

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Optimalizace parametrů laseru pro značení SK a Cermetu

Autor: Martin Mrázek

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.

Akademický rok 2016/2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin MRÁZEK**

Osobní číslo: **S16B0318P**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**

Název tématu: **Optimalizace parametrů laseru pro značení SK a Cermetu**

Zadávací 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. Navrh, realizace a zhodnocení experimentu
4. Závěr

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- **Staněk, Jiří, Metodika zpracování a úprava diplomových(bakalářských) prací, Západočeská univerzita, 2005, ISBN 80-7043-363-9**
- **Schaffer, Ronald D., Fundamentals of laser micromachining, CRC Press/Taylor & Francis, 2012, ISBN 978-1-4398-6055-7**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**

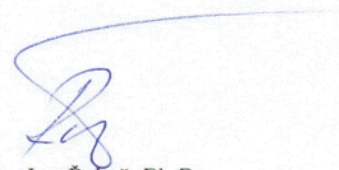
Katedra technologie obrábění

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2017**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 19. října 2016

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

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Mrázek	Jméno Martin	
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Strojírenská technologie-technologie obrábění“		
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtně- te
NÁZEV PRÁCE	Optimalizace parametrů laseru pro značení SK a Cermetu		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	52	TEXTOVÁ ČÁST	33	GRAFICKÁ ČÁST	
---------------	----	---------------------	----	----------------------	--

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Práce se zabývá ovlivněním povrchu při použití laserového popisu. Rešeršní část popisuje teorii laserového popisování a teorii měření drsnosti povrchu. V experimentální části jsou provedena tři měření, snaha prvního z nich byla nalézt parametry výkonu, rychlosti a frekvence popisu, které by povrch mohli ovlivňovat co možná nejméně. Cílem druhého bylo tyto parametry ověřit. Ve třetím experimentu byl zkoumán vliv strategie popisu a délky prvního pulsu. Získané závislosti mohou přispět pro správnou volbu parametrů značení.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Laser, drsnost povrchu, práh ablace, vláknový laser</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Mrázek	Name Martin	
FIELD OF STUDY	B2301“Manufacturing Proces – Technology of Metal Cutting”		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Laser parameters optimalization for marking cemented carbide and cermet		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Technology of machining	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	-------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	52	TEXT PART	33	GRAPHICAL PART	
----------------	----	------------------	----	-----------------------	--

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The work deals with the change of surface quality using a laser marking. The review part describes the theory of the laser marking and the theory of surface roughness measurement. In the experimental part were made three measurements. The effort was to find the parameters (power, speed, frequency) that change the surface at least. In the second experiment was measured the surface roughness. The obtained dependence can contribute to the right choice of parameters of the marking.
KEY WORDS	Laser, surface quality, ablation treshold

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D., zaměstnancům Regionálního technologického institutu a Katedry technologií obrábění za ochotu, trpělivost a čas, který mi věnovali, za odborné rady a umožnění provedení experimentu. Tímto výrazně přispěli k vypracování této bakalářské práce.

Obsah

1	ÚVOD	8
2	LASEROVÉ ZNAČENÍ	8
2.1	LASER	8
2.1.1	<i>Princip laseru</i>	8
2.1.2	<i>Pracovní režimy laserů</i>	9
2.2	LASEROVÉ ZDROJE PRO POPISOVÁNÍ	9
2.2.1	<i>Pevnolátkové lasery</i>	9
2.2.2	<i>Plynové lasery</i>	10
2.2.3	<i>Vláknový laser</i>	10
2.2.4	<i>Vhodnost použití jednotlivých laserů</i>	11
2.3	PRÁH ABLACE	12
2.4	METODY LASEROVÉ ZNAČENÍ	14
2.4.1	<i>Gravírování</i>	14
2.4.2	<i>Žhání</i>	14
3	DRSNOST POVRCHU	15
3.1	METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI	16
3.1.1	<i>Dotykový profilometr</i>	16
3.1.2	<i>Konfokální řádkovací mikroskop</i>	17
3.2	ZÁSADY, PRAVIDLA A POSTUPY PRO KONTROLU DOTYKOVÝMI PŘÍSTROJI	17
3.2.1	<i>Povrchy s neperiodickým povrchem</i>	18
3.2.2	<i>Povrch s periodickým povrchem</i>	19
4	NÁVRH EXPERIMENTU A METODY VYHODNOCENÍ	20
4.1	STANOVENÉ CÍLE	20
4.2	HYPOTÉZY	20
4.3	EXPERIMENT	20
4.3.1	<i>1. Experiment</i>	20
4.3.2	<i>2. Experiment</i>	21
4.3.3	<i>3. Experiment</i>	22
4.4	EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ LZS – 150165	22
4.5	EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL	25
4.6	VYHODNOCENÍ KVALITY POVRCHU	26
4.6.1	<i>První experiment</i>	26
4.6.2	<i>Druhý experiment</i>	28
4.6.3	<i>Třetí experiment</i>	29
5	ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT	30
5.1	PRVNÍ EXPERIMENT	30
5.2	DRUHÝ EXPERIMENT	34
5.3	TŘETÍ EXPERIMENT	36
6	DISKUZE NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ	39
7	ZÁVĚR	40
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	41
	SEZNAM PŘÍLOH	43

1 Úvod

Popisování předmětů laserem je dnes velmi moderní technologií. Jedná se o bezkontaktní metodu, kdy při interakci laserového paprsku se značeným materiálem dochází ke změně povrchové vrstvy hmoty a k vizuální změně. Pomocí laseru lze značit téměř jakýkoliv materiál s výjimkou materiálů s vysokou propustností a odrazivostí laserového záření. Mezi hlavní výhody patří: rychlost, flexibilita, vysoká přesnost, nulové náklady za spotřební materiál atd. Díky těmto vlastnostem a nenáročné implementaci do výrobních linek se laserové značení čím dál tím více uplatňuje v technické praxi. Jelikož se v některých případech nelze vyhnout nutnosti provést vlastní popis na funkční plochy výrobku, jako je na příklad upínací stopka rezných nástrojů, bere si práce za cíl zhodnotit ovlivnění těchto ploch v důsledku laserového označení. A to zejména povrchu součástí vyrobených práškovou metalurgií. První část práce tvoří teoretický úvod, kde jsou popsány laserové zdroje vhodné pro popisování, parametry laserových zdrojů, metody laserového značení. Dále jsou zde stručně uvedeny metody měření drsnosti povrchu a metodika vlastního měření. V experimentální části se nachází popis vzorků, experimentálního zařízení, a zařízení, na kterém bylo vyhodnocováno ovlivnění povrchu a návrh vlastního experimentu. V závěru práce jsou zhodnoceny naměřené výsledky.

2 Laserové značení

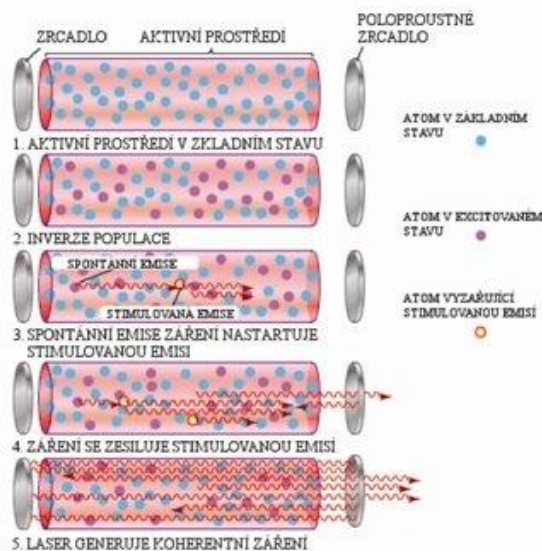
2.1 Laser

Laser (zkratka z anglického Light amplification by stimulated emission of radiation, v překladu: „zesílení světla stimulovanou emisí záření“) je zdroj elektromagnetického záření (tj. světla). Významnými vlastnostmi tohoto záření jsou jeho koherentnost (uspořádanost), monochromaticita (vyzařované fotony mají stejnou vlnovou délku), a kolimovanost (nerozbíhavost). Díky těmto vlastnostem lze laserový paprsek zaostřit do velmi malého bodu, kde se dosáhne vysoké hustoty energie, která je potřebná k popisování daného předmětu.

2.1.1 Princip laseru

Laser jako zařízení se skládá ze tří základních částí: aktivní prostředí (plyn, kapalina, pevná látka), zdroj energie (například výbojka), optický rezonátor (soustava zrcadel).

Obecně můžeme říci, že aktivní prostředí vždy obsahuje „element“, který se může nacházet v základním stavu s nižší energií nebo v excitovaném (vybuzeném) stavu s vyšší energií. Tímto elementem je nejčastěji atom, ale není tomu tak vždy (může to být např. vibrační stav molekuly, chemická vazba apod.). Pro tuto chvíli je důležité, že při přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu tento element vyzáří foton (kvantum elektromagnetického záření). Tento zářivý přechod se děje spontánně sám od sebe a prostředí má vždy snahu být ve stavu s co nejnižší energií – ve stavu termodyna-



Obr. 1 Princip laseru (1)

mické rovnováhy. Právě díky buzení tento stav porušíme a převedeme aktivní prostředí do excitovaného stavu, kdy je většina našich elementů ve stavu s vyšší energií (tento stav se nazývá inverze populace). Teprve v tuto chvíli můžeme energii dodanou aktivnímu prostředí přeměnit na laserový svazek (proud fotonů) pomocí procesu stimulované emise. Jedná se v podstatě o lavinovitý efekt, kdy nám foton dopadající na excitovaný atom způsobí (stimuluje) jeho přechod z horní na dolní energetickou hladinu a přitom dojde k emisi dalšího fotonu. Jak fotony putují rezonátorem od jednoho zrcadla k druhému, jejich počet rapidně narůstá a dochází k lavinovitému efektu a uvolnění energie v podobě proudu fotonů (svazek laseru) – viz Obr. 1. (1)

2.1.2 Pracovní režimy laserů

Laser dokáže pracovat v mnoha režimech, které vycházejí ze dvou základních.

Kontinuální režim

Režim, při němž je výstupní laserový svazek nepřerušovaně vyzařován a tedy i jeho výstupní výkon je stabilní. Tento režim je označován jako „CW“ (Continuous wave). U většiny laserů s vyšším výkonem lze výstupní výkon regulovat, u nízko výkonových plynových laserů, jako je například He-Ne, výkon při dlouhodobém užívání obvykle klesá. (2)

Pulzní režim

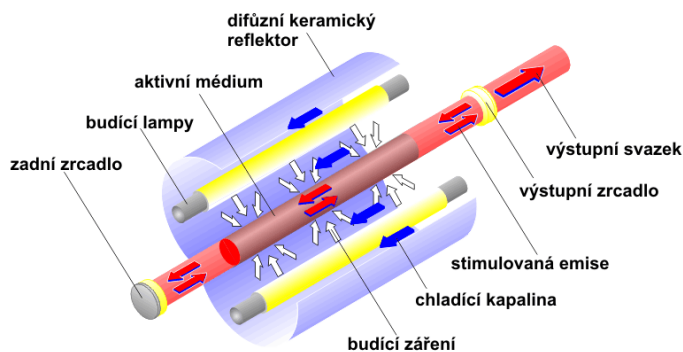
V pulzním režimu je energie paprsku akumulována po delší dobu, proto má paprsek při svém výstupu vyšší výkon. (3) Světelné pulsy vznikají prodlevou potřebou pro akumulování této energie. Délka jednotlivého pulsu značně ovlivňuje tepelně ovlivněnou oblast materiálu, na který laserový paprsek dopadá. Pro svařování se používá právě pulzního režimu pro dosažení hlubokého průvaru a malé tepelně ovlivněné oblasti.

2.2 Laserové zdroje pro popisování

V dnešní době existuje široká škála zdrojů laserového záření. Každý z těchto zdrojů je vhodný pro jiný typ operací. Zde jsou uvedeny pouze zdroje, které jsou dnes nejpoužívanější pro značení a to diodově buzené pevnolátkové lasery, plynové CO₂ lasery a lasery vláknové.

2.2.1 Pevnolátkové lasery

Pevnolátkovým laserem je laser, ve kterém je jako aktivní prostředí pevná opticky propustná látka. Mohou pracovat v pulzním (1 μ s - 1ps) i v kontinuálním režimu. Nejpoužívanějším typem je Nd:YAG, kde je jako aktivní materiál použit izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu s doprovodnými ionty neodymu. Barva tohoto monokrystalu je růžová až fialová. Jeho využití je hlavně pro vrtání, řezání, svařování, značení, lékařství, vojenství. Nd:YAG laser je zobrazen



Obr. 2 Nd:YAG laser (9)

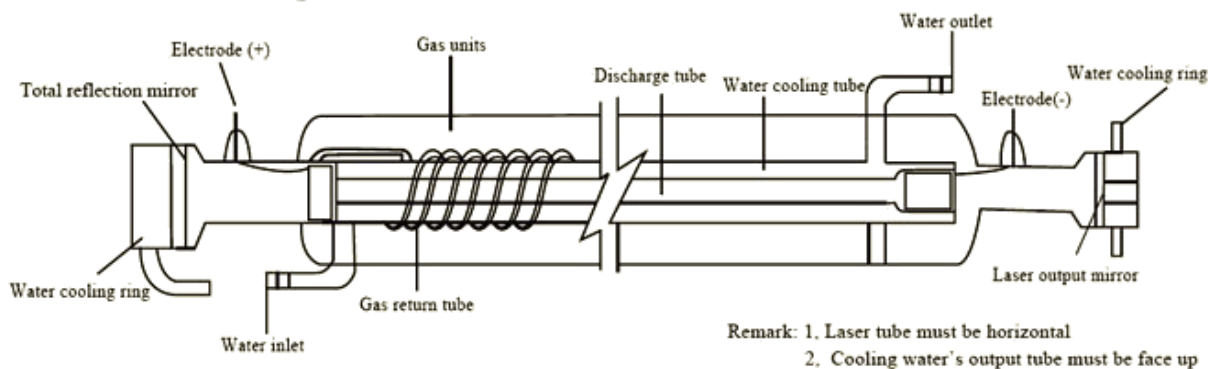
na Obr. 2. Pro buzení se používá xenonová výbojka, popřípadě polovodičové diody, v případě použití polovodičových diod lze dosáhnout účinnosti (15÷20%). Při použití výbojky je účinnost relativně nízká (2÷3%), z toho důvodu je nutné u vyšších výkonů používat vodní chlazení.

Při použití ke značení jsou dnes buzeny převážně polovodičovými diodami. Používají se pro značení kovů a plastů.

2.2.2 Plynové lasery

Plynový laser jako první umožňoval kontinuální režim a jako první umožnil přímou přeměnu elektrické energie na laserový paprsek. Pro světelné efekty se využívá laser argonový, který září zeleně a modře. Speciálním typem jsou lasery excimerové, které dokáží generovat ultrafialové záření. V průmyslu a medicíně je nejvíce používaný CO₂ laser. (4)

Laser tube diagram



Obr. 3 Schéma plynového laseru (5)

CO₂ laser používá jako aktivní prostředí směs oxidu uhličitého (CO₂), dusíku (N₂), vodíku (H₂) a helia (He). Toto aktivní prostředí je buzeno doutnavým výbojem, díky čemuž disponují CO₂ lasery dobrou účinností (obvykle 15÷25 %). (6) Generují infračervené záření o vlnové délce 10,6 mikrometru. Výkon tohoto typu se pohybuje v rozsahu několika mW po několik stovek kW. U vyšších výkonů je velmi důležité chlazení, které má za úkol odvést nevyužitou energii z aktivního plynu. Díky tomu jsou CO₂ lasery velké a nemobilní. Nevýhodou je nízká životnost do 10 000 hodin.

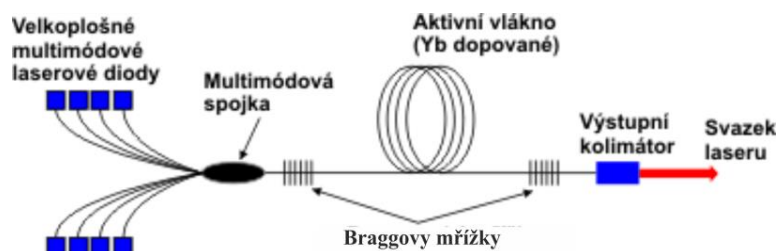
Používají se ke značení nekovových materiálů, jako jsou plasty, textilie, folie, kůže a skla.

2.2.3 Vláknový laser

První koncepce laseru tohoto druhu vznikla už v 60. letech 20. století, ale na svoje nasazení čekali do konce 90. let, kdy byly uvolněny velké finanční prostředky na vývoj komunikačních technologií. Ačkoli vláknové lasery nikdy nebyly ve velkém použity pro telekomunikační systémy, snížení jejich ceny a nenáročnost na údržbu vedla k jejich nasazení do průmyslového odvětví. Klíčové komponenty zde tvoří výkonné laserové diody, aktivní optické vlákno dopované (ytterbiem, erbiem, neodýmiem), multimódová spojka a výstupní kolimátor. Místo zrcadel jsou zde použity tzv. Braggovy mřížky, které slouží ke stabilizaci vlnové délky laserových diod. (7) Výkon laseru se pohybuje od několika wattů po několik kW. Pro mikroobrábění a

značení se používá výkon nižší než 200 W. Základní vlnová délka je $1\div 2\ \mu\text{m}$. Díky dlouhé životnosti (až 100 000 h) a vysoké účinnosti (30÷35 %) se tento typ laseru čím dál více rozšiřuje. (8)

Díky svým parametrům jsou vhodné pro značení kovů, plastů, keramiky, eloxovaných dílů apod.



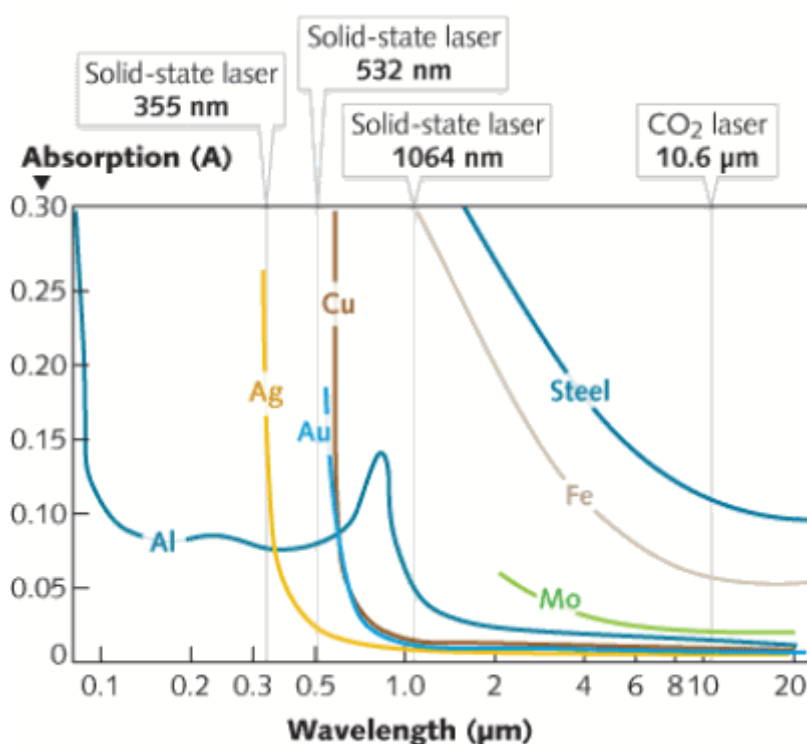
Obr. 4 Schéma vláknového laseru (9)

2.2.4 Vhodnost použití jednotlivých laserů

Použití jednotlivých laserů souvisí s jejich hlavními parametry. Vlnová délka definuje, jaké druhy materiálu je možno efektivně daným laser značit. Kvalita paprsku společně s vlnovou délkou ovlivňují nejmenší možný průměr, na který může být laserový svazek zaostřen. Opačkovácí frekvence určuje, jakou nejvyšší možnou rychlostí je možné značit.

Vlnová délka

Každý materiál je schopen absorbovat laserové záření o jiné vlnové délce. Plasty dokáží absorbovat vyšší vlnovou délku, proto pro jejich značení lze použít plynový CO₂ laser. Zatímco kovové materiály absorbují záření kratších vlnových délek je pro jejich značení nutné použít vláknový, nebo pevnolátkový laser.



Obr. 5 Absorpce laserového záření různých vlnových délek na různé druhy materiálů (18)

Kvalita paprsku

Kvalita paprsku označovaná hodnotou M^2 , kdy pro Gaussovské svazky (umožňují nejmenší velikost bodu vzhledem k vlnové délce) $M^2 = 1$. Z toho vyplývá, že všechny reálné zdroje mají $M^2 > 1$. Se zvyšující se kvalitou paprsku je možné jej zaostřit do bodu menšího poloměru, s tím souvisí vyšší hustota energie, to má za následek ostřejší kontury, vyšší rychlost značení. U plynového CO₂ laseru se kvalita paprsku pohybuje $M^2=1.1$, u vláknového $M^2= 1.7$, u Nd: YAG $M^2=1.2$.

Opakovací frekvence

Opakovací frekvence udává počet pulzů, které je laser schopen vyzářit za jednu sekundu. U jednotlivých laserů je možné opakovací frekvenci v určitém rozsahu nastavit. U plynového CO₂ laseru lze docílit opakovací frekvence 0 – 500 kHz, u vláknového 20 Hz – 1 MHz, u Nd: YAG 5 – 80 kHz. Opakovací frekvence má teoreticky přímý vliv na výslednou rychlost značení. Prakticky je nutné zohlednit rychlost polohovacího zařízení, nebo vychylovací hlavy, které je daný popisovací stroj schopen dosáhnout.

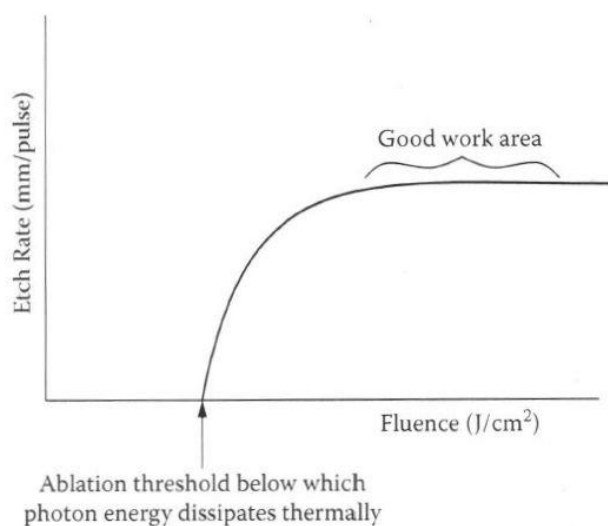
2.3 Práh ablace

Obr. 6 ukazuje závislost hloubky odebraného materiálu na hustotě dopadající energie (hustota energie v joulech na centimetr čtvereční). Křivka diagramu je typická pro všechny materiály a laserové kombinace, vytvoření grafu je velmi užitečné při práci s neznámými materiály. Při

velmi nízké hustotě energie není odebrán žádný materiál, to až do bodu, který je nazýván práh ablace. Pod touto hranicí fotony napadají materiál a materiál energii fotonu absorbuje, za předpokladu, že nedochází k odrazu, ale tato energie není použita k odstranění materiálu. Energie obsažená ve fotonu se předá do materiálu v podobě tepla, popřípadě se energie využije na přeměnu povrchové struktury.

Základní tvar křivky je podobný pro všechny lasery a materiály, ale práh ablace a limita křivky se mění v závislosti na absorpci. Například předpokládejme, že znázorněná křivka je pro materiál s absorpcí a_1 . Pokud jiný materiál má absorpci a_2 , která je menší než absorpce a_1 , tak práh ablace pro a_2 bude vyšší a limita křivky bude také vyšší.

Fotochemická změna barvy může probíhat v polymerech a keramice při nízké hustotě absorbované energie. V tomto případě UV záření změní povrchovou molekulární strukturu, to vede ke změně pohlcování světelného záření a v důsledku ke změně barvy. Jakmile je hustota energie dostatečná, a dojde k překonání ablačního bodu, hloubka odstranění materiálu vztažená na jeden puls stoupá, dokud se nedosáhne bodu, kde se míra ablace na puls blíží konstantě. V této části křivky je dobré pracovat, protože při zvyšování hustoty energie již nedochází ke zrychlení procesu. Pulsní lasery odebírají určité množství materiálu každý puls a tento proces je opakován stále dokola. (8)



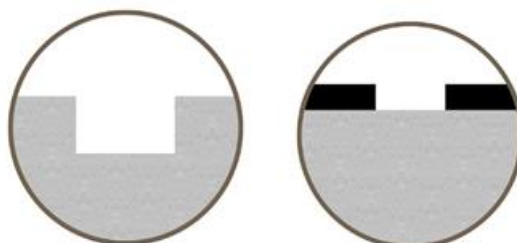
Obr. 6 Hloubka odebraného materiálu na jeden puls vs. hustota energie (8)

2.4 Metody laserové značení

Existuje více druhů metod značení laserovým paprskem, jelikož je práce zaměřena především na kovové materiály, jsou zde uvedeny pouze technologie vhodné právě pro ně.

2.4.1 Gravírování

Při gravírování dochází vlivem vysoké energetické hustoty (nad prahem ablace) k odpaření vrchní vrstvy obrobku. Tím vznikne prohlubeň, která je dobře rozlišitelná.



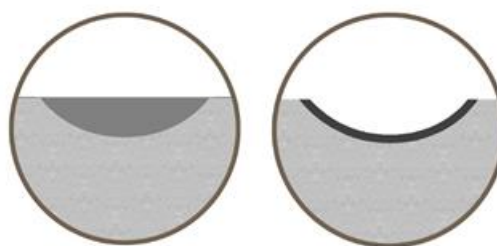
Obr. 7 Laserové gravírování (17)

Odboží gravírování je tzv. úběr, při kterém dojde k odstranění povrchové vrstvy, která má jinou barvu než základní materiál. Typické materiály vhodné pro úběr jsou eloxovaný hliník a lakované součásti.

2.4.2 Žihání

Při žihání nedochází k odebrání materiálu, pracuje se zde tedy pod bodem ablace, energie paprsku materiál lokálně zahřeje, čímž se v povrchu vytvoří oxidační vrstva. Vlastnosti oxidační vrstvy ovlivňují výslednou barevnost.

Kombinací gravírování a žihání lze získat popis, který vyniká svou stálostí a životností i v náročných podmínkách.



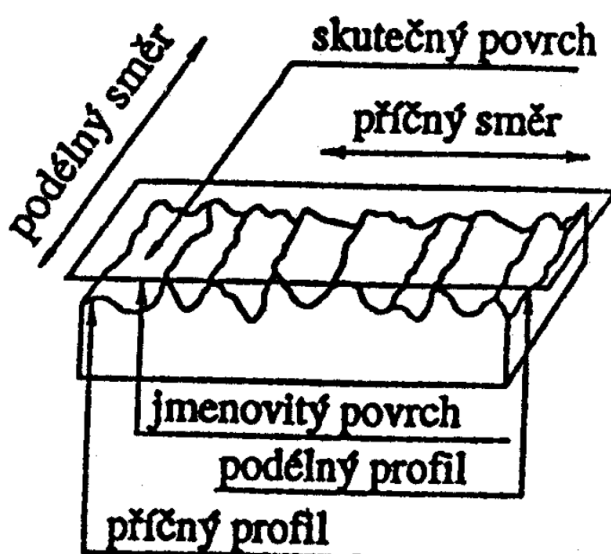
Obr. 8 Laserové žihání (17)

3 Drsnost povrchu

Jelikož povrch tělesa, výrobku není nikdy dokonale hladký, v převážné většině případů ideální povrch ani nechceme, nebo není potřeba, zavádí se pojem drsnost povrchu. Na reálném povrchu se nachází malé nerovnosti rozložené převážně po celé ploše. V některých případech se nerovnosti mohou lišit v závislosti na směru.

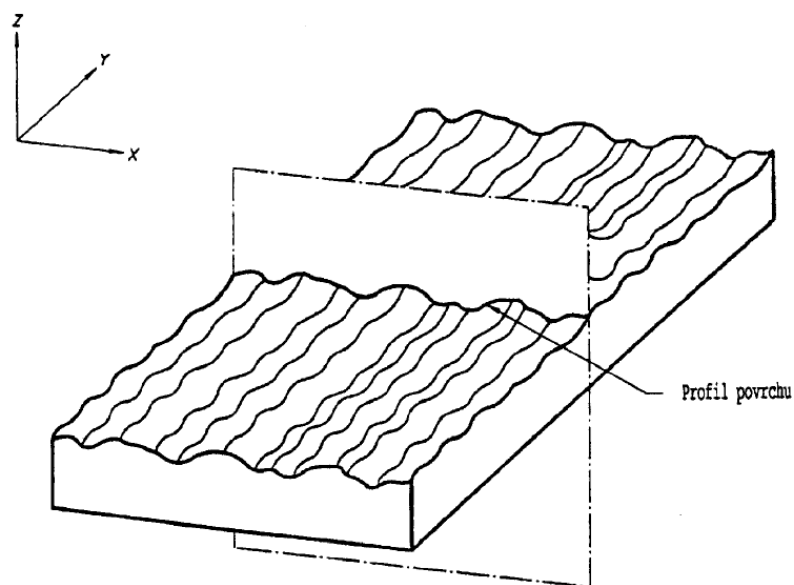
Drsnost povrchu se významně podílí na spolehlivosti a životnosti chodu součástí. Lze jí přímo ovlivnit například hlučnost, ztráty třením, odolnost vůči opotřebení apod. Z tohoto důvodu je dobré drsnost povrchu sledovat a naměřené parametry vyhodnocovat.

Drsnost povrchu zpravidla není stejná v podélném a příčném směru.



Obr. 9 Profil obrobeneho povrchu (10)

Parametry drsností se vyhodnocují na profilu povrchu, což je profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny (viz Obr. 10).

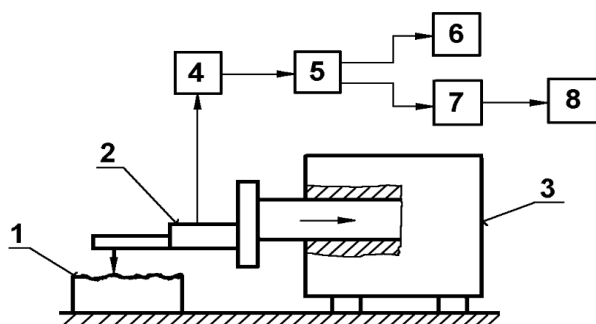


Obr. 10 Profil povrchu (11)

3.1 Metody měření drsnosti

Nejběžnější metodou pro získávání hodnoty drsnosti povrchu je metoda dotyková, kdy se povrchové nerovnosti zaznamenávají pomocí hrotu, který se mechanicky posouvá po zkoumaném povrchu. Jako další metodu lze zmínit metodu porovnáním, kdy se drsnost povrchu porovnává s etalony buď pouhým pohledem, nebo pomocí mikroskopu. K bezkontaktnímu způsobu měření lze využít například konfokální řádkovací mikroskop, kdy se nejdříve zkoumaný povrch naskenuje a následně se v softwaru vyhodnotí drsnost povrchu.

3.1.1 Dotykový profilometr



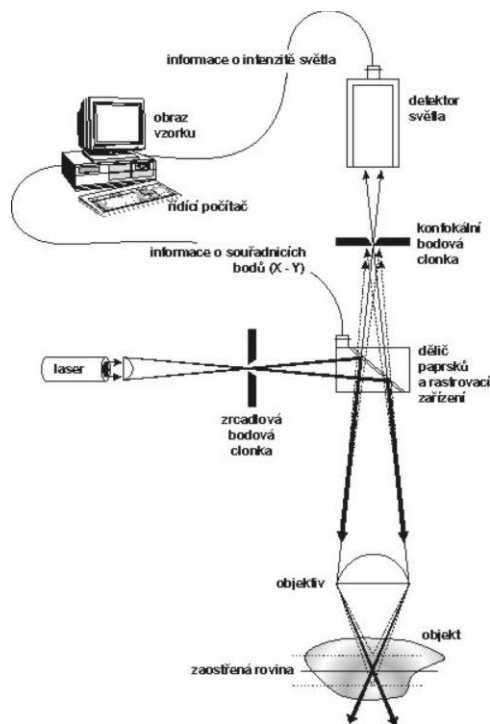
- 1 – měřená součást
- 2 – snímací hlavice s měřicím hrotem
- 3 – posuvový mechanismus
- 4 – zesilovač
- 5 – filtr
- 6 – registrační jednotka
- 7 – jednotka zpracovávající měřicí signál
- 8 – zobrazovací jednotka

Obr. 11 Schéma dotykového profilometru (12)

Dotykový profilometr je zařízení, kde se odchylky profilu přenáší pomocí snímací hlavice s měřicím hrotem do převodníku, kde se nepatrné pohyby převádějí na elektrický signál, který se po zesílení počítačově zpracovává a vyhodnocuje. Převodníky mohou pracovat na principu indukčním, piezoelektrickém, magnetoelektrickém (12). Snímací hrot je vyroben převážně z diamantu se zaoblením špičky 2 μm , 5 μm , 10 μm s vrcholovým úhlem 60° nebo 90°.

3.1.2 Konfokální řádkovací mikroskop

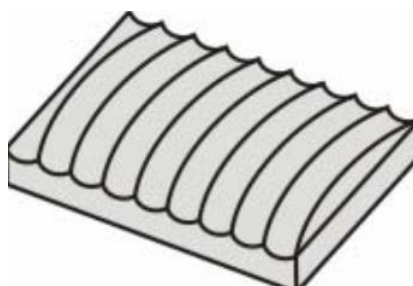
Konfokální řádkovací mikroskop nevytváří obraz zkoumaného povrchu najednou, ale obraz je tvořen bod po bodu. Pomocí rozmitání paprsku, příčným posuvem vzorku před objektivem popřípadě posuvem objektivu nad vzorkem vznikne optický řez v rovině xy . Pomocí přesného posuvu ohniska v ose z vzniknou další jednotlivé řezy, jejichž spojením vznikne výsledná 3d rekonstrukce. Pomocí počítačového softwaru lze na 3d rekonstrukci provádět množství měření. Hlavní výhodou bez kontaktního měření drsnosti povrchu je fakt, že zde není žádný snímací hrot, který díky svému zakulacenému konci nemůže kopírovat profil povrchu přesně.



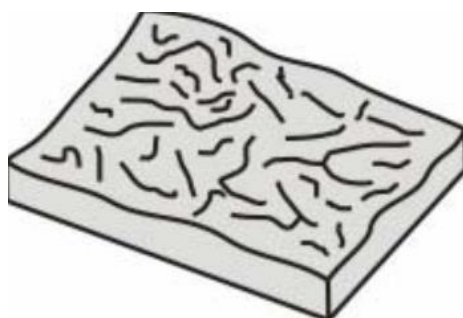
Obr. 12 Princip konfokálního mikroskopu (13)

3.2 Zásady, pravidla a postupy pro kontrolu dotykovými přístroji

Zásady, pravidla a postupy pro kontrolu drsnosti povrchu předepisují normy ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288. Zde jsou uvedeny pouze základní informace obsažené v těchto normách. Před měřením drsnosti povrchu je nejdříve nutné určit, zda se jedná o periodický (Obr. 13), nebo neperiodický povrch (Obr. 14). Pokud se jedná o periodický povrch, jsou na něm viditelné stopy nástroje po technologické operaci. V tomto případě je nutné provést měření kolmo na tyto stopy. V případě neperiodického povrchu je možné provést měření v jakémkoli směru.



Obr. 13 Periodický povrch (14)



Obr. 14 Neperiodický povrch (14)

3.2.1 Povrchy s neperiodickým povrchem

Nejprve se provede odhad drsnosti (R_a , R_z , R_{sm}). Podle odhadu se zvolí základní délka z tabulek (Tabulka 1, Tabulka 2,

Tabulka 3). Pomocí měření s nastavenými parametry základních délek se získá hodnota drsnosti pro zvolenou základní délku. Základní délka se porovná s rozsahem hodnot uvedeným v tabulkách. Pokud hodnota leží mimo rozsah, musí se měření opakovat s větší, nebo menší hodnotou základní délky. Pokud základní délka leží v rozsahu dle tabulek, lze výsledek považovat za správný.

Tabulka 1 Základní délky drsnosti pro měření R_a pro neperiodické povrchy (15)

R_a μm	Základní délka drsnosti l_r mm	Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n mm
$(0,006) < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Tabulka 2 Základní délky drsnosti pro měření Rz pro neperiodické povrchy (15)

$Rz^{1)} Rz1max.^{2)}$ μm	Základní délka drsnosti lr mm	Vyhodnocovaná délka drsnosti ln mm
$(0,025) < Rz, Rz1max \leq 0,1$	0,08	0,4
$0,1 < Rz, Rz1max \leq 0,5$	0,25	1,25
$0,5 < Rz, Rz1max \leq 10$	0,8	4
$10 < Rz, Rz1max \leq 50$	2,5	12,5
$50 < Rz, Rz1max \leq 200$	8	40

1) Rz je použito při měření Rz, Rv, Rp, Rc, a Rt
2) Rz1max. je použito jen při měření Rz1max., Rv1max., Rp1max. a Rc1max.

Tabulka 3 Základní délky drsnosti pro měření Rsm pro periodické a neperiodické povrchy (15)

RSm μmm	Základní délka drsnosti lr mm	Vyhodnocovaná délka drsnosti ln mm
$0,013 < RSm \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < RSm \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < RSm \leq 0,4$	0,8	4
$0,4 < RSm \leq 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < RSm \leq 4$	8	40

3.2.2 Povrch s periodickým povrchem

Provede se odhad parametru Rsm. Pro odhadnutý parametr se podle tabulky (

Tabulka 3) určí hodnota základní délky. Provede se měření s touto hodnotou základní délky. Pokud se naměřená hodnota Rsm neshoduje s rozsahem základních délek, základní délka se zvolí vyšší nebo nižší a měření se opakuje. Pokud základní délka leží v rozsahu dle tabulek, lze výsledek považovat za správný.

4 Návrh experimentu a metody vyhodnocení

4.1 Stanovené cíle

- Provést označení dvou různých materiálů několika různými parametry.
- Porovnat ovlivnění povrchu materiálů v závislosti na nastavených parametrech.

4.2 Hypotézy

- Předpokládá se, že s rostoucím výkonem se kvalita povrchu bude zhoršovat.
- Předpokládá se, že rychlost značení nebude mít na kvalitu povrchu vliv.

4.3 Experiment

4.3.1 1. Experiment

Při prvním experimentu byli jednotlivé vzorky označeny na válcovou plochu úsečkami o délce 10 mm a různých parametrech značení (Tabulka 4). Následovalo vyhodnocení jednotlivých úseček s ohledem na ovlivnění povrchu vzorku.

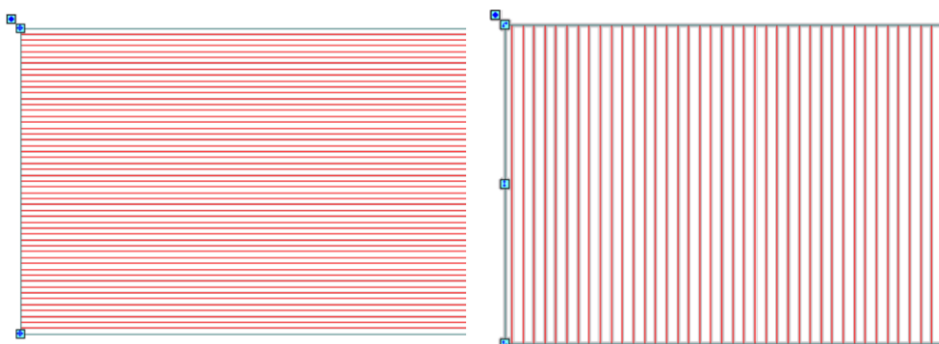
Tabulka 4 Parametry značení jednotlivých úseček

Výkon [%]	Popisovací rychlost [mm/s]	Frekvence [kHz]	Délka prvního pulsu [μ s]	Strategie popisu (Obr. 17)
30	500	50	100	1
60	500	50	100	1
90	500	50	100	1
30	1000	50	100	1
60	1000	50	100	1
90	1000	200	100	1
30	500	200	100	1
60	500	200	100	1
90	500	200	100	1

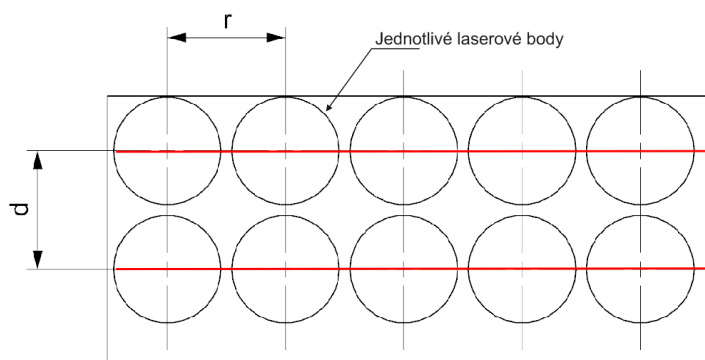
4.3.2 2. Experiment

Pro druhý experiment byly vybrány 2 nastavení, které povrch ovlivňují nejméně. Těmito parametry byla na vzorcích (na válcové části) popsána obdélníková plocha o rozměrech 1mm x 12 mm, na které bylo provedeno měření profilové drsnosti.

Pro popis obdélníkové plochy bylo potřeba zvolit několik dalších parametrů popisu. Jedním z nich byla strategie popisu, která byla zvolena tak, že paprsek laseru vyplňoval obrazec pomocí jednotlivých úseček o nastaveném rozestupu (styl 1). Každý obdélník byl na vzorek popsán dvakrát s podélnou orientací popisovacích úseček a s příčnou orientací (Obr. 15). Jako hodnota rozestupu úseček „ d “ byla zvolena hodnota, která odpovídá rozestupu „ r “ jednotlivých pulsů laseru na přímce, tedy: $r = \frac{\text{popisovací rychlost [mm/s]}}{\text{frekvence [Hz]}}$ [mm] .



Obr. 15 Podélná a příčná orientace úseček popisu

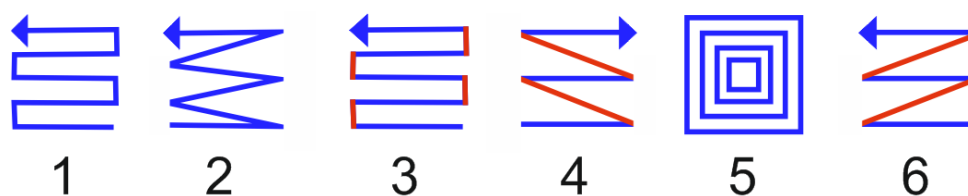


Obr. 16 Rozestup úseček popisu

4.3.3 3. Experiment

Tento experiment se zaměřoval na ovlivnění povrchu při změně strategie popisu a délky prvního pulzu. Pro tento experiment bylo vybráno pouze jedno nastavení, na základě 2. experimentu. U parametru byla měněna strategie popisu a délka prvního pulsu, která byla zvolena 100 μ s a 20 μ s. Vlastní popis byl proveden na rovinnou plochu vzorku.

U experimentálního zařízení je možné měnit celkem 6 strategií popisu (Obr. 17). Pro popis bylo vybráno prvních 5. Jelikož 6. strategie je pouze strategie 4 v obráceném směru a tak lze usuzovat, že mezi nimi nebude výrazný rozdíl.



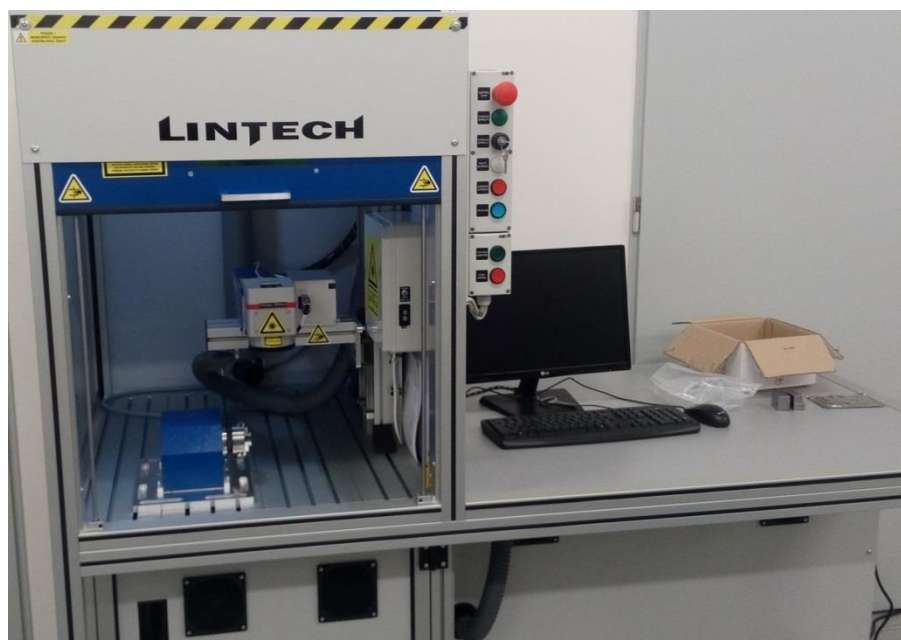
Obr. 17 Strategie popisu

4.4 Experimentální zařízení LZS – 150165

Experimentální značení bylo prováděno na Laserové značící stanici vyrobené firmou Lin-tech, spol. s r.o. (Obr. 18). Tato stanice se nachází v laboratořích Regionálního technologického institutu Západočeské univerzity v Plzni fakulty strojní. Tato značící stanice je osazena pulzním vláknovým systémem *LLS – F50 P* (Obr. 19) o maximálním výkonu 50 W a vychylovací hlavou *basiCube10* od firmy *SCANLAB*. Pro popisování rotačních součástí je stanice doplněna o řízenou rotační osu (Obr. 20). Přehled vlastností vláknového systému je uveden v Tabulka 5.

Tabulka 5 vlastnosti LLS - F50 P

Max. průměrný výkon	50 W
Rozsah frekvence	1-1000 kHz
Délka pulsu	3-500 ns
Energie pulzu (25 kHz)	$\geq 1,0$ mJ
Kvalita paprsku	$\leq 1,6$
Rychlost značení (f = 160 mm)	2,5 m/s



Obr. 18 Laserová značící stanice



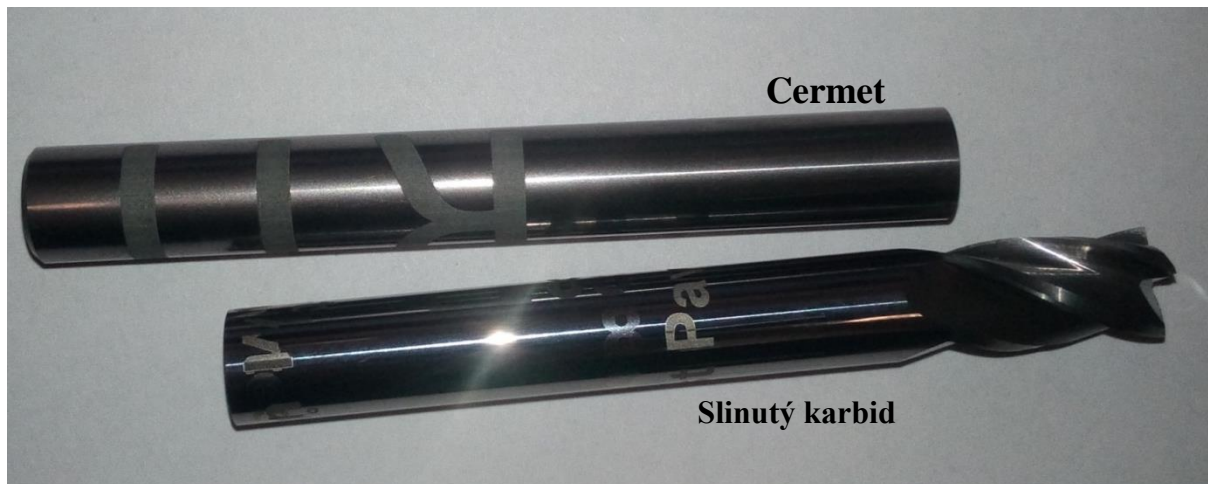
Obr. 19 Pulzní vláknový systém



Obr. 20 Rotační osa

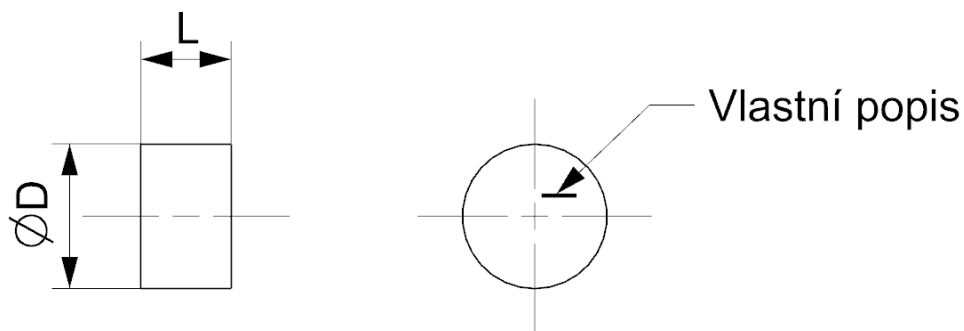
4.5 Experimentální materiál

Jako experimentální materiál pro první a druhý experiment byly zvoleny dva válcové vzorky o průměru 8 mm. První ze slinutého karbidu, druhý z cermetu (Obr. 21).



Obr. 21 Experimentální materiál

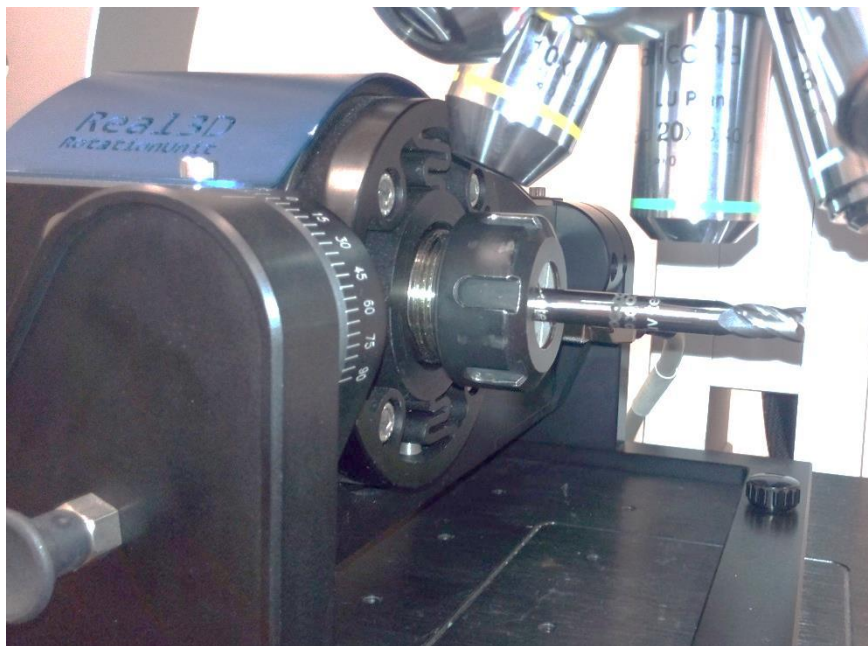
Pro třetí experiment byly použity vzorky tvaru válce o výšce nižší než průměr. Část vzorků byla vyrobena ze slinutého karbidu a část z cermetu.



Obr. 22 Experimentální materiál pro 3. experiment

4.6 Vyhodnocení kvality povrchu

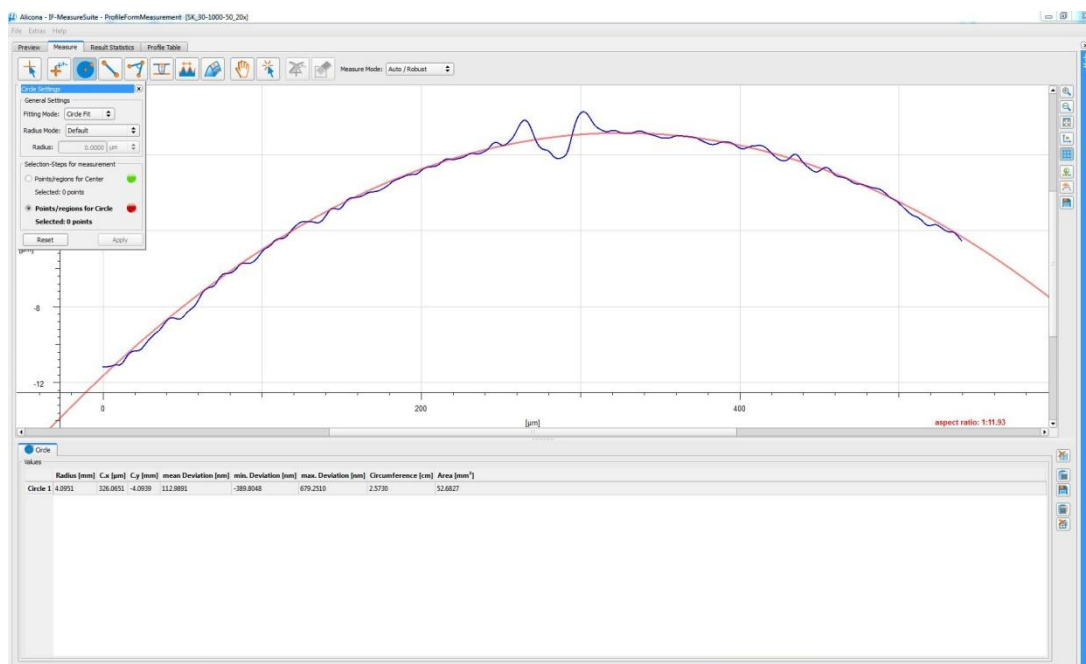
Hodnocení vlivu značení na kvalitu povrchu u všech tří experimentů bylo provedeno na optickém mikroskopu IFM G4. Nejdříve bylo provedeno naskenování všech gravur s použitým objektivem 20x s následným vyhodnocením v Softwaru Alicona – IF-MeasureSuite



Obr. 23 Skenování vzorků

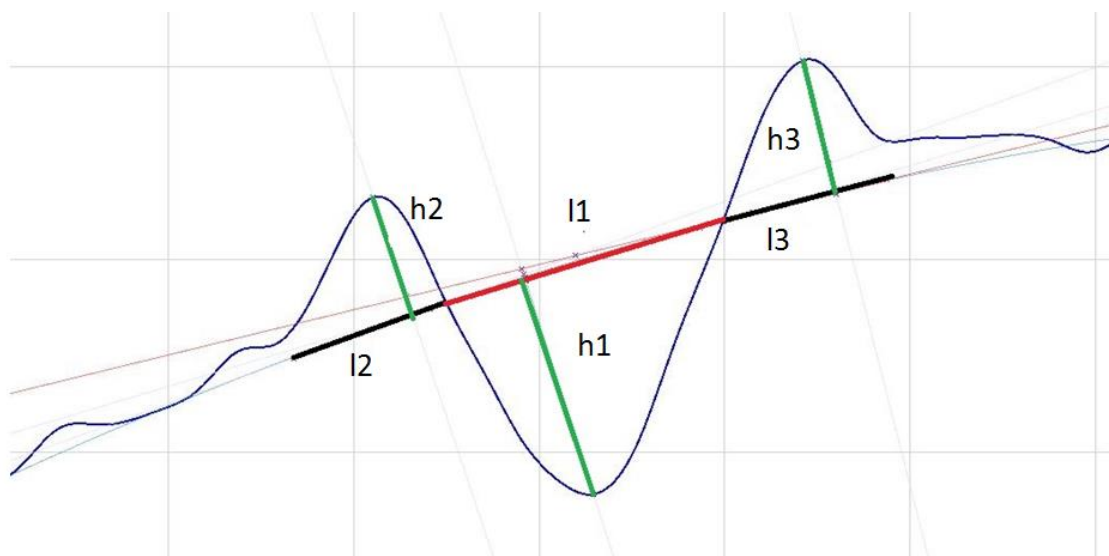
4.6.1 První experiment

U prvního experimentu bylo vyhodnocováno několik parametrů, hloubka gravury, výška „vyhrnutého“ materiálu jednotlivých hran, šířka gravury a šířky hran (Obr. 25). Všechna tato měření byla vztažena k základní kružnici, která byla proložena konturou povrchu. Měření bylo provedeno třikrát, pokaždé v jiné části naskenované gravury.



Obr. 24 Proložení základní kružnice měřeným profilem

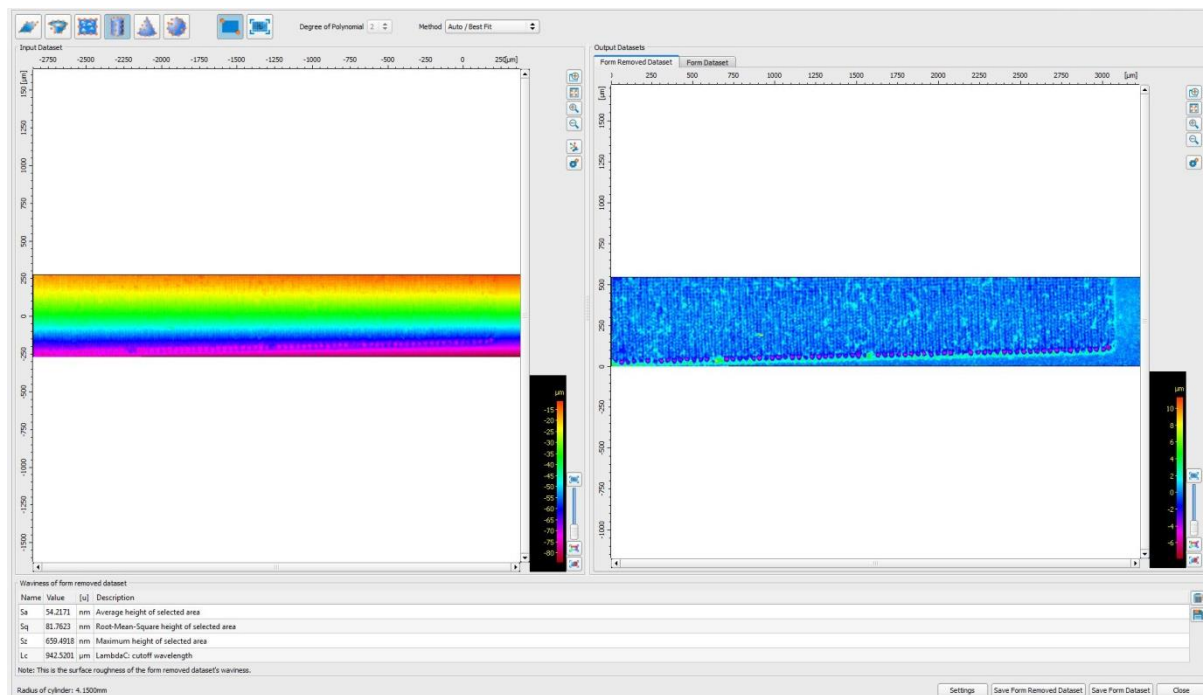
Při měření šířky hran, v případě že nedošlo k protnutí kontury povrchu se základní kružnicí v předpokládané blízké vzdálenosti, byla šířka hrany pouze odhadnuta, jako je vidět na Obr. 25 (vzdálenosti I2,I3).



Obr. 25 Vyhodnocované parametry

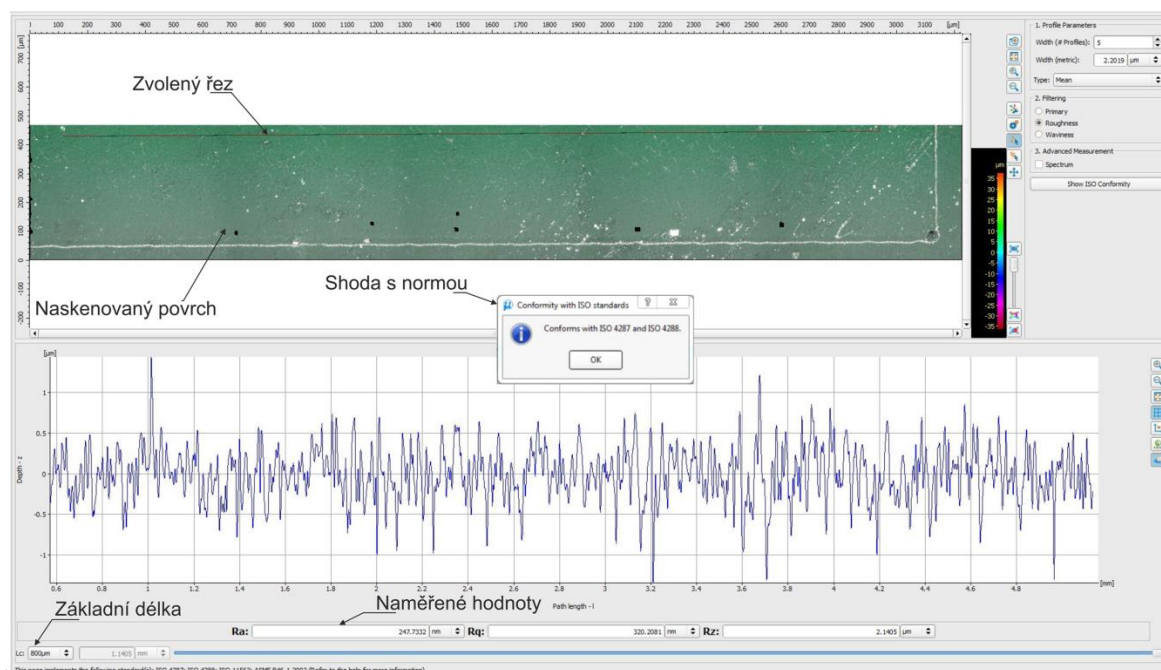
4.6.2 Druhý experiment

U druhého experimentu bylo provedeno měření drsnosti jednotlivých označených ploch dle ČSN EN ISO 4288 A ČSN EN ISO 4287. Jelikož se jednalo o gravury na válcové ploše, bylo nutné po naskenování narovnat povrch funkcí *Form Removal* (Obr. 26).



Obr. 26 Form removal

Pro hodnocení drsnosti byly zvoleny gravury s příčnou orientací úseček a zvolen řez kolmý na tyto úsečky, tak jak to předepisuje norma ČSN EN ISO 4288 pro periodický povrch. Nastavení bylo provedeno podle tabulek (Tabulka 1, Tabulka 2). Po zvolení základní délky a zakreslení měřeného profilu se po kliknutí na tlačítko *Show ISO Conformity* zobrazí okno s hláškou, zda měření proběhlo dle normy. Pokud podle normy neproběhlo, je nutné upravit základní délku drsnosti. Vyhodnocovány byly parametry Ra a Rz dle ISO 4287.



Obr. 27 Měření profilové drsnosti

4.6.3 Třetí experiment

U třetího experimentu byla měřena profilová drsnost a plošná drsnost. Proto, aby mezi sebou byli všechny naměřené drsnosti porovnatelné, byla zvolena základní délka 250 μm , která byla nastavena stejně pro všechna měření.

Měření profilové drsnosti bylo provedeno stejně jako ve druhém experimentu, viz 4.6.2, s těmi rozdíly, že byla použita konstantní základní vlnová délka a byly vyhodnocovány všechny parametry, které software poskytoval, podle normy: ISO 4287 a ASME B46.1-2002.

Při měření plošné drsnosti vyhodnocovací software poskytuje velké množství parametrů. Vyhodnocování proběhlo podle norem: ASME B46.1-2002; ISO 25178; ISO 12781-1:2003. Vyhodnocovány byly všechny dostupné parametry.

5 Analýza naměřených dat

5.1 První experiment

Kompletní tabulka naměřených hodnot je uvedena v příloze č. 1. V tabulce níže jsou uvedeny aritmetické průměry naměřených parametrů a jejich směrodatná odchylka.

Tabulka 6 Naměřené hodnoty

Značený materiál	Parametry popisu: Výkon[%] - Rychlost [mm/s] - Frekvence [kHz]	h1 [μm]	σ _{h1} [μm]	h2 [μm]	σ _{h2} [μm]	h3 [μm]	σ _{h3} [μm]	l1 [μm]	σ _{l1} [μm]	l2 [μm]	σ _{l2} [μm]	l3 [μm]	σ _{l2} [μm]
Cermet	30-500-50	2,60	0,26	1,16	0,09	1,16	0,20	30,39	1,40	15,14	3,75	15,23	1,97
	60-500-50	4,38	0,13	2,23	0,12	2,15	0,22	39,51	0,76	18,64	1,29	21,50	0,11
	90-500-50	5,58	0,19	3,01	0,22	2,80	0,17	44,93	0,95	22,67	1,97	21,81	2,13
	30-1000-50	1,24	0,18	0,64	0,12	0,69	0,09	28,72	4,46	11,96	1,84	17,11	3,23
	60-1000-50	2,06	0,16	1,13	0,08	0,71	0,26	35,36	1,96	16,91	0,81	16,68	4,28
	90-1000-200	5,90	0,42	3,55	0,40	-	-	34,33	0,70	18,93	1,28	-	-
	30-500-200	1,65	0,11	0,87	0,09	0,81	0,17	14,67	0,95	9,82	0,95	9,99	1,12
	60-500-200	5,66	1,65	0,51	0,25	0,49	0,09	30,74	1,83	12,63	2,19	12,13	2,58
	90-500-200	7,32	1,96	0,35	0,07	0,52	0,24	40,85	0,57	11,41	3,22	12,75	2,81
Slinutý karbid	30-500-50	2,18	0,25	2,19	0,40	1,69	0,21	24,65	1,78	19,97	2,31	21,33	2,35
	60-500-50	5,28	0,46	4,23	0,65	3,08	0,23	36,56	1,02	22,06	2,46	22,47	4,45
	90-500-50	6,24	0,20	4,90	1,29	3,54	0,62	40,96	1,54	32,02	1,05	26,76	3,49
	30-1000-50	1,65	0,31	1,04	0,15	0,76	0,31	24,41	1,87	19,77	3,63	17,75	2,45
	60-1000-50	2,61	0,54	1,58	0,74	1,49	0,16	38,39	2,27	25,23	3,13	19,93	1,08
	90-1000-200	6,26	0,63	5,38	0,83	5,82	1,04	27,18	0,94	25,50	2,75	20,30	2,93
	30-500-200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60-500-200	3,76	0,98	0,94	0,17	1,16	0,25	18,29	1,13	14,97	3,04	13,23	3,38
	90-500-200	-	-	10,07	1,58	7,07	0,88	-	-	-	-	-	-

σ_x – směrodatná odchylka

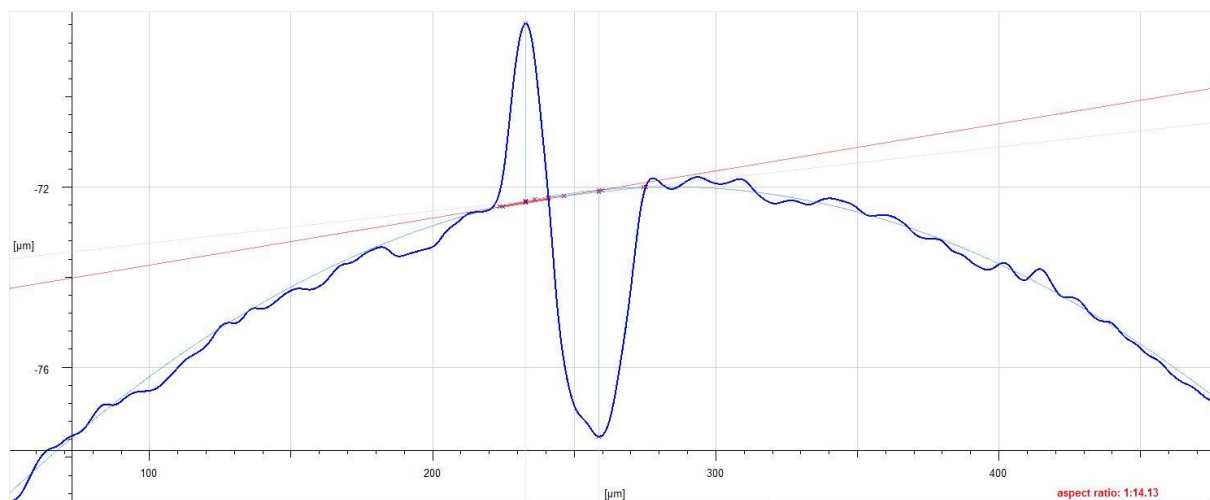
V mnoha případech vychází směrodatná odchylka relativně vysoká, to lze přisuzovat principu laserového popisu, který spočívá v opakovaném odebrání materiálu pomocí krátkých pulsů laserového záření. Při bližším zkoumání parametrů popisu (viz. Tabulka 4 str. 20) zjistíme, že vzdálenost jednotlivých impulsů může dosahovat až 20 μm (viz. Obr. 28). Tedy profil gravury je ovlivňován místem zkoumání.



Obr. 28 Horní pohled na gravuru SK_30-1000-50

Jelikož ve velkém počtu případů, při měření šířky hran, nedošlo k protnutí kontury povrchu se základní kružnicí, a tudíž musela být velká část hodnot šířek hran odhadnuta, není v další části práce s těmito hodnotami dále pracováno.

Typický profil gravury vypadal obdobně jako na Obr. 25, v některých případech však došlo k odlišnostem a z toho důvodu nejsou některé hodnoty v tabulce uvedeny. Například na vzorku z cermetu označený parametry 90-1000-200 nebyla jasně patrná jedna z hran (Obr. 29).

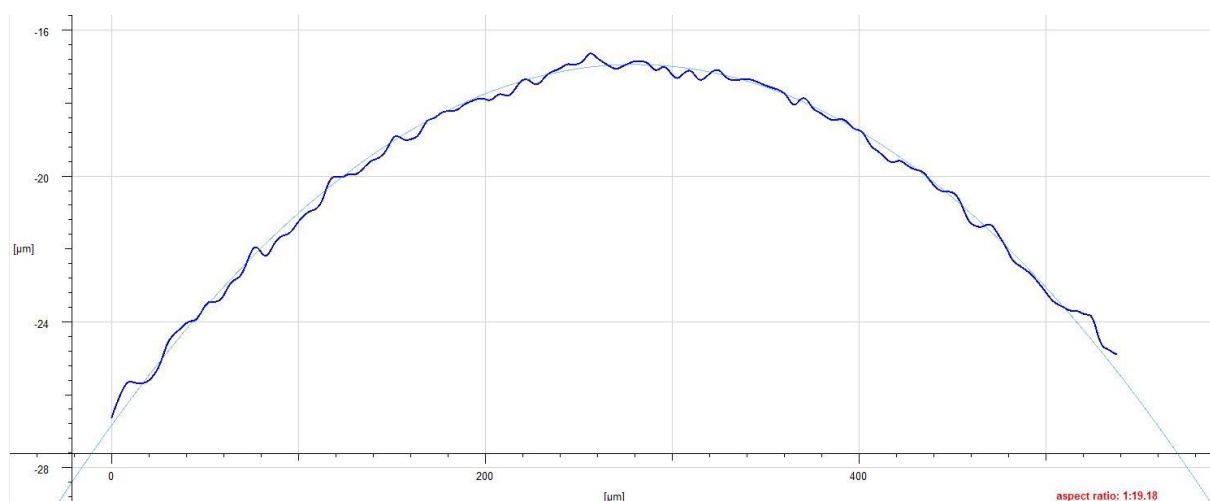


Obr. 29 Cermet 90-1000-200

Na vzorku slinutého karbidu označeného parametry 30-500-200 nedošlo k měřitelnému ovlivnění povrchu (Obr. 31). Laserový paprsek neměl při tomto nastavení dostatečnou energii pro překročení bodu ablace a pravděpodobně došlo pouze k částečné změně barevnosti povrchu, jak je vidět na horním pohledu na Obr. 30.

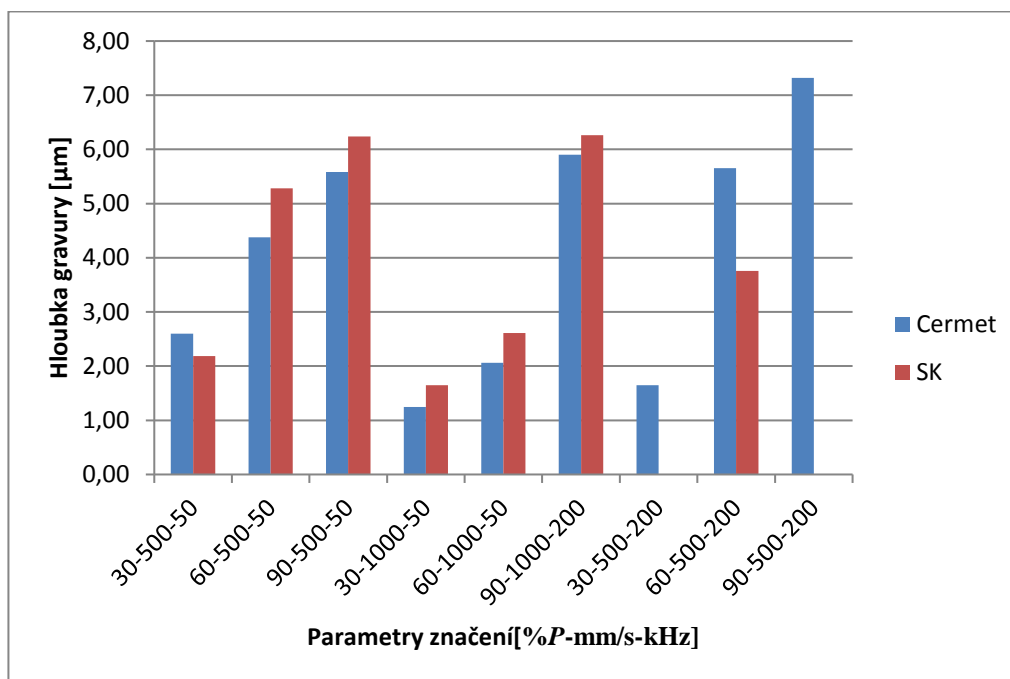


Obr. 30 Slinutý karbid 30-500-200

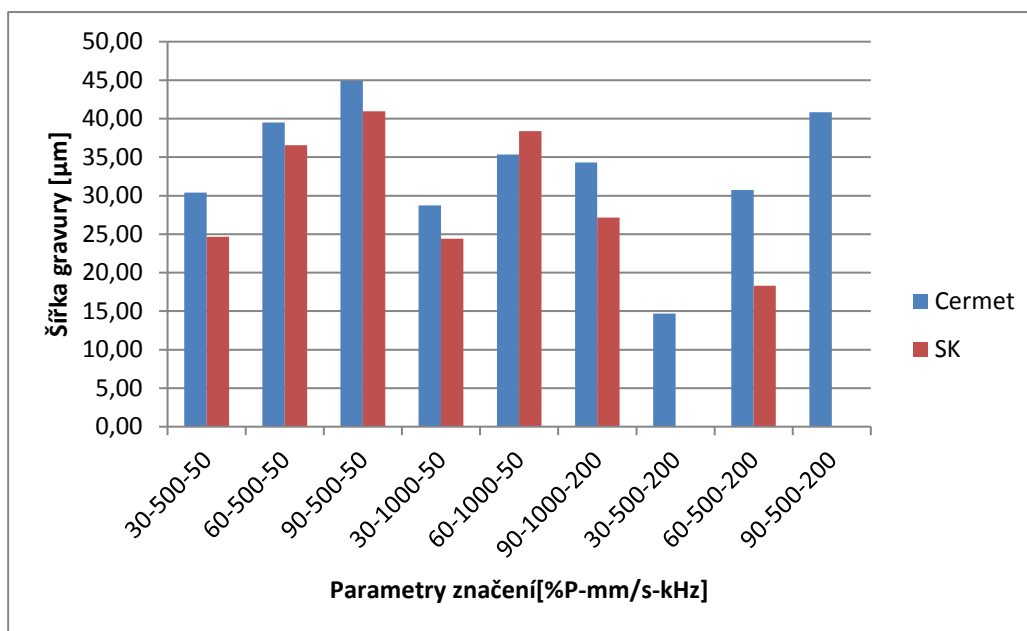


Obr. 31 Slinutý karbid 30-500-200

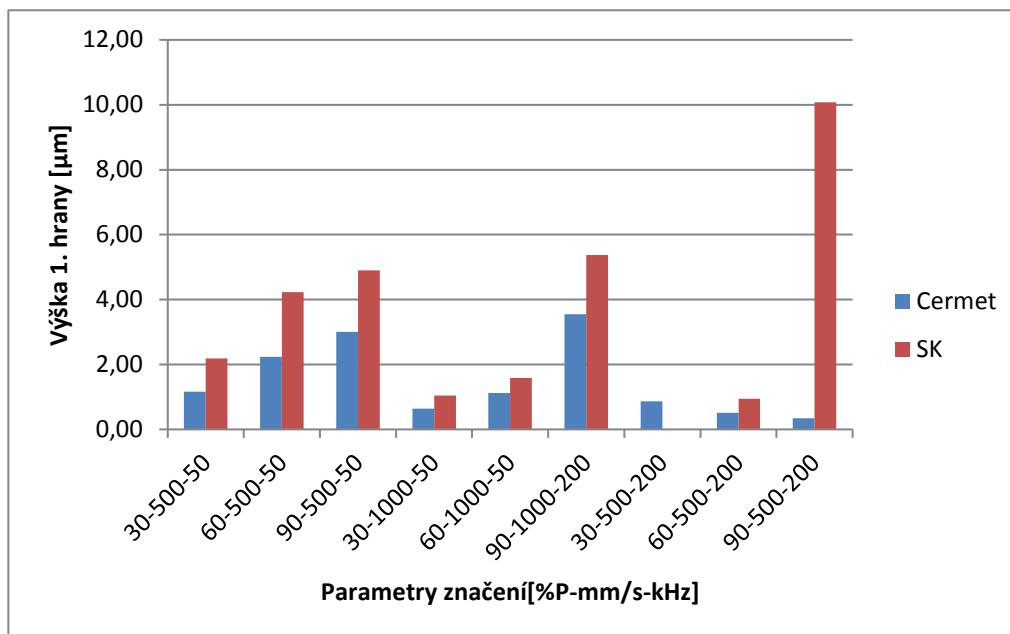
Pro snadnější porovnání naměřených hodnot, bylo vytvořeno několik grafů, na kterých lze vidět závislosti měřených parametrů na parametrech popisu a popisovaném vzorku.



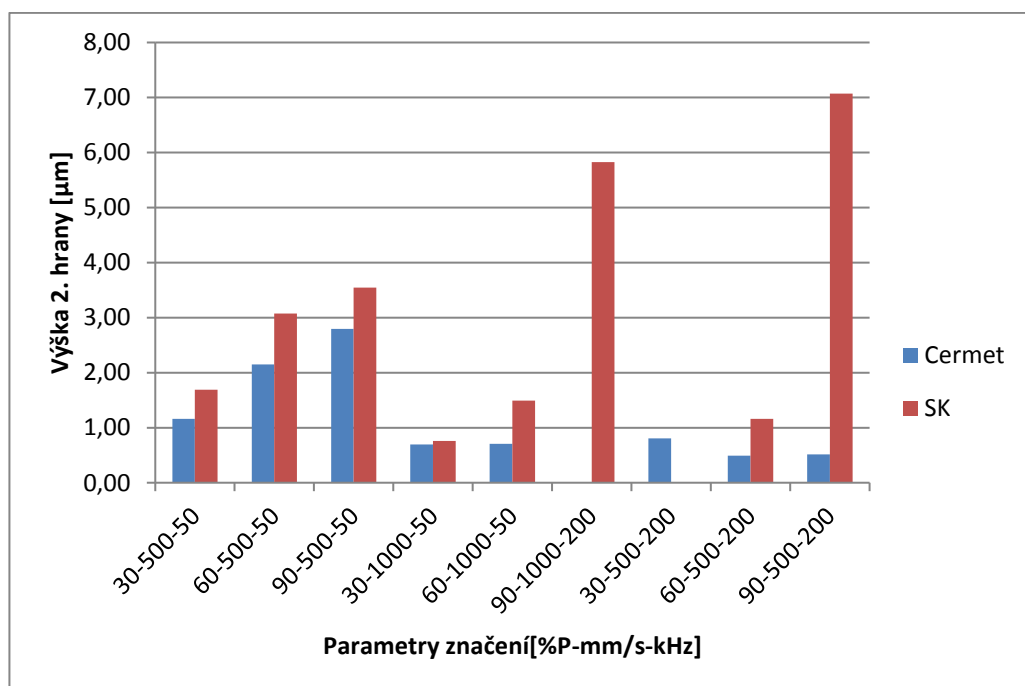
Graf 1 Hloubka gravury v závislosti na parametrech značení a značeném materiálu



Graf 2 Šíře gravury v závislosti na parametrech značení a značeném materiálu

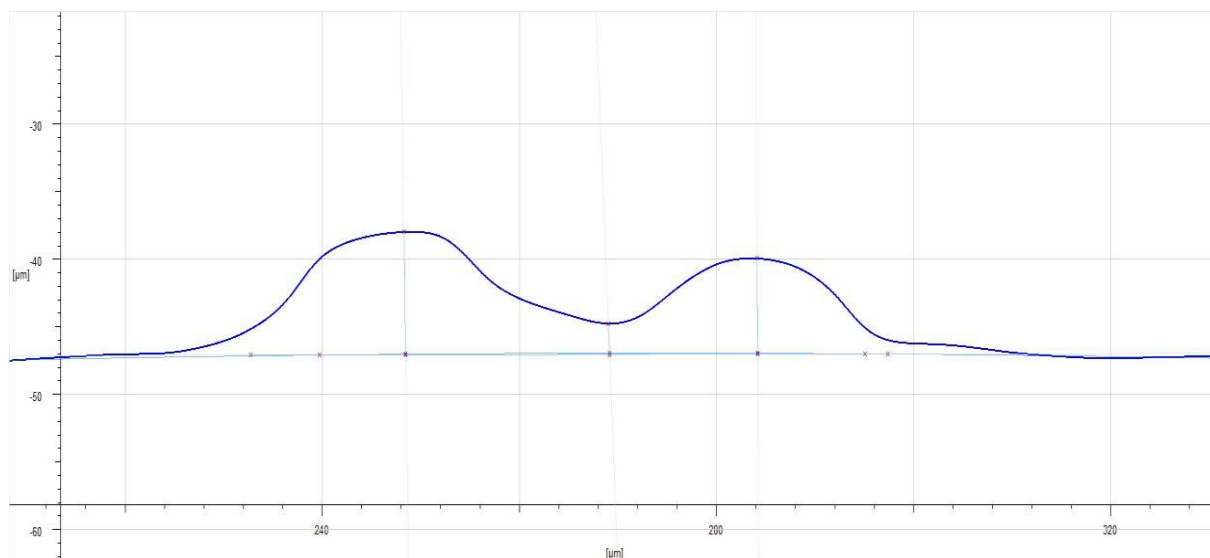


Graf 3 Výška 1. hrany v závislosti na parametrech značení a značeném materiálu



Graf 4 Výška 2. hrany v závislosti na parametrech značení a značeném materiálu

Na výše uvedených grafech lze pozorovat zvyšující se hloubku gravury i zvyšující se výšku jednotlivých hran v závislosti na zvyšujícím se výkonu laseru. Na základě tohoto tvrzení by se dalo předpokládat zvýšení hloubky gravury u slinutého karbidu označeného parametry 90-500-200 oproti parametrům 60-500-200 (Graf 1). K nárůstu hloubky však nedošlo, ale došlo k nárůstu materiálu, jak je vidět na Obr. 32.



Obr. 32 Slinutý karbid 90-500-200

5.2 Druhý experiment

Pro další experiment byly vybrány ty parametry, kde součet výšek hran (h_2 , h_3) a hloubky gravury (h_1) dosahovaly minimálních hodnot. Součet jednotlivých parametrů je uveden v tabulce níže. Parametry s nejnižší hodnotou jsou zeleně podbarveny.

Tabulka 7 Parametry vybrané pro druhý experiment

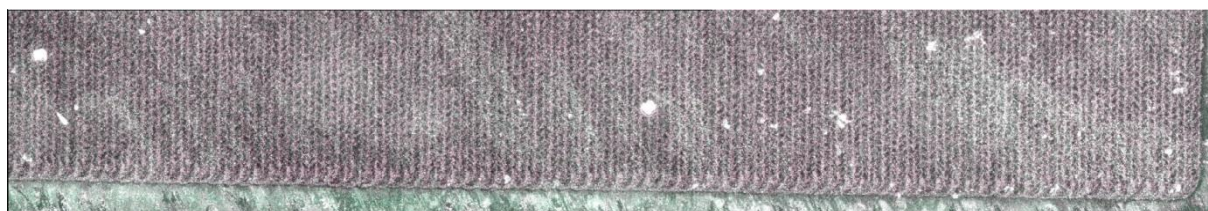
Značený materiál	Parametry popisu: Výkon[%] - Rychlost [mm/s] - Frekvence [kHz]	Σh [μm]
Cermet	30-500-50	4,92
	60-500-50	8,76
	90-500-50	11,39
	30-1000-50	2,57
	60-1000-50	3,90
	90-1000-200	9,45
	30-500-200	3,32
	60-500-200	6,66
	90-500-200	8,18
Slinutý karbid	30-500-50	6,06
	60-500-50	12,59
	90-500-50	14,69
	30-1000-50	3,45
	60-1000-50	5,69
	90-1000-200	17,46
	30-500-200	0,00
	60-500-200	5,86
	90-500-200	17,14

Každým z těchto parametrů byla na vzorku popsána obdélníková plocha. Pro popsání obdélníkové plochy bylo nutné zvolit rozestup jednotlivých úseček výplně (viz str. 20), pro parametry popisu 30-1000-50 byl rozestup zvolen 0,02 mm, pro parametry 30-500-200 byl zvolen 0,0025 mm.

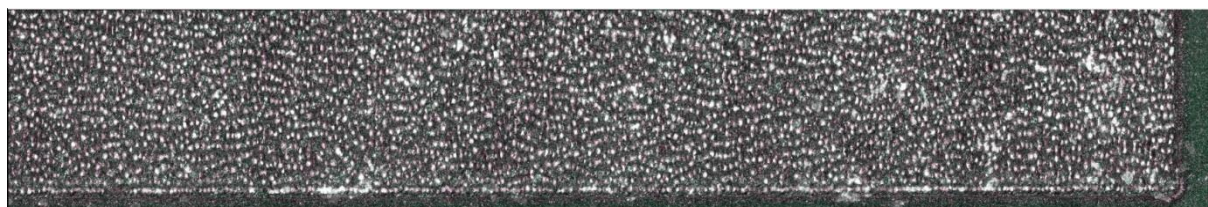
Tabulka 8 naměřené hodnoty drsnosti

Značený materiál	Parametry popisu: Výkon[%] - Rychlost [mm/s] - Frekvence [kHz]	Ra [μm]	Rz [μm]
Cermet	30-1000-50	0,33	2,46
	30-500-200	2,28	23,16
Slinutý karbid	30-1000-50	0,55	4,52
	30-500-200	0,33	2,38

Jak je vidět z tabulky výše nejlepšího povrchu u vzorku cermetu bylo dosaženo parametry (30-100-50), které již v předchozím experimentu vycházely nejlépe. U druhých parametrů (30-500-200) došlo k velkému nárůstu drsnosti, což lze přisuzovat k nevhodně zvolenému rozestupu úseček popisu, kdy dochází k velkému překryvu jednotlivých bodů laseru. Všechny obdélníky byly na povrchu vzorku jasně viditelné (Obr. 33, Obr. 34).



Obr. 33 Cermet 30-1000-50

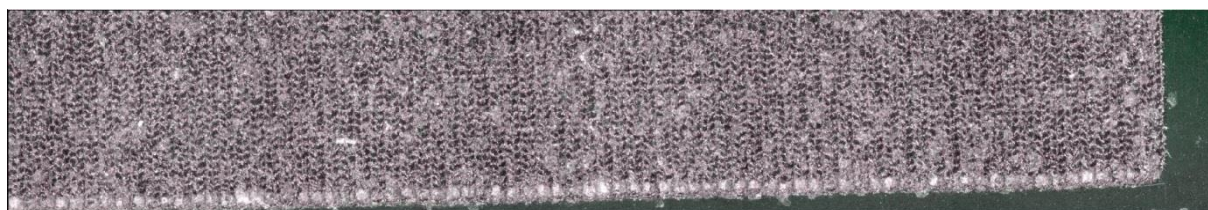


Obr. 34 Cermet 30-500-200

Pro vzorek ze slinutého karbidu vycházejí nejnižší hodnoty drsnosti pro parametry 30-500-200. Ovšem těmito parametry došlo k tak malému ovlivnění povrchu, že označený obdélník je pouhým okem těžce rozeznatelný, to je vidět i na následujícím obrázku. Při použití parametru 30-1000-50 došlo k většímu ovlivnění povrchu vzorku a označený obdélník je již na povrchu jasně viditelný.



Obr. 35 Slinutý karbid 30-500-200



Obr. 36 Slinutý karbid 30-1000-50

5.3 Třetí experiment

Pro třetí experiment byly vybrány parametry na základě předchozích dvou experimentů a to parametr 30-1000-50. Kompletní tabulku parametrů popisu je možné nalézt v příloze č. 2.

V tabulkách níže jsou uvedeny naměřené hodnoty plošné a profilové drsnosti. Profilová drsnost byla měřena celkem třikrát, zde jsou uvedeny pouze aritmetické průměry naměřených hodnot. Kompletní tabulku je možné nalézt v příloze 3.

Tabulka 9 Naměřené hodnoty plošné drsnosti

Značený materiál	č.p. ¹	Sa [nm]	Sq [nm]	Sp [μm]	Sv [μm]	Sz [μm]	S10z [μm]
Cermet	1	501,6816	674,4098	26,8988	2,5979	29,4967	24,8226
	2	489,4299	630,2352	10,5892	2,6145	13,2038	6,2719
	3	550,3266	747,4801	10,5711	5,3538	15,9248	14,5745
	4	514,4996	649,3869	3,9711	2,8115	6,7826	5,9792
	5	528,9986	703,4477	21,2769	4,1743	25,4512	21,4878
	6	504,5046	684,1243	14,5954	5,3526	19,948	18,1909
	7	523,4563	688,4301	10,9689	5,7236	16,6925	12,3831
	8	485,2004	681,7035	19,9431	2,4997	22,4428	21,4729
	9	558,254	750,2887	15,2001	7,9035	23,1036	18,2926
	10	512,287	694,1808	19,3398	4,6314	23,9712	17,0059
SK	1	388,1722	483,679	3,9475	2,1804	6,1278	4,6842
	2	378,0139	475,2964	6,4644	3,0737	9,5381	6,1127
	3	380,731	490,3349	11,4275	2,3976	13,8251	7,7501
	4	405,1011	504,9731	9,2132	2,2505	11,4637	6,1367
	5	445,3112	570,6933	4,3253	4,1557	8,481	7,3435
	6	428,4767	545,9754	11,7574	4,2858	16,0432	7,3804
	7	435,4878	573,7257	5,4344	4,3672	9,8016	7,347
	8	515,2694	713,3322	5,4464	4,8917	10,3382	9,1443
	9	502,6009	707,5894	6,1011	6,1784	12,2795	10,5151
	10	437,4775	562,3153	5,1577	3,9224	9,0801	7,4752

¹ číslo popisu vzorku, viz příloha 2

Tabulka 10 Naměřené hodnoty profilové drsnosti

Značený materiál	č.p. ¹	\overline{Ra} [nm]	\overline{Rq} [nm]	\overline{Rt} [μm]	\overline{Rz} [μm]	\overline{Rmax} [μm]	\overline{Rp} [μm]	\overline{Rv} [μm]	\overline{Rc} [μm]
Cermet	1	348	429	2,71	2,17	2,64	1,23	1,48	1,23
	2	355	448	3,40	2,37	3,39	2,11	1,29	1,35
	3	343	428	3,01	2,28	2,85	1,68	1,32	1,31
	4	344	429	3,04	2,28	3,04	1,66	1,39	1,29
	5	268	337	2,19	1,78	2,01	1,04	1,15	0,99
	6	384	485	3,24	2,53	3,07	1,79	1,46	1,38
	7	360	447	2,80	2,27	2,65	1,21	1,58	1,29
	8	363	446	2,51	2,18	2,43	1,20	1,32	1,25
	9	336	414	2,65	2,07	2,65	1,27	1,38	1,19
	10	241	311	2,70	1,77	2,50	1,77	0,93	1,03
SK	1	474	600	4,36	3,39	4,23	2,48	1,88	1,85
	2	474	599	4,14	3,28	3,96	2,64	1,50	1,78
	3	463	588	3,99	3,15	3,72	2,33	1,66	1,76
	4	507	632	3,98	3,45	3,79	2,18	1,80	1,83
	5	370	481	3,96	2,92	3,86	2,54	1,41	1,55
	6	448	575	4,34	3,36	4,24	2,53	1,81	1,79
	7	481	605	3,93	3,22	3,85	2,15	1,78	1,79
	8	449	579	5,42	3,46	5,20	3,68	1,74	1,94
	9	506	644	4,88	3,71	4,60	2,94	1,95	1,96
	10	333	439	3,84	2,62	3,84	2,52	1,32	1,51

¹ číslo popisu vzorku, viz příloha 2

Pro rozhodnutí které číslo popisu vzorku a tudíž i parametry popisu jsou nejvhodnější a ovlivňují povrch nejméně, byla použita rozhodovací metoda, metoda pořadí. Jelikož bylo měřeno více parametrů profilové drsnosti než plošné, byla všem parametrům profilové drsnosti přiřazena váha 0,75, to zajišťuje že výsledky z profilové drsnosti nebudou výsledek ovlivňovat více než výsledky z plošné drsnosti (Tabulka 11).

Metoda pořadí

Metoda pořadí je založena na převedení kriteriální matice na matici pořadí. To znamená, že postupně se podle všech kritérií přiřadí variantám jejich pořadí. Pokud nejsou známé preference kritérií, pouze se sečtou pro každou variantu všechna pořadí. Nejlepší varianta má tento součet nejnižší. Pokud jsou známé preference kritérií (váhy), lze vypočítat vážené pořadí variant, opět nejlepší varianta má tento součet nejnižší. (16)

Tabulka 11 Metoda pořadí


Značený materiál	č.p. ¹	$P_{Ra,0,75}^2$	$P_{Rq,0,75}^2$	$P_{Rt,0,75}^2$	$P_{Rz,0,75}^2$	$P_{Rmax,0,75}^2$	$P_{Rp,0,75}^2$	$P_{Rv,0,75}^2$	$P_{Rc,0,75}^2$	P_{Sa}^2	P_{Sq}^2	P_{Sp}^2	P_{Sv}^2	P_{Sz}^2	P_{S10z}^2	Součet pořadí
Cermet	1	4,5	3,8	3,8	3,0	3,0	3,0	6,8	3,0	3	3	10	2	10	10	68,75
	2	5,3	6,8	7,5	6,8	7,5	7,5	2,3	6,8	2	1	3	3	2	2	63,25
	3	3,0	3,0	5,3	6,0	5,3	5,3	3,8	6,0	9	9	2	8	3	4	72,5
	4	3,8	4,5	6,0	5,3	6,0	4,5	5,3	5,3	6	2	1	4	1	1	55,5
	5	1,5	1,5	0,8	1,5	0,8	0,8	1,5	0,8	8	8	9	5	9	9	57
	6	7,5	7,5	6,8	7,5	6,8	6,8	6,0	7,5	4	5	5	7	5	6	88,25
	7	6,0	6,0	4,5	4,5	4,5	2,3	7,5	4,5	7	6	4	9	4	3	72,75
	8	6,8	5,3	1,5	3,8	1,5	1,5	3,0	3,8	1	4	8	1	6	8	55
	9	2,3	2,3	2,3	2,3	3,8	3,8	4,5	2,3	10	10	6	10	7	7	73,25
	10	0,8	0,8	3,0	0,8	2,3	6,0	0,8	1,5	5	7	7	6	8	5	53,75
SK	1	5,3	5,3	6,0	5,3	5,3	3,0	6,8	6,0	3	2	1	1	1	1	51,75
	2	4,5	4,5	4,5	3,8	4,5	6,0	2,3	3,0	1	1	7	4	4	2	52
	3	3,8	3,8	3,8	2,3	0,8	2,3	3,0	2,3	2	3	9	3	9	8	55,75
	4	7,5	6,8	3,0	6,0	1,5	1,5	5,3	5,3	4	4	8	2	7	3	64,75
	5	1,5	1,5	2,3	1,5	3,8	5,3	1,5	1,5	8	7	2	6	2	4	47,75
	6	2,3	2,3	5,3	4,5	6,0	4,5	6,0	3,8	5	5	10	7	10	6	77,5
	7	6,0	6,0	1,5	3,0	3,0	0,8	4,5	4,5	6	8	4	8	5	5	65,25
	8	3,0	3,0	7,5	6,8	7,5	7,5	3,8	6,8	10	10	5	9	6	9	94,75
	9	6,8	7,5	6,8	7,5	6,8	6,8	7,5	7,5	9	9	6	10	8	10	109
	10	0,8	0,8	0,8	0,8	2,3	3,8	0,8	0,8	7	6	3	5	3	7	41,5
Váha	0,75									1						

¹ číslo popisu vzorku, viz příloha 2

² pořadí popisu vzorku podle hodnoty drsnosti povrchu (pro každý značený materiál samostatně) se započítanou váhou

Jak je možné vidět podle Tabulka 11 je číslo popisu 10 nevhodnější jak pro označení cermetu, tak slinutého karbidu. Parametry pro tento popis jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 12 Číslo popisu 10

Číslo popisu	Strategie	Vzdálenost [mm]	Úhel [°]	První pulz [us]	Výkon [%]	Rychlost [mm/s]	Frekvence [kHz]
10		0,02	90	20	30	1000	50

6 Diskuze naměřených výsledků

V prvním experimentu, kdy se na povrch zkoumané součásti popsala pouze jednoduchá úsečka, byly zjištěny jisté rozdíly mezi parametry popisu. Pro lepší přehlednost byly naměřené hodnoty vloženy do grafů. Z grafů (Graf 1, Graf 2) jsou patrné některé závislosti. Pokud nebudeme uvažovat parametr značení 90-500-200, kdy z neznámých důvodů nedošlo k vytvoření gravury, lze obecně říci, že hloubka gravury a její šířka je přímo závislá na výkonu laseru. Při zvyšování rychlosti značení a při zachování ostatních parametrů, lze pozorovat snížení hloubky gravury i výšek hran. Z naměřených výšek hran (Graf 3, Graf 4) nelze usuzovat obecné závislosti na výkonu laseru, při nižších opakovacích rychlostech laseru lze pozorovat přímou závislost výšky hrany na výkonu, avšak při opakovací frekvenci 200 kHz již tato závislost není pozorována.

U druhého experimentu byla pro cermetový vzorek nejnižší drsnost naměřena pro parametry popisu 30-1000-50 a to $R_a = 0,33 \mu\text{m}$, $R_z = 2,46 \mu\text{m}$. U druhých parametrů 30-500-200 byla naměřena hodnota drsnosti $R_a = 2,28 \mu\text{m}$, $R_z = 23,16 \mu\text{m}$, tyto hodnoty jsou několika násobně vyšší než v předchozím případě, to je z největší pravděpodobností způsobeno příliš nízkou vzdáleností jednotlivých úseček, kterými byla značená plocha vyplňována. Pro slinutý karbid byla nejnižší drsnost naměřena při použití parametrů 30-500-200 a to $R_a = 0,33 \mu\text{m}$, $R_z = 2,38 \mu\text{m}$, nicméně vlastní popis byl na vzorku špatně rozeznatelný a v porovnání se vzorkem z cermetu došlo k téměř k neznatelnému ovlivnění povrchu, to může být způsobeno nízkou energií pulsu, která není dostatečná k výraznějšímu odpaření materiálu. U parametrů 30-1000-50 byla na vzorku slinutého karbidu naměřena drsnost $R_a = 0,55 \mu\text{m}$, $R_z = 4,52 \mu\text{m}$. Při těchto parametrech již bylo označení jasně rozeznatelné.

Při třetím experimentu bylo naměřeno velké množství parametrů drsnosti pro jednotlivé parametry popisu. Z těchto hodnot byla sestavena tabulka pořadí, ze které vychází popis č. 10 jako nejvhodnější. Při bližším zkoumání tabulky je možné si všimnout, že na každém materiálu stejný popis vykazuje rapidně rozdílné hodnoty součtu pořadí. Například u cermetového vzorku popis č. 8 vykazuje druhý nejnižší součet pořadí, u slinutého karbidu je tento popis až na předposledním místě. Při pohledu na hodnoty naměřené drsnosti je vidět, že rozptyl hodnot drsnosti mezi jednotlivými popisy je celkem nízký. Ve velkém množství případů leží hodnoty v rozsahu směrodatné odchylky (příloha 3). Z toho vyplývá, že volba strategie popisu a délka prvního pulzu nemá zásadní vliv na drsnost povrchu.

7 Závěr

Tato práce se zabývala optimalizací parametrů laseru pro popis slinutého karbidu a cermetu a problematice laserového značení obecně. V teoretické části práce je uveden výčet laserových zdrojů včetně vhodnosti pro popisování a jejich parametrů. Dále jsou zde popsány metody laserového značení, které se dnes používají v praxi. Další kapitola se zabývá metodami měření drsnosti povrchu a metodikou vlastního měření. V experimentální části byly navrženy vhodné experimenty, cíle experimentu, hypotézy a metodika měření ovlivnění povrchu. Použity byly vzorky z rozdílného materiálu. V prvním experimentu byl vyhodnocován profil gravury a v druhém a třetím drsnost označeného povrchu. Pomocí prvního experimentu byla potvrzena první hypotéza, kdy byla zjištěna přímá závislost mezi výkonem laserového zdroje a zhoršující se kvalitou povrchu. Předpoklad, že rychlost značení nebude mít vliv na kvalitu povrchu se potvrdit nepodařilo, při zvyšování parametru rychlosti značení bylo pozorováno snížení negativního ovlivnění povrchu. Ve třetím experimentu byl zkoumán vliv strategie popisu a délka prvního pulzu na ovlivnění povrchu. Bylo zjištěno, že ani jedna z těchto zkoumaných veličin nemá zásadní vliv na výslednou drsnost povrchu. Zjištěné závislosti mohou mít praktický význam pro správnou volbu parametrů laserového značení při nutnosti provést značení na funkční plochy výrobku.

Seznam použité literatury

1. Miroslav, Ing. Novák. **Průmyslové lasery (1) – princip laseru. *MM spektrum*** . [Online] [Citace: 10. 11 2015.] <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>.
2. Laser Types and Classification. *Oregon State University*. [Online] [Citace: 20. 11 2015.] <http://oregonstate.edu/ehs/book/export/html/384>.
3. Pulzní vláknový laser. *LINTECH*. [Online] LINTECH, spol. s r.o. [Citace: 20. 11 2015.] <http://www.lintech.cz/pulzni-vlaknovy-laser>.
4. Lasery plynové. *Encyklopedie fyziky* . [Online] [Citace: 11. 12 2015.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/788-lasery-plynove>.
5. chessxpress. [Online] [Citace: 11. 12 2015.] obrázek. http://www.chessxpress.com/wp-content/uploads/2014/08/co2_laser_tube.jpg.
6. Carbon Dioxide Lasers. *Sci.Electronics.Repair FAQ* . [Online] [Citace: 11. 12 2015.] <http://www.repairfaq.org/sam/laserco2.htm#co2eff>.
7. Difrakční mřížky. *mit-laser*. [Online] MIT, spol. s r.o. [Citace: 11. 12 2015.] <http://www.mit-laser.cz/index.php?pg=325&ln=cz>.
8. Schaeffer, Ronald D. *Fundamental of laser micromachining*. místo neznámé : CRC Press/Taylor & Francis, 2012. ISBN 978-1-4398-6055-7.
9. Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *LAO*. [Online] LAO - průmyslové systémy, s.r.o. [Citace: 11. 12 2015.] <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu>.
10. B., Veselý. *Komparace normativů v grafické komunikaci ČSN, EN a ISO, Kurz 4. Práce s technickým výkresem*. České Budějovice : Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2008.
11. *ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha : Český normalizační institut, 1999.
12. Š., Tichá. *Strojírenská metrologie část I*. Ostrava : Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava, 2004.
13. Plášek, Jaromír. Konfokální mikroskop. *Přírodovědecký časopis Vesmír*. [Online] 5. 9 1995. [Citace: 5. 5 2016.] <http://casopis.vesmir.cz/clanek/konfokalni-mikroskop>.
14. Hrbáček, Ing. Petr. Ateam. *Oddělení povrchového inženýrství*. [Online] 1. 11 2007. [Citace: 10. 5 2016.] <http://www.ateam.zcu.cz/download/drsnost.pdf>.
15. *ČSN EN ISO 4288, Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha : Český normalizační institut, 1999.
16. Friebelova, Jana. Jana Friebelová. *Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích*. [Online] 28. 10 2008. [Citace: 1. 6 2017.] <http://www2.ef.jcu.cz/~jfrieb/tspp/data/teorie/Vicekritko.pdf>.

17. Laser Marking Methods. *PANNIER*. [Online] Pannier Corporation. [Citace: 11. 12 2015.]
<http://www.pannier.com/laser/laser-marking-methods/>.

18. LASER MARKING: How to choose the best laser for your marking application. *Laser Focus World*. [Online] PennWell Corporation, 18. 4 2011. [Citace: 10. 12 2015.]
<http://www.laserfocusworld.com/articles/2011/04/laser-marking-how-to-choose-the-best-laser-for-your-marking-application.html>.

Seznam příloh

Příloha č. 1

Naměřené hodnoty prvního experimentu

Příloha č. 2

Parametry popisu

Příloha č. 3

Naměřené hodnoty třetího experimentu

PŘÍLOHA č. 1

Naměřené hodnoty prvního experimentu



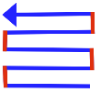
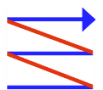



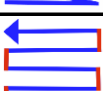
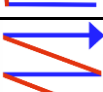

Příloha 1a Naměřené hodnoty

Značený materiál	Parametry popisu: Výkon[%] - Rychlost [mm/s] - Frekvence [kHz]															
		$h1$ [μm]			$\bar{h}1$ [μm]	σ_{h1} [μm]	$h2$ [μm]			$\bar{h}2$ [μm]	σ_{h2} [μm]	$h3$ [μm]			$\bar{h}3$ [μm]	σ_{h3} [μm]
Cermet	30-500-50	2,24	2,81	2,75	2,60	0,26	1,16	1,27	1,06	1,16	0,09	1,40	1,16	0,92	1,16	0,20
	60-500-50	4,40	4,52	4,21	4,38	0,13	2,35	2,29	2,06	2,23	0,12	2,40	2,18	1,86	2,15	0,22
	90-500-50	5,33	5,61	5,80	5,58	0,19	3,02	2,74	3,27	3,01	0,22	-	2,63	2,96	2,80	0,17
	30-1000-50	1,05	1,19	1,49	1,24	0,18	0,74	0,70	0,47	0,64	0,12	0,76	0,76	0,56	0,69	0,09
	60-1000-50	2,08	2,25	1,86	2,06	0,16	1,18	1,19	1,01	1,13	0,08	0,34	0,83	0,95	0,71	0,26
	90-1000-200	6,46	5,79	5,45	5,90	0,42	3,72	2,99	3,93	3,55	0,40	-	-	-	-	-
	30-500-200	1,56	1,80	1,58	1,65	0,11	0,80	0,81	1,00	0,87	0,09	0,71	0,66	1,05	0,81	0,17
	60-500-200	4,57	7,99	4,41	5,66	1,65	0,86	0,28	0,40	0,51	0,25	0,61	0,46	0,40	0,49	0,09
	90-500-200	4,76	9,53	7,67	7,32	1,96	0,25	0,37	0,42	0,35	0,07	0,48	0,83	0,24	0,52	0,24
SK	30-500-50	2,51	1,91	2,13	2,18	0,25	2,75	1,84	1,97	2,19	0,40	1,98	1,61	1,48	1,69	0,21
	60-500-50	4,69	5,81	5,35	5,28	0,46	3,64	5,14	3,91	4,23	0,65	3,29	3,19	2,75	3,08	0,23
	90-500-50	6,48	6,25	5,99	6,24	0,20	4,18	6,71	3,82	4,90	1,29	3,94	4,02	2,67	3,54	0,62
	30-1000-50	1,39	1,47	2,09	1,65	0,31	1,19	0,83	1,10	1,04	0,15	1,19	0,47	0,62	0,76	0,31
	60-1000-50	3,19	1,89	2,75	2,61	0,54	2,48	1,61	0,66	1,58	0,74	1,29	1,67	1,52	1,49	0,16
	90-1000-200	6,59	5,38	6,82	6,26	0,63	5,20	6,47	4,46	5,38	0,83	6,55	4,35	6,57	5,82	1,04
	30-500-200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	60-500-200	2,46	4,83	3,99	3,76	0,98	1,09	0,71	1,02	0,94	0,17	1,42	0,83	1,24	1,16	0,25
	90-500-200	-	-	-	-	-	12,31	9,03	8,88	10,07	1,58	8,18	7,01	6,02	7,07	0,88

PŘÍLOHA č. 2

Parametry popisu

Příloha 2 Parametry popisu

Číslo popisu	Strategie	Vzdálenost [mm]	Úhel [°]	První pulz [us]	Výkon [%]	Rychlost [mm/s]	Frekvence [kHz]
1		0,02	90	100	30	1000	50
2		0,02	90	100	30	1000	50
3		0,02	90	100	30	1000	50
4		0,02	90	100	30	1000	50
5		0,02	90	100	30	1000	50
6		0,02	90	20	30	1000	50
7		0,02	90	20	30	1000	50
8		0,02	90	20	30	1000	50
9		0,02	90	20	30	1000	50
10		0,02	90	20	30	1000	50

PŘÍLOHA č. 3

Naměřené hodnoty třetího experimentu

Příloha 3a naměřené hodnoty třetího experimentu - profilová drsnost

Značený materiál	č.p. ¹	Ra [nm]			\overline{Ra} [nm]	σ_{Ra} [nm]	P_{Ra} ²	Rq [nm]			\overline{Rq} [nm]	σ_{Rq} [nm]	P_{Rq} ²	Rt [μm]			\overline{Rt} [μm]	σ_{Rt} [μm]	P_{Rt} ²
Cermet	1	351	359	332	348	11	6	432	443	412	429	13	5	2,57	2,67	2,90	2,71	0,14	5
	2	366	374	324	355	22	7	468	471	404	448	31	9	3,74	3,88	2,59	3,40	0,58	10
	3	351	345	332	343	8	4	436	438	411	428	12	4	2,64	3,47	2,91	3,01	0,34	7
	4	350	339	344	344	5	5	432	423	433	429	5	6	2,56	2,51	4,06	3,04	0,72	8
	5	279	262	264	268	7	2	346	336	329	337	7	2	2,15	2,43	1,99	2,19	0,18	1
	6	367	369	415	384	23	10	469	478	506	485	16	10	3,17	3,84	2,72	3,24	0,46	9
	7	356	352	370	360	8	8	440	447	455	447	6	8	2,79	3,02	2,58	2,80	0,18	6
	8	364	377	347	363	12	9	443	465	429	446	15	7	2,53	2,60	2,41	2,51	0,08	2
	9	347	333	329	336	8	3	426	408	407	414	9	3	2,51	2,39	3,04	2,65	0,28	3
	10	248	221	254	241	15	1	311	303	321	311	7	1	1,87	4,05	2,19	2,70	0,96	4
SK	1	486	457	480	474	12	7	601	577	621	600	18	7	3,77	3,91	5,40	4,36	0,74	8
	2	494	511	416	474	41	6	611	653	533	599	50	6	3,72	4,57	4,12	4,14	0,35	6
	3	472	444	473	463	14	5	591	559	614	588	22	5	4,07	3,74	4,15	3,99	0,18	5
	4	505	505	510	507	2	10	631	628	636	632	3	9	4,01	3,99	3,94	3,98	0,03	4
	5	316	414	381	370	41	2	403	531	509	481	56	2	2,89	4,35	4,64	3,96	0,76	3
	6	458	464	423	448	18	3	598	589	538	575	27	3	5,14	4,11	3,76	4,34	0,58	7
	7	459	488	497	481	16	8	573	610	632	605	25	8	3,58	3,92	4,27	3,93	0,28	2
	8	456	474	416	449	24	4	580	602	553	579	20	4	4,21	4,53	7,52	5,42	1,49	10
	9	498	540	479	506	25	9	622	689	620	644	32	10	4,42	5,22	5,02	4,88	0,34	9
	10	329	319	350	333	13	1	447	426	445	439	9	1	4,51	3,47	3,53	3,84	0,48	1

¹ číslo popisu vzorku, viz příloha 2

² pořadí popisu vzorku podle hodnoty drsnosti povrchu (pro každý značený materiál samostatně)

σ_x - směrodatná odchylka

Příloha 3b naměřené hodnoty třetího experimentu - profilová drsnost

Značený materiál	č.p. ¹	Rz [μm]			\overline{Rz} [μm]	σ_{Rz} [μm]	P_{Rz} ²	Rmax [μm]			\overline{Rmax} [μm]	σ_{Rmax} [μm]	P_{Rmax} ²	Rp [μm]			\overline{Rp} [μm]	σ_{Rp} [μm]	P_{Rp} ²
Cermet	1	2,14	2,24	2,13	2,17	0,05	4	2,57	2,67	2,69	2,64	0,05	4	1,31	1,29	1,10	1,23	0,09	4
	2	2,47	2,57	2,06	2,37	0,22	9	3,74	3,85	2,59	3,39	0,57	10	2,38	2,64	1,30	2,11	0,58	10
	3	2,20	2,42	2,23	2,28	0,10	8	2,42	3,47	2,67	2,85	0,45	7	1,38	2,07	1,60	1,68	0,29	7
	4	2,13	2,16	2,55	2,28	0,19	7	2,56	2,49	4,06	3,04	0,72	8	1,17	1,23	2,57	1,66	0,65	6
	5	1,82	1,84	1,69	1,78	0,06	2	1,94	2,15	1,94	2,01	0,10	1	0,99	1,26	0,87	1,04	0,17	1
	6	2,43	2,81	2,34	2,53	0,20	10	3,17	3,34	2,71	3,07	0,26	9	1,94	2,21	1,22	1,79	0,42	9
	7	2,27	2,28	2,26	2,27	0,01	6	2,50	2,89	2,55	2,65	0,17	6	1,17	1,33	1,13	1,21	0,09	3
	8	2,14	2,36	2,03	2,18	0,14	5	2,53	2,45	2,31	2,43	0,09	2	1,23	1,29	1,07	1,20	0,09	2
	9	2,15	1,97	2,10	2,07	0,08	3	2,51	2,39	3,04	2,65	0,28	5	1,25	1,10	1,45	1,27	0,14	5
	10	1,54	2,08	1,69	1,77	0,23	1	1,79	3,62	2,09	2,50	0,80	3	1,00	3,11	1,21	1,77	0,95	8
SK	1	3,17	3,31	3,67	3,39	0,21	7	3,46	3,91	5,31	4,23	0,79	7	1,93	1,86	3,65	2,48	0,83	4
	2	3,20	3,71	2,94	3,28	0,32	5	3,64	4,21	4,02	3,96	0,24	6	2,04	2,96	2,93	2,64	0,43	8
	3	3,06	2,88	3,52	3,15	0,27	3	3,81	3,47	3,90	3,72	0,18	1	2,19	2,26	2,53	2,33	0,15	3
	4	3,34	3,50	3,49	3,45	0,07	8	3,59	3,99	3,80	3,79	0,16	2	2,22	2,14	2,19	2,18	0,03	2
	5	2,29	3,21	3,25	2,92	0,44	2	2,89	4,18	4,49	3,86	0,69	5	1,68	2,82	3,13	2,54	0,63	7
	6	3,61	3,40	3,08	3,36	0,22	6	5,14	3,84	3,74	4,24	0,64	8	3,39	2,34	1,86	2,53	0,64	6
	7	2,89	3,33	3,45	3,22	0,24	4	3,58	3,69	4,27	3,85	0,30	4	1,80	2,08	2,56	2,15	0,31	1
	8	3,23	3,37	3,78	3,46	0,23	9	3,97	4,11	7,52	5,20	1,64	10	2,56	2,62	5,86	3,68	1,54	10
	9	3,43	3,94	3,75	3,71	0,21	10	4,32	4,78	4,70	4,60	0,20	9	2,47	3,02	3,33	2,94	0,36	9
	10	2,79	2,57	2,51	2,62	0,12	1	4,51	3,47	3,53	3,84	0,48	3	3,03	2,10	2,43	2,52	0,38	5

¹ číslo popisu vzorku, viz příloha 2² pořadí popisu vzorku podle hodnoty drsnosti povrchu (pro každý značený materiál samostatně) σ_x - směrodatná odchylka

Příloha 3c naměřené hodnoty třetího experimentu - profilová drsnost

Značený materiál	č.p. ¹	R _v [μm]			\overline{Rv} [μm]	σ _{Rv} [μm]	P _{Rv} ²	R _c [μm]			\overline{Rc} [μm]	σ _{Rc} [μm]	P _{Rc} ²
Cermet	1	1,26	1,38	1,79	1,48	0,23	9	1,20	1,27	1,22	1,23	0,03	4
	2	1,36	1,23	1,29	1,29	0,05	3	1,41	1,43	1,22	1,35	0,10	9
	3	1,26	1,40	1,32	1,32	0,06	5	1,31	1,37	1,23	1,31	0,06	8
	4	1,39	1,29	1,49	1,39	0,08	7	1,22	1,21	1,44	1,29	0,11	7
	5	1,16	1,17	1,13	1,15	0,02	2	1,01	1,02	0,94	0,99	0,03	1
	6	1,23	1,64	1,50	1,46	0,17	8	1,34	1,46	1,34	1,38	0,06	10
	7	1,61	1,69	1,45	1,58	0,10	10	1,27	1,33	1,26	1,29	0,03	6
	8	1,30	1,31	1,34	1,32	0,02	4	1,24	1,30	1,22	1,25	0,03	5
	9	1,27	1,29	1,59	1,38	0,15	6	1,22	1,13	1,21	1,19	0,04	3
	10	0,87	0,94	0,98	0,93	0,04	1	0,90	1,25	0,95	1,03	0,15	2
SK	1	1,84	2,05	1,75	1,88	0,13	9	1,77	1,76	2,02	1,85	0,12	8
	2	1,68	1,62	1,19	1,50	0,22	3	1,73	1,92	1,67	1,78	0,11	4
	3	1,88	1,48	1,62	1,66	0,17	4	1,78	1,72	1,79	1,76	0,03	3
	4	1,80	1,85	1,76	1,80	0,04	7	1,84	1,80	1,85	1,83	0,02	7
	5	1,21	1,53	1,50	1,41	0,14	2	1,31	1,73	1,62	1,55	0,18	2
	6	1,75	1,77	1,90	1,81	0,07	8	1,95	1,81	1,60	1,79	0,14	5
	7	1,78	1,84	1,72	1,78	0,05	6	1,72	1,81	1,84	1,79	0,05	6
	8	1,65	1,91	1,66	1,74	0,12	5	1,77	1,84	2,23	1,94	0,20	9
	9	1,95	2,20	1,69	1,95	0,21	10	1,86	2,08	1,94	1,96	0,09	10
	10	1,48	1,37	1,10	1,32	0,16	1	1,67	1,41	1,45	1,51	0,11	1

¹ číslo popisu vzorku, viz příloha 2

² pořadí popisu vzorku podle hodnoty drsnosti povrchu (pro každý značený materiál samostatně)

σ_x - směrodatná odchylka

Příloha 3d Naměřené hodnoty třetího experimentu - plošná drsnost

Značený materiál	č.p. ¹	Sa [nm]	P _{Sa} ²	Sq [nm]	P _{Sq} ²	Sp [μm]	P _{Sp} ²	Sv [μm]	P _{Sv} ²	Sz [μm]	P _{Sz} ²	S10z [μm]	P _{S10z} ²
Cermet	1	501,6816	3	674,4098	3	26,8988	10	2,5979	2	29,4967	10	24,8226	10
	2	489,4299	2	630,2352	1	10,5892	3	2,6145	3	13,2038	2	6,2719	2
	3	550,3266	9	747,4801	9	10,5711	2	5,3538	8	15,9248	3	14,5745	4
	4	514,4996	6	649,3869	2	3,9711	1	2,8115	4	6,7826	1	5,9792	1
	5	528,9986	8	703,4477	8	21,2769	9	4,1743	5	25,4512	9	21,4878	9
	6	504,5046	4	684,1243	5	14,5954	5	5,3526	7	19,948	5	18,1909	6
	7	523,4563	7	688,4301	6	10,9689	4	5,7236	9	16,6925	4	12,3831	3
	8	485,2004	1	681,7035	4	19,9431	8	2,4997	1	22,4428	6	21,4729	8
	9	558,254	10	750,2887	10	15,2001	6	7,9035	10	23,1036	7	18,2926	7
	10	512,287	5	694,1808	7	19,3398	7	4,6314	6	23,9712	8	17,0059	5
SK	1	388,1722	3	483,679	2	3,9475	1	2,1804	1	6,1278	1	4,6842	1
	2	378,0139	1	475,2964	1	6,4644	7	3,0737	4	9,5381	4	6,1127	2
	3	380,731	2	490,3349	3	11,4275	9	2,3976	3	13,8251	9	7,7501	8
	4	405,1011	4	504,9731	4	9,2132	8	2,2505	2	11,4637	7	6,1367	3
	5	445,3112	8	570,6933	7	4,3253	2	4,1557	6	8,481	2	7,3435	4
	6	428,4767	5	545,9754	5	11,7574	10	4,2858	7	16,0432	10	7,3804	6
	7	435,4878	6	573,7257	8	5,4344	4	4,3672	8	9,8016	5	7,347	5
	8	515,2694	10	713,3322	10	5,4464	5	4,8917	9	10,3382	6	9,1443	9
	9	502,6009	9	707,5894	9	6,1011	6	6,1784	10	12,2795	8	10,5151	10
	10	437,4775	7	562,3153	6	5,1577	3	3,9224	5	9,0801	3	7,4752	7

¹ číslo popisu vzorku, viz příloha 2

² pořadí popisu vzorku podle hodnoty drsnosti povrchu (pro každý značený materiál samostatně)

σ_x - směrodatná odchylka