorování reakcí povrchu s kapalinou [24].

Drop Shape Analyzer – DSA30E je přístroj sloužící k měření kontaktního úhlu kapky na povrchu, k měření volné povrchové energie pevných látek a povrchového napětí kapalin [25].



Obrázek: Měřicí přístroj Drop Shape Analyzer – DSA30E [25]

