

Vliv změny technologických parametrů CO2 laseru na jakost obráběné plochy

Bc. Martin Chudý

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Chudý**
Osobní číslo: **T12434**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv změny technologických parametrů CO2 laseru
na jakost obráběné plochy**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární studii na dané téma (CO2 lasery, modová struktura, rozlišení DPI, parametry kvality povrchu- Ra, Rz, vlnitost)**
- 2. Provedte experimentální obrábění vybraných polymerních materiálů při změně vstupních parametrů výkonu a posuvové rychlosti pro rozlišení DPI 200, 500, 1000)**
- 3. Získané výsledky vyhodnoťte, provedte statistické vyhodnocení**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucí diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

10. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2...a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 21. 4. 2014


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá zkoumáním jakosti povrchu při vlivu změny technologických parametrů CO₂ laseru. V první části teorie se věnuji popisu laseru a jeho použití k dané problematice. V druhé části je nastíněna všeobecná problematika jakosti povrchu a módová struktura. Praktická část je věnována experimentálnímu obrábění PP a PMMA při změně vstupních parametrů výkonu a posuvové rychlosti pro rozlišení DPI 200, 500, 1000 a následnému zkoumání a měření kvality povrchu vybraného materiálu PMMA na přístroji Taylor Hobson Talysurf CLI 500.

Klíčová slova: CO₂ lasery, módová struktura, rozlišení DPI, parametry kvality povrchu - Ra, Rz, PMMA

ABSTRACT

This thesis examines the quality of the surface at the impact of a technological parameters CO₂ laser. The first part is devoted to the description of the theory of laser and its application to the issue. The second part outlines the general problem of surface quality and mode structure. The practical part is devoted to experimental machining of PP and PMMA when changing the input parameters and the performance of the feed rate for the resolution of 200 DPI, 500, 1000 and subsequent exploration and measurement of the quality of the surface of PMMA on the device Taylor Hobson Talysurf CLI 500.

Keywords: CO₂ lasers, mode structure, DPI, surface quality parameters - Ra, Rz, PMMA

Tímto bych chtěl poděkovat své vedoucí paní doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. za ochotu při měření dat a za odborné vedení a rady při vypracování mé diplomové práce. Nesmím opomenout pana doc Dr. Ing Vladimíra Patu za pomoc a cenné rady při měření dat.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 LASER.....	12
1.1 PRINCIP METODY	13
1.2 DĚLENÍ LASERŮ DLE AKTIVNÍHO PROSTŘEDÍ.....	14
1.2.1 Pevnolátkové lasery.....	16
1.2.2 Barvivoé lasery.....	17
1.2.3 Plynové lasery	18
1.2.4 Polovodičové lasery.....	19
1.3 DĚLENÍ LASERŮ DLE DALŠÍCH PARAMETRŮ	19
1.4 BEZPEČNOSTNÍ RIZIKA LASERŮ	20
1.5 CO ₂ LASER.....	20
1.6 LASEROVÉ ŘEZÁNÍ A VYŘEZÁVÁNÍ.....	24
1.7 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA PROCESU ŘEZÁNÍ LASEREM.....	25
1.8 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY OVLIVŇUJÍCÍ PROCESY	26
1.9 DRUHY LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ	27
1.9.1 3D laserové řezání	27
1.9.2 Vzdálené řezání (Remote cutting).....	28
1.10 PRINCIP LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ.....	28
1.10.1 Sublimační řezání	28
1.10.2 Tavné řezání	29
1.10.3 Oxidační řezání.....	29
1.11 VÝHODY LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ.....	29
1.11.1 Nevýhody laserového řezání	30
1.12 LASEROVÉ VRTÁNÍ.....	30
1.13 LASEROVÉ GRAVÍROVÁNÍ A LASEROVÉ ZNAČKOVÁNÍ	31
2 PARAMETRY KVALITY POVRCHU	33
2.1 TERMÍNY A DEFINICE DLE NORMY ČSN-EN-ISO-4287.....	34
2.1.1 Filtr profilu	34
2.2 DEFINICE PARAMETRŮ PROFILU POVRCHU	36
2.3 MÓDOVÁ STRUKTURA	39
2.3.1 Potlačení příčných módů oscilace	41
2.3.2 Potlačení podélných módů oscilace.....	41
2.4 ROZLIŠENÍ DPI.....	42
3 TEORIE HYPOTÉZ.....	43
3.1 STATICKÉ HYPOTÉZY	43
3.2 NULOVÁ A ALTERNATIVNÍ HYPOTÉZA	43
3.3 CHYBA I. A II. DRUHU.....	43
3.4 TESTY O SHODĚ ÚROVNĚ	45
3.4.1 T-test	45
3.4.2 F-test	45

3.4.3	Mann - Whitneyův test	45
4	CÍLE PRÁCE	46
II	PRAKTICKÁ ČÁST	47
5	POSTUP PRÁCE A PŘÍSTROJE POUŽITÉ PŘI MĚŘENÍ	48
5.1	LASER ILS 3NM	48
5.2	PŘÍPRAVA A POSTUP PRÁCE NA LASERU	49
5.3	MIKROSKOP CARL ZEISS JENA	54
5.4	MIKROSKOP LEICA DMI3000 M	59
5.5	DRSNOMĚR TAYLOR HOBSON TALYSURF CLI 500	62
5.6	MĚŘENÍ DRSNOSTI	63
6	VYHODNOCENÍ DAT A DISKUZE VÝSLEDKŮ	67
6.1	VOLBA MATERIÁLU	67
6.2	VYHODNOCENÍ DRSNOSTI	67
6.3	MATERIÁLOVÝ PODÍL DRSNOSTI PROFILU RMR	82
6.4	MANN - WHITNEYŮV TEST	89
	ZÁVĚR	91
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	92
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	94
	SEZNAM OBRÁZKŮ	95
	SEZNAM TABULEK	98

ÚVOD

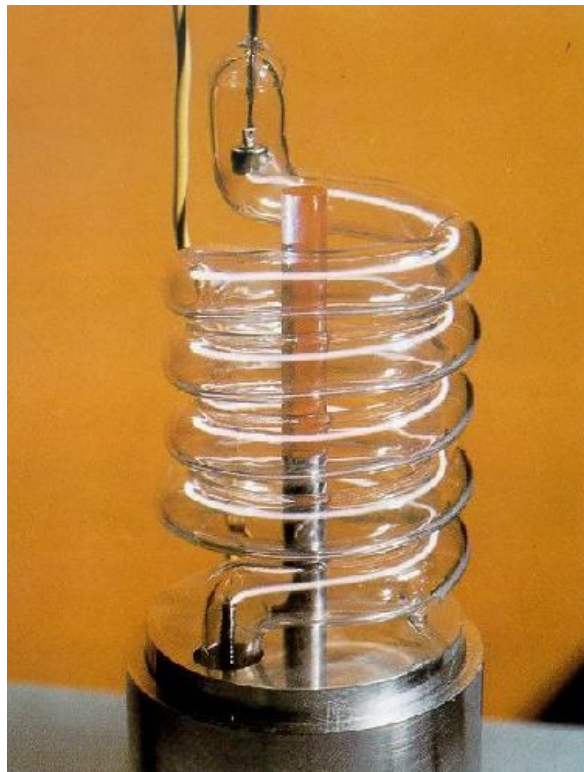
Laserové technologie patří do oblasti nekonvenčních technologií, kdy nedochází k mechanickému úběru materiálu, ale k fyzikálnímu. Nevzniká klasická tříška, jak u technologie s použitím řezných nástrojů. Nekonvenční technologie využíváme tam, kde běžné obrábění je těžko proveditelné nebo je nemožné či ekonomicky náročné. Jedná se o mladou technologii oproti jiným metodám. Laser byl vynalezen ve dvacátém století a za padesát let své existence se stal nedílnou součástí našeho života. Český výraz pro laser je kvantový generátor světla. Z názvu je zřejmé, že laser je zařízení, které vydává světlo. Od běžného světla se však liší tím, že je jednobarevné, uspořádané a má malou rozbíhavost. Koherentní (uspořádané) světlo má jedinou frekvenci a fázi a lze je přirovnat k pochodujícímu útvaru, zatímco nekoherentní světlo k chaotickému pohybu.

Činnost laseru je založena na principu indukované emise, který Albert Einstein předpověděl již v roce 1916. Anglický fyzik Paul Adrien Maurice Dirac učinil koncem 20. let detailnější matematickou analýzu kvantové teorie záření a dále rozvinul Einsteinovy myšlenky. Poté v roce 1958 provedl Charles Hard Townes se svými spolupracovníky správné výpočty, které umožnily tuto myšlenku realizovat. Od té doby procházel laser neustálým vývojem. Jednotlivé typy se také postupem času zdokonalovaly a vylepšovaly se jejich parametry.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LASER

Současné lasery mohou být založeny na kvantových přechodech v plynech, pevných látkách, kapalinách, plazmatu nebo mohou využívat polovodiče i relativistické elektronové svazky. První funkční laser (Maiman 1960) byl pevnolátkový, jako aktivní prostředí využíval krystal rubínu buzený světlem výbojky. Na obr. 1. je snímek tohoto historického zařízení, jež spustilo lavinu laserových technologií. V centrální části snímku lze vidět tyčinku vybroušenou z krystalu rubínu, jež je buzena výbojkou ve tvaru spirály.



Obr. 1. První funkční laser. [1]

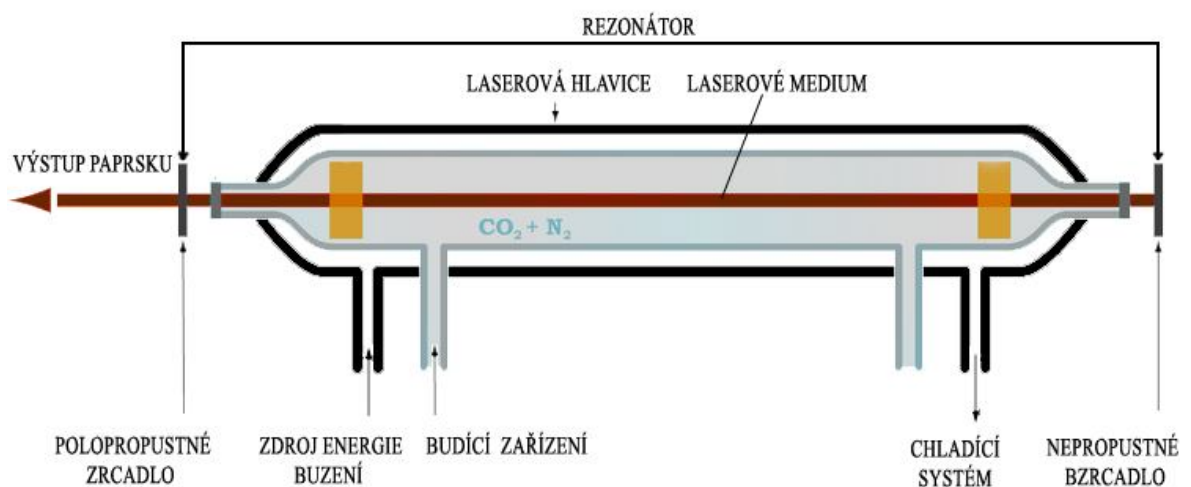
I přesto že laser je mladý vynález, tak se s ním můžeme potkat na každém kroku a ani to mnohdy nepoznáme. Jeho využití tedy můžeme najít ve strojírenství, kde je hlavně využíván pro obrábění, ve stavebnictví pro měření vzdáleností, ve zdravotnictví pro složité operační zákroky, v cukrářství pro řezání cukroví dále je aplikován ve vojenském průmyslu a další.

V průmyslu se začalo využívat laserové záření téměř ihned po sestrojení prvního laseru. Soustředěný laserový paprsek je schopen zpracovávat kovové i nekovové materiály s bezkonkurenční kvalitou a zcela novými technologickými postupy. Do tohoto odvětví patří dnes mnoho nových oborů zahrnujících laserové svařování, vrtání, řezání, dekorace skla,

rýhování, žihání, naprašování a další. Základní předností laserových technologických operací je možnost opracování bez mechanického kontaktu s výrobkem (opracování na dálku, v ochranné atmosféře), možnost opracování obtížně přístupných částí materiálu a technologické zpracování materiálů, které klasickými metodami nelze provést.

1.1 Princip metody

Laser funguje na principu indukované emise, tedy vynuceného záření. Záření dopadá na atom prvku a tím vzniká indukovaná emise. Záření přiměje elektron obíhající kolem jádra pojmout energii a tím vystoupat na vyšší oběžnou dráhu. Rovnováha sil v atomu a přijetí atomu další energie přinutí elektron vrátit se na svoji původní oběžnou dráhu a vyzářit přijatou energii zpět do prostoru. Vzniká monochromatické záření, které má jednu přesně definovanou vlnovou délku a zároveň koherentní záření, kdy se náležející částice fotonu ve svazku pohybují jedním směrem, jsou v jeho průřezu velmi pravidelně rozděleny až stejnoměrně. [2]

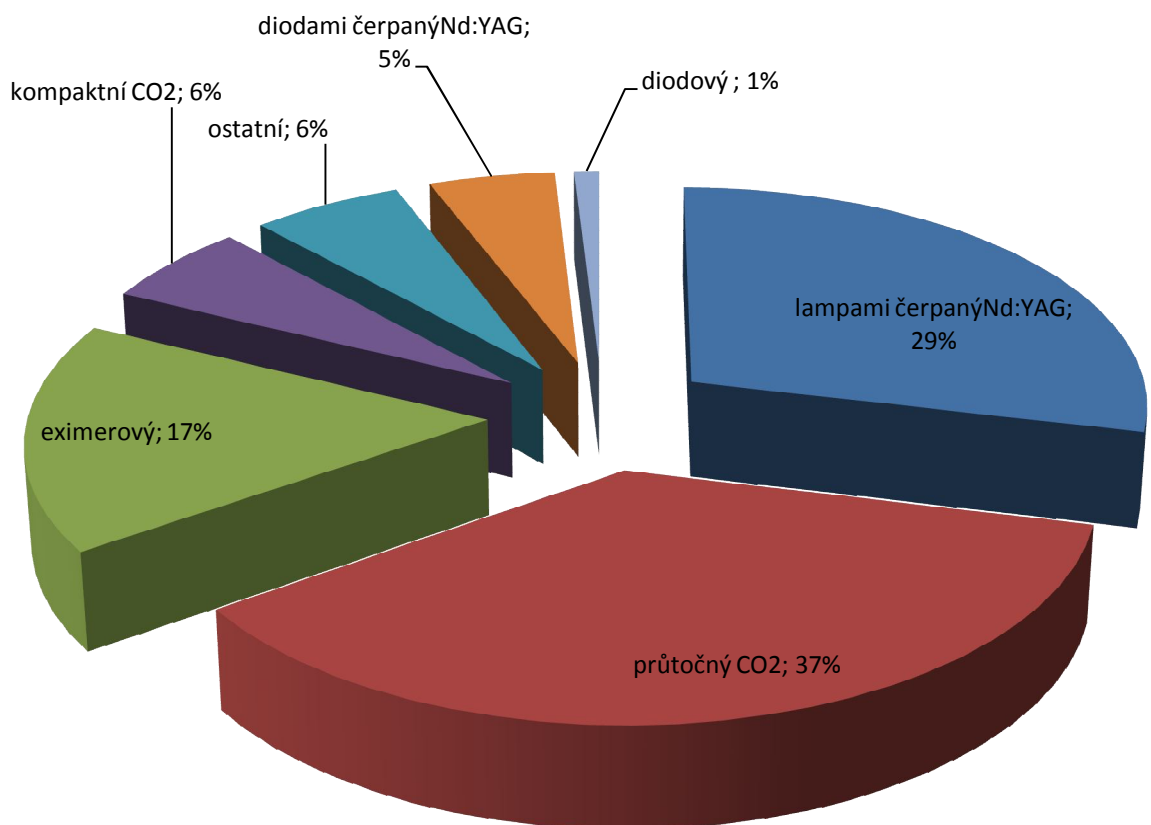


Obr. 2. Schéma zařízení obrábění laserem. [2]

1.2 Dělení laserů dle aktivního prostředí

- pevnolátkové
- barvivové
- plynové
- polovodičové

V porovnání s ostatními druhy jsou nejvíce používané CO₂ lasery, které jsou využívány skoro z jedné poloviny (43%) a Nd:YAG lasery (přes 34%). S těmito dvěma lasery se můžeme prakticky setkat v každé metodě obrábění laserem. Procentuální zastoupení je v grafu.



Obr. 3. Procentuální zastoupení laserů.

Tab. 1. Charakteristika jednotlivých laserů. [3]

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast
Pevnolátkové			
Rubínový	Rubín	694,3 nm	červená
Nd:YAG	Neodym, YAG	1064 nm	IR
Ho:YAG	Ho:YAG	2,1 μm	IR
Er:YAG	Erbium, YAG	2,94 μm	IR
Titan-safírový	Titan, safír	690 - 1000 nm	červená, IR
Alexandritový	Alexandrit	700 - 800 nm	červená, IR
Barvivové			
Rhodamin 6G	Rhodamin 6G	570-650 nm	žlutá, oranžová, červená
Kumarin C30	Kumarin C30	504 nm	zelená
Plynové – Atomární			
He-Ne	helium, neon	543 nm, 633 nm	zelená, červená
Měděný	měď	510 nm, 578 nm	zelená
Jodový	jód	342 nm, 612 nm, 1315 nm	viditelné, IR
Xenonový	Xenon, neon, helium	140 vlnových délek	viditelné, IR
Plynové – Iontové			
Argonový	Argon	488 nm, 514 nm	modrá, zelená
Hélium-kadmiový	Helium Kadmium	325 nm, 442 nm	UV, modrá
Plynové – Molekulární			
Vodíkový	vodík	100 - 120nm, 140 - 165nm	UV
CO ₂	Oxid uhličitý	10,6 μm	IR
CO	Oxid uhelnatý	5 - 6,5 μm	IR
Excimerové	ArF, KrCl, KrF, XeCl, XeF	193 - 351 nm	UV
Dusíkový	dusík	337 nm	UV
Polovodičové			
GaAs	GaAs	650 nm, 840 nm	červená, IR
GaAlAs	GaAlAs	670-830 nm	červená
AlGaInP	AlGaInP	650 nm	červená
GaN	GaN	405 nm	modrá
InGaAlP	InGaAlP	630-685 nm	červená

1.2.1 Pevnolátkové lasery

Základní části laseru tvoří rezonátor s aktivní látkou, zdroj čerpání, optický systém, napájecí zdroj a spouštěcí obvod.

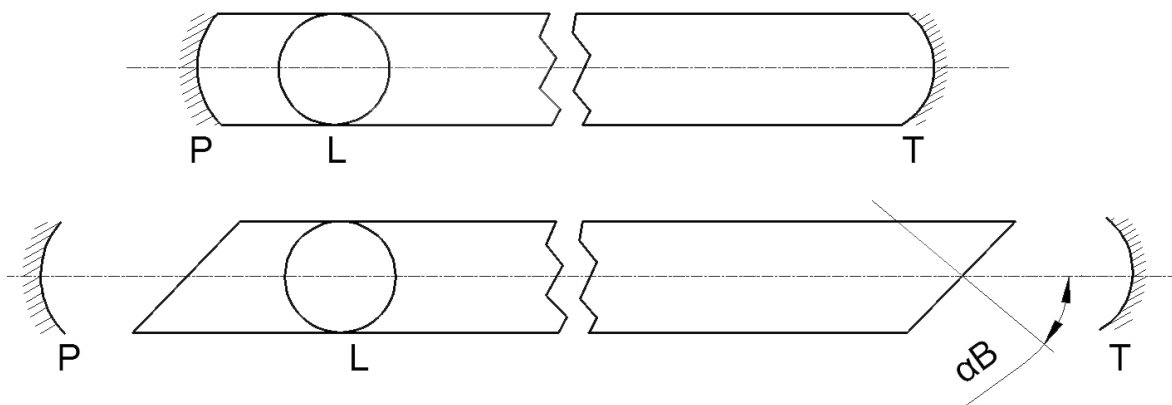
Jako aktivní prostředí se používají pevné krystalické nebo amorfni látky, do kterých se přidávají příměsi aktivačních prvků. Pevná fáze tvoří kostru aktivnímu prostředí. K vlastnímu optickému zesilování dochází na elektronových přechodech iontů příměsí, kdy jejich koncentrace nepřekročí 1%.

Aktivní prostředí musí splňovat několik podmínek, které vyplývají z fyzikálních procesů uskutečněných v laseru:

- Příměsové atomy musí mít v aktivní látce takový systém energetických hladin, který dovoluje uskutečňovat velkou inverzní populaci. Inverzní populace je takový fyzikální stav soustavy, ve kterém došlo k obsazení energetických hladin částicemi, které neodpovídá rovnovážnému rozdělení.
- Aktivní látka musí mít tak široké absorpční pásmo, aby efektivně pohlcovala energii získanou ze zdroje.
- Pravděpodobnost zářivých indukovaných přechodů musí být dostatečně velká na pracovní frekvenci.
- Hodnota nerezonančních ztrát musí být minimální, tzn. má být opticky homogenní, má mít malé množství defektů a nežádoucích příměsí, které absorbují a rozptylují záření na frekvenci oscilací.

Vhodné aktivátory jsou některé prvky skupiny železa - chrom, kobalt, nikl; vzácné prvky - lantanidy: neodym, samarium, europium, gadolinium, yterbium, holmium, tulium, dysprosium; skupina aktinidů: uran a thorium. [4]

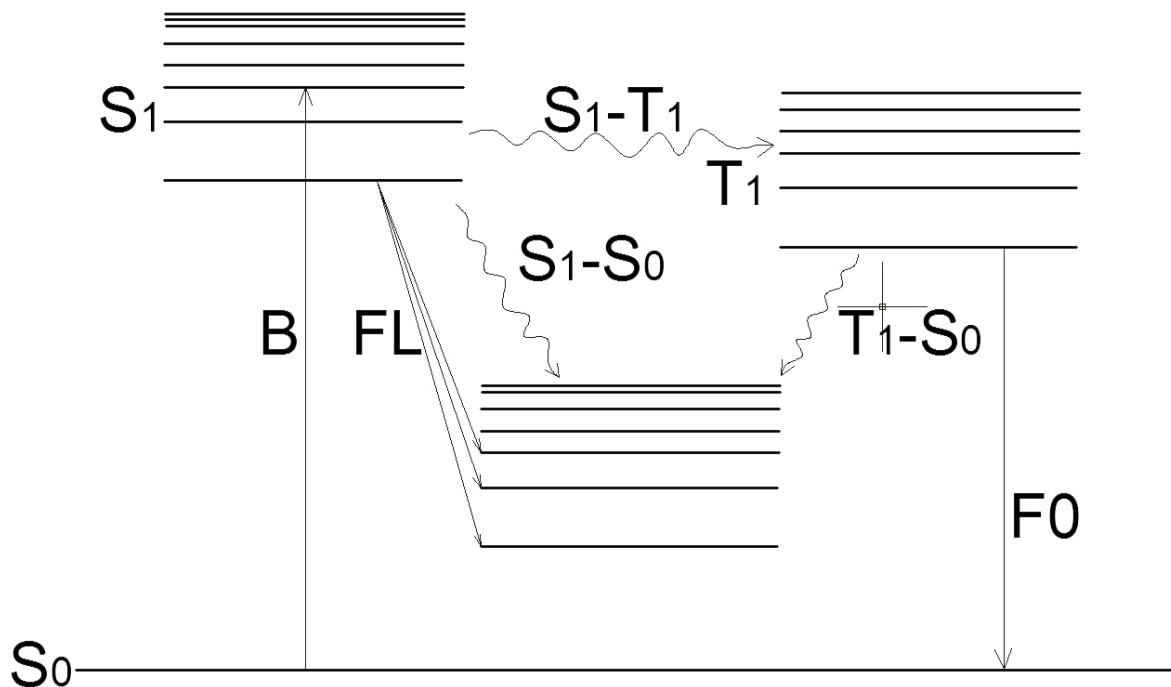
Aktivní prostředí z těchto materiálů se obvykle uzpůsobuje do tvaru válečku, jelikož se přizpůsobuje tvarem optickému rezonátoru. Jestliže jsou zakončení válečků zbroušena a vyleštěna s velkou přesností kolmo na optickou osu, tak tvoří planparalelní konce vlastní rezonátor. Kolmé nabroušené vrstvy se opatří odraznými vrstvami, které se vytváří napařením kovů, anebo selektivně odrazné dielektrické vrstvy. Konce válečků se můžou zkosit i pod Brewsterovým úhlem a váleček se vloží do vnějšího rezonátoru. [5]



Obr. 4. Konfigurace pevnolátkového laseru: L - laserový válcový krystal, P, T - polopropustné odrazné zrcadlo, α_B - Brewsterův úhel. [5]

1.2.2 Barvivové lasery

Aktivní prostředí je tvořeno roztoky organických barviv. Jejich důležitost je v excitaci velkého pásma přeladitelnosti. Buzení se provádí jenom opticky a probíhá na přechodu z S_0 na S_1 .



Obr. 5. Energetické hladiny v barvivu: S - singletní stavy, T - tripletní stavy, B - buzení, FL - fluorescence, FO - fosforescence. [5]

1.2.3 Plynové lasery

Patří mezi nejvíce využívané lasery, jako aktivní látku využívají plyny a jejich směsi. Plynový stav je charakterizován jako soubor částic s kvantovými energetickými hladinami s malou vzájemnou interakcí. Částice jsou v translačním pohybu, což se ukáže na povaze emisních i absorpčních čarách. Při pohledu na emisi a absorpci izolovaných částic, zjistíme, že šířka emisních i absorpčních čar je hodně malá. Označuje se jako přirozená šířka čáry a její tvar je popisován Lorentzovou funkcí.

Pokrývají široké spektrum vlnových délek od ultrafialové přes viditelnou, infračervenou až po submilimetrovou, milimetrovou a metrovou oblast. Výkony, s nimiž pracují, se pohybují od mW až po desítky kW v kontinuálním režimu až do stovek TW v impulzivním režimu.

Podle způsobu čerpání se dělí na:

- lasery s přímým čerpáním
- dynamické plynové lasery
- fotodisociační lasery
- chemické lasery
- excimerové lasery [5]

Aktivní prostředí plynových laserů je složeno z atomů plynů uzavřených ve směsi s dalšími plyny ve skleněné trubici. Nevýhodou je obtížné nastavování zrcadel. Při pokrytí konců trubice odrazovou vrstvou, vznikají problémy s přesným nastavením zrcadel a zabráněním vnitřním odrazům. Využíváme zde fyzikálního jevu: Dopadá-li světlo na rozhraní pod Brewsterovým úhlem, potom je-li polarizováno kolmo k rovině dopadu, prochází rozhraním bez odrazu. Při zkosení konců trubice pod tímto úhlem, bude laserový paprsek vycházet z trubice, které se nebude na koncích odrážet a rezonátor vytvoříme soustavou vnějších nastavitelných zrcadel. [6]

1.2.4 Polovodičové lasery

Jsou označovány také jako laserové diody. Jako aktivní prostředí je zde využíváno okolí PN přechodu a dochází zde k injekci elektronů a děr. Doba života elektronů a děr je pro polovodičové materiály jen několik nanosekund. Poté dojde k rekombinaci spolu s vyzářením fotonu v náhodném směru i fázi a polarizaci. Jestliže do prostředí přijde foton s energií rovnou rozdílu příslušných energetických hladin ještě předtím, než dojde k rekombinaci, tak nastává stimulovaná emise. V tomto případě takový foton stimuluje přechod elektronu do nižší energetické hladiny, a tedy i emisi dalšího fotonu, tentokrát stejného směru, fáze i polarizace jako má foton stimulující. Důležitým parametrem laserové diody souvisejícím se stimulovanou emisí je tzv. prahový proud. Pokud jsme pod hodnotou prahového proudu, tak dochází pouze ke spontánní emisi a ke generaci nekoherentního záření. Pokud dosáhneme této hodnoty, tak prudce stoupá výkon polovodičového laseru, a tím dochází ke stimulované emisi a produkuje se koherentní záření. Hodnoty prahového proudu se pohybují v rozmezí 40-250 mA a prahové napětí je 1,8 V. Prahový proud roste s teplotou a to zhruba 15 % na 1 °C. [3]

1.3 Dělení laserů dle dalších parametrů

dle vlnové délky:

- infračervené lasery
- lasery viditelného pásma
- ultrafialové lasery
- rentgenové lasery

dle délky generovaného impulsu:

- kontinuální lasery
- pulzní

dle kvantových přechodů:

- molekulární lasery
- elektronové lasery

- jaderné lasery

dle typu čerpání:

- elektrickým výbojem: CO₂
- opticky
- chemicky
- tepelnými změnami
- injekcí nosičů náboje
- elektronovým svazkem
- rekombinací

dle oblasti použití:

- technologické
- měřicí
- výzkumné
- lékařské
- energetické
- vojenské

1.4 Bezpečnostní rizika laserů

- Třída I - žádné následky - možný trvalý pohled do svazku paprsků
- Třída II - žádné následky - oko je chráněno mrkacím reflexem
- Třída III - a) možné poškození při použití optiky
b) poškození oka - nutno používat ochranné pomůcky, emise do 0,5 W
- Třída IV - totožné s třídou IIIb, ale pro emise nad 0,5 W [3]

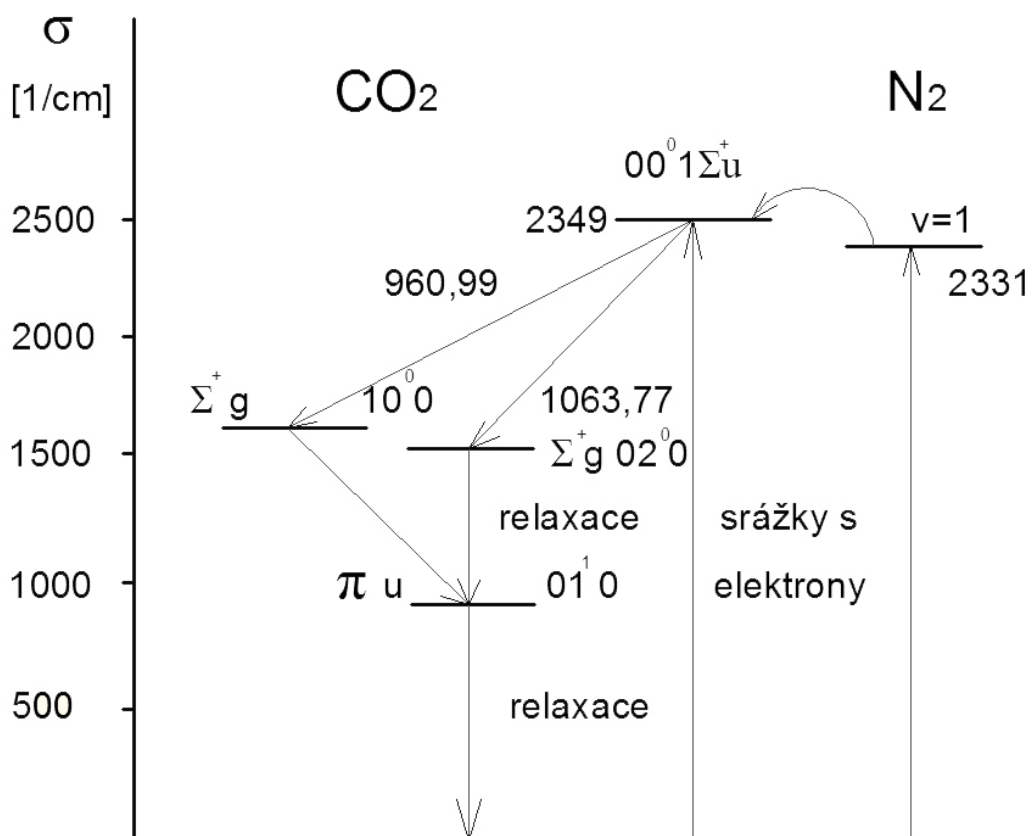
1.5 CO₂ laser

CO₂ laser patří mezi nejstarší plynové lasery a je stále nejpoužívanější. Jedná se o molekulární laser s pracovním plynem oxidem uhličitým, který patří mezi nejvýkonnější plynový

laser s velkou účinností (20%). CO₂ laser vytváří infračervené záření o několika vlnových délkách 9,4 a 10,6 μm, které lze oddělit optickým hranolem.

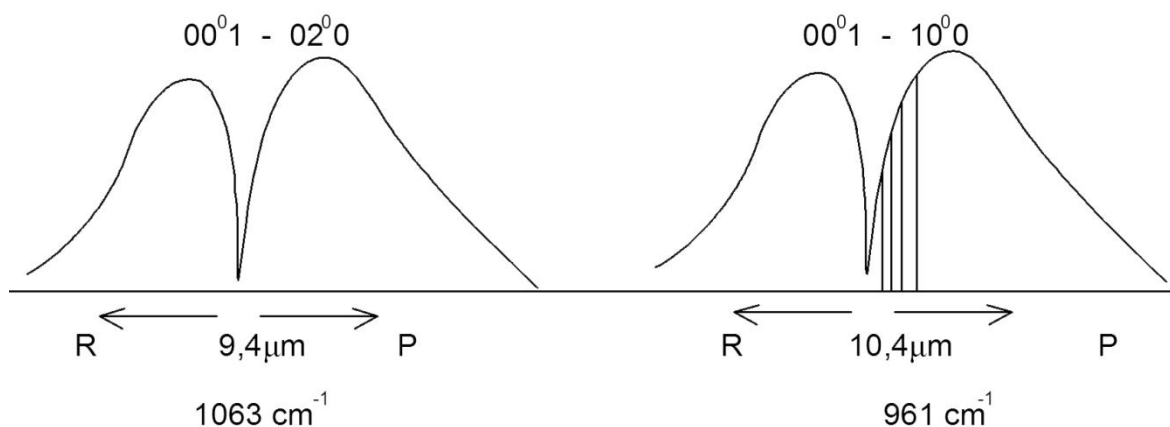
Aktivní prostředí tvoří CO₂:N₂:H₂:He. Poměry těchto prvků se mohou u jednotlivých laserů lišit. Ke stimulované emisi dochází v molekulách CO₂, další plyny zlepšují podmínky vzniku inverzní populace. Při optimálních parametrech laseru můžeme dosáhnout výkonu 50 – 75 W na 1 m délky výboje s účinností 10%. Zvětšením délky aktivního prostředí se zvýší i výkon. [7]

K zesílení se využívá přechodů mezi vibračními hladinami molekuly, tudíž je generováno záření v oblasti infračerveného spektra. Mechanismus buzení lze vysvětlit na zjednodušeném schématu energetických hladin molekuly CO₂ s spolu s hladinou významné příměsi dusíku. Buzení horní laserové hladiny (antisymetrická valenční vibrace 00⁰1) má velkou pravděpodobnost, takže při buzení srážkou s elektrony v doutnavém výboji může dojít k inverzní populaci mezi ní a hladinou symetrické valenční vibrace 10⁰0 (přechod 00⁰1 → 10⁰0) nebo hladinou druhé harmonické 02⁰0 (přechod 00⁰1 → 02⁰0). Vyprazdňování spodních laserových hladin postupuje přes deformační vibraci 01¹0. [5]



Obr. 6. Schéma energetických hladin CO₂. [5]

Energetické vibrační hladiny jsou doplněny hladinami odpovídajícími rotací molekul, protože se jedná o molekulární plyn. Z toho vyplývá, že CO_2 emituje na rotačně-vibračních přechodech. V důsledku symetrie molekuly se mezi emisními čarami přechodů $00^01 \rightarrow 10^01$ nebo $00^01 \rightarrow 02^00$ neobjeví větve Q (rotační kvantové číslo je neměnné), ale jen větve P ($\Delta J=+1$) a R ($\Delta J=-1$). Spektrum záření emitovaného CO_2 laserem je složeno z četného množství čar obou rotačně-vibračních přechodů. Jelikož je molekula CO_2 symetrická, tak jsou dovoleny pouze přechody na hladiny se sudými rotačními kvantovými čísly. Největší intenzitu má čára P(22) / R(22), to jsou čáry nacházejí se blízko středu pásu. Intenzita čar s velkými rotačními kvantovými čísly je nižší. [5]

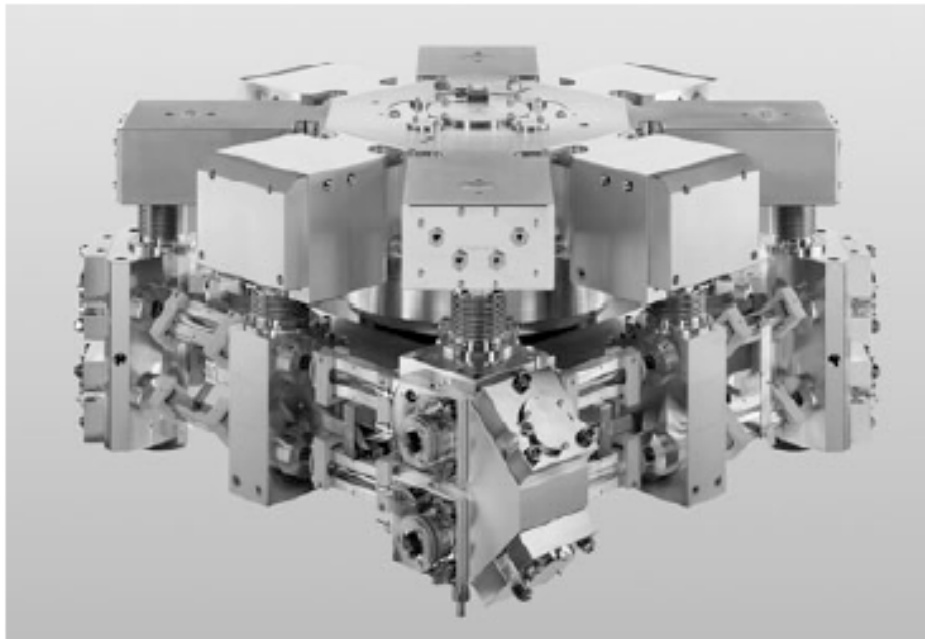


Obr. 7. Průběh intenzity emisních čar CO_2 laseru. [5]

Konstrukce laseru je tvořena 2 trubicemi, kde ve vnitřní trubici je CO_2 . Tento plyn je iniciován vysokým napětím a dochází k výboji. Nezbytné je použití zrcátka s polarizátorem, což jsou poměrně drahé optické prvky. Laser produkuje IR záření $10,6 \mu\text{m}$, právě proto je problém v optice. Běžné optické materiály, jako je sklo, jsou pro toto záření nepropustné, proto se používají drahé optické součásti, např. z prvků ZnSe, polovodičů atd. Polarizátor a odrazové zrcadlo jsou podmínkou pro správnou funkci laseru.

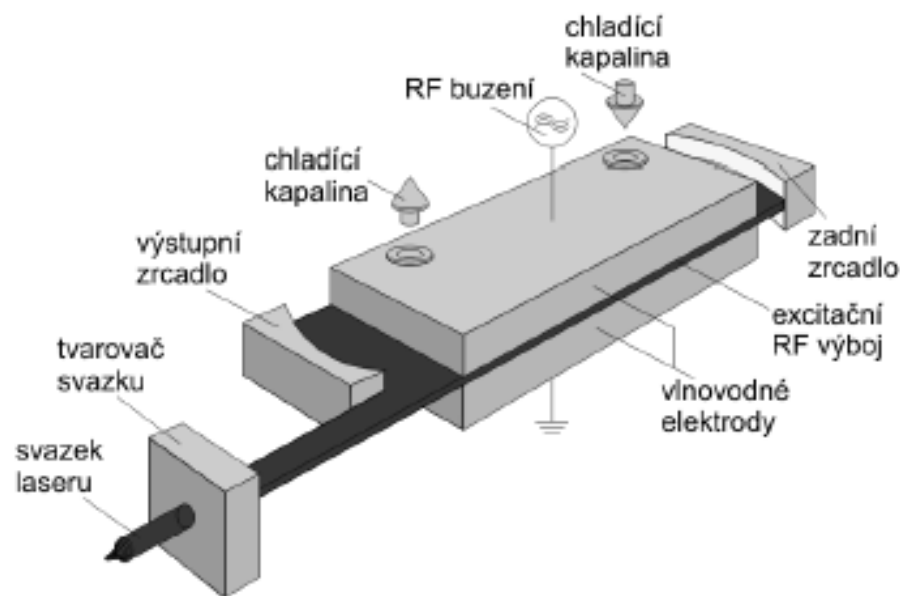
Trubicí je velice snadné sestavit. Vnitřní trubice obsahuje CO_2 plyn, o tlaku $1,5 \text{ kPa}$. Pro uvedení laseru do činnosti je potřeba vakuovou pumpu. Z vnitřní trubice vysajeme vzduch a z druhé strany začneme napouštět CO_2 . Vnější trubice obsahuje chladicí médium – vodní průtokové chlazení. Na koncích je přivedeno vysoké napětí, které iniciuje CO_2 . [8]

Nejmodernější CO₂ lasery jsou zdokonalovány s cílem zvýšit účinnost systému a kvalitu svazku. Několik metru dlouhé výbojové trubice laseru s příčným prouděním jsou rozděleny na kratší segmenty a pomocí odrazných zrcadel sestaveny do kompaktního čtvercového tvaru, příkladem je patentovaný tvar rezonátoru laseru TruFLOW od firmy Trumpf GmbH (Obr. 8).



Obr. 8. TruFLOW rezonátor. [9]

Pro výkony 1 kW až 2,5 kW je vyvinuta moderní konstrukce „SLAB“ – difusně chlazeného deskového laseru (Obr. 9). Není nutný vnější zdroj plynové směsi, zásobník s obsahem 10 litru vystačí na 12 měsíců neustálého provozu, směs v rezonátoru je obnovována po 72 hodinách provozu. [9]



Obr. 9. Schéma SLAB laseru. [9]

1.6 Laserové řezání a vyřezávání

Kvalita laserového paprsku je důležitá při řezání, z toho důvodu používáme vysoce fokuzovaný paprsek, který je charakteristický základním módem (Gaussova křivka). Tím je dosaženo optimálního rozdělení energie o výkonech kolem 2 kW. Lasery o výkonech vyšším než 3 kW pracují se svazkem s vyšším módem.

Laserové řezání používáme v případě, kdy musíme oddělit materiál s malou tepelnou vodivostí. Průmyslové aplikace požadující vyříznutí materiálu do složitého tvaru, řezání se zvýšenou přesností a v malých nebo často se měnících sériích jsou ideální pro použití řezacích laserů. V místě dopadu laserového paprsku se materiál taví a je z řezu „odfukován“ proudem inertního plynu. Při této metodě je důležité odpařit materiál co nejrychleji, a taky zachovat co nejmenší oblast zasaženou tepelnými účinky. U této metody nevzniká téměř žádný řezný odpad, tudíž není zapotřebí velký zásobník odpadu. Materiál při řezání není třeba upínat, jelikož vyřezáváme z velkých ocelových tabulí. A proto jediný odpad, se kterým musíme neustále pracovat, jsou ořezané plechy (obvodový rozměr je pořád stejný, pouze vyřezaný).

Mezi nepoužívanějšími lasery patří kontinuální CO₂ lasery se středním výkonem do 15 kW. Pro řezání kovů se přivádějí reaktivní plyny, jako např. kyslík. Dochází pak k exotermické reakci, která urychluje proces řezání. Tímto způsobem jsou řezány - oceli

s nízkým obsahem uhlíku, nelegovaná ocel, titan, vysoce legovaná ocel, hliník a nerezové oceli. Při řezání nekovových materiálů - dřevo, keramika či plasty, je na místo řezání přiváděn inertní plyn, sloužící pouze k odstraňování roztaveného a odpařeného materiálu. Takto se dají s vysokou přesností řezat i křehké nebo snadno deformovatelné materiály, například textil, papír a sklo. Šířka řezné spáry se pohybuje mezi 0,2 až 0,5 mm. Pro kvalitní povrch řezu je také důležitá fokusace a poloha ohniska. [9]



Obr. 10. Laserové vyřezání překližky na CO₂ laseru.

1.7 Základní charakteristika procesu řezání laserem

Možnost využití řezání laserem je závislé zvláště na světelné absorpci materiálu. Nekovové materiály – keramika, dřevo, pryž, umělé hmoty absorbují svazek laserového záření dobře, kovové materiály mají tuto schopnost omezenější. Materiály, které mají silnou odrazivost světelného záření – hliník či měď se řezou obtížně. [10]

Dělit technické materiály bez ohledu na jejich tepelné, fyzikální a chemické vlastnosti můžeme díky vysoké koncentraci energie. Fokuseovaný laserový svazek fotonů dopadne na materiál a ohřeje ho na teplotu varu a okolní materiál je nataven. Ovlivněná zóna je velmi malá. Pracovní plyn umožňuje odstranění par kovů a taveniny z oblasti řezu při řezání ma-

teriálů. Plyn proudí za vysokého tlaku výstupní řezací tryskou kolem svazku fotonů. Řezací tryska je od povrchu materiálu velmi málo vzdálená - do 1 mm a je sledována kapacitním nebo dotykovým čidlem. [11]

1.8 Základní charakteristiky ovlivňující procesy

1. Parametry materiálové - fyzikálně-chemické vlastnosti

- typ materiálu
- termo-fyzikální vlastnosti
- geometrie obrobku

2. Rychlost řezání závisí na - výstupním výkonu paprsku laseru

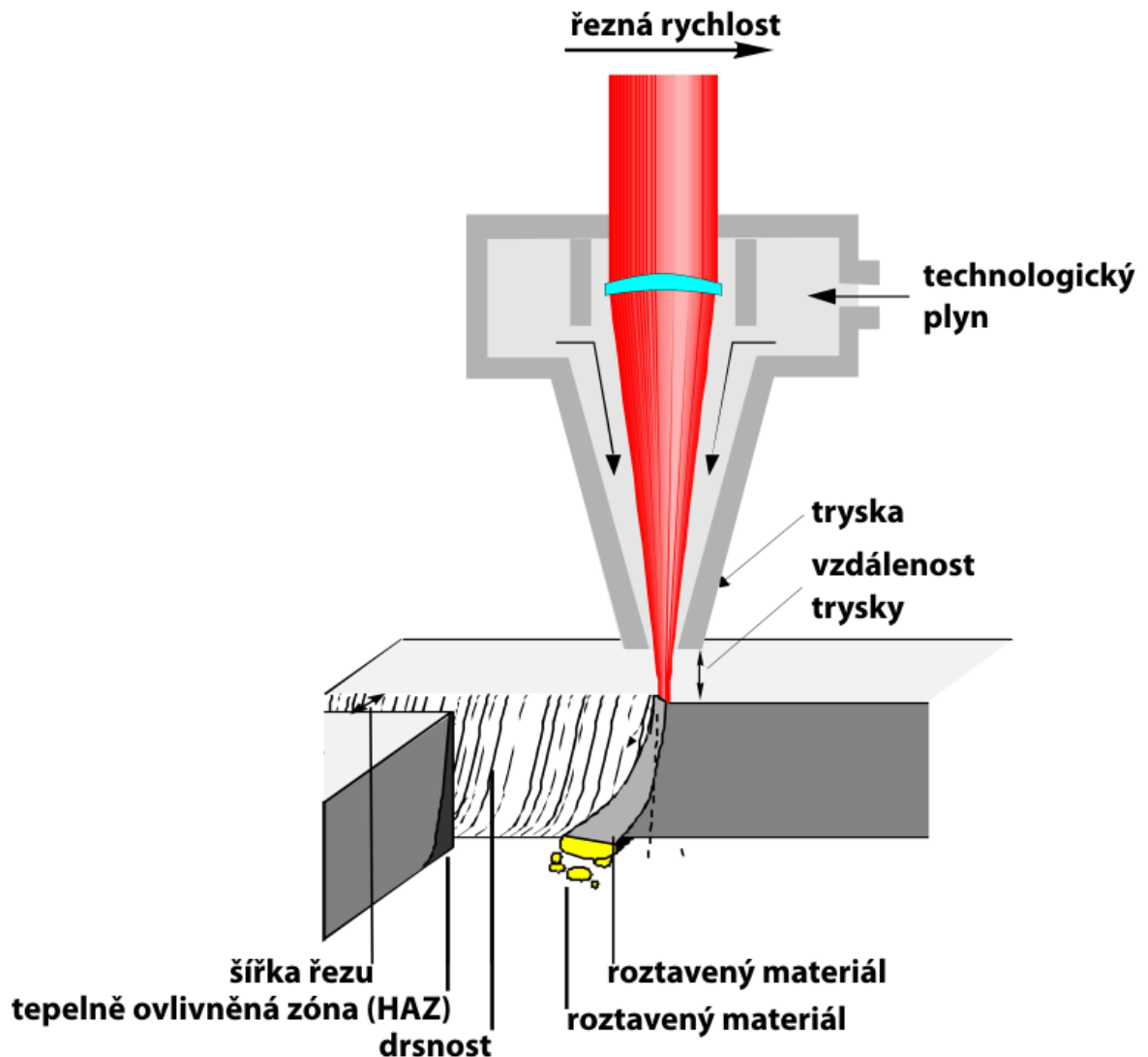
- způsobu řezání
- tloušťce a druhu řezaného materiálu
- požadované kvalitě řezu

3. Kvalita řezu - závisí na jakosti řezané plochy

- drsnost, kterou můžeme získat = Ra 3,6 až 12 mm
- tloušťka tepelně ovlivněné oblasti = 0,05 až 0,2 mm

4. Šířka řezné spáry - je dána druhem a tloušťkou řezaného materiálu, druhem laseru

- bývá 0,02 až 0,2 mm. [12]



Obr. 11. Schéma úběru materiálu při laserovém řezání. [13]

1.9 Druhy laserového řezání

1.9.1 3D laserové řezání

Pro prostorové řezání se využívají vláknové lasery. Laserová řezací hlava je umístěna na přírubě poslední osy robota, kde je laserový paprsek přiváděn optickým vláknem. V případě vyřezávání přesných otvorů ve 3D je možné umístit řezací hlavu do autonomního souřadnicového X-Y polohovadla, které při zastavení robota v příslušné poloze zajišťuje vyřezávání přesných otvorů. [14]

1.9.2 Vzdálené řezání (Remote cutting)

Při této technologii je umístěna dvouosá skenovací hlava vysoko nad obrokem. A to 1 až 2 metry. Před skenovací hlavou je dynamický expandér, který zajišťuje optimální nastavení velikosti řezného bodu. K rozmtání paprsku po řezné ploše dochází vychylováním paprsku dvěma galvoskenery ve skenovací hlavě, která samotná během procesu řezání zůstává na stejném místě.

1.10 Princip laserového řezání

Při vlastním procesu řezání laserem v podstatě dochází ke třem různým procesům. Ve většině případů při laserovém řezání dochází ke kombinaci některých z těchto tří procesů:

- sublimační řezání
- tavné řezání
- řezání plamenem

1.10.1 Sublimační řezání

Materiál je z místa řezu odpařován za vysoké intenzity laserového záření. Vzniklé kovové páry jsou odfukovány z řezu asistenčním plynem. Jako asistenční plyn se používá dusík či argon, kdy nedochází k oxidaci materiálu. Řez je kvalitní, hladký a bez otřepů, jelikož nedochází k tavení materiálu. [14]

Pro minimální oblast tavné zóny, která vzniká na hraně řezu, je důležitá vysoká hustota energie laserového paprsku. Současně se kontroluje tloušťka řezaného materiálu. Hodnota nesmí překročit průměr paprsku, kdyby se tak stalo, páry by mohly zkondenzovat a znovu svařit řez. Což platí u materiálů, u kterých se vytváří tuhá fáze. Tato omezení neplatí u materiálů, která se netaví – dřevo, keramika aj. U sublimačního řezání je podstatné pečlivé nastavení optiky v závislosti na tloušťce řezaného materiálu. Maximální řezná rychlost je nepřímou úměrná odpařovacímu teplu materiálu a přímo úměrná rychlosti proudění řezného plynu. [15]

1.10.2 Tavné řezání

Při tavném řezání využíváme nižších výkonů než u sublimačního řezání, protože dochází k tavení materiálu, který je z řezné spáry odfukován proudem inertního plynu. Inertní plyn se na vlastním procesu řezání nepodílí. Maximální řezná rychlost se zvyšuje lineárně s výkonem laseru a snižuje se lineárně s tloušťkou řezaného materiálu a s jeho teplotou. Laserový paprsek je jen poněkud málo absorbován. Tavné řezání využíváme hlavně k vytváření neoxidovaných řezů kovových materiálů - u nerezových ocelí, hliníku, mosazi, mědi a pozinkovaného plechu. Při použití jako inertního plynu dusíku s vysokou čistotou a vysokým tlakem 1 - 2 MPa na trysce, získáme kovové lesklé řezné plochy, které nemusíme už dále upravovat. Podle kvality řezaného materiálu se mohou na spodní hraně řezu objevit otřepy, které se musí odstranit. [14]

1.10.3 Oxidační řezání

Při této metodě využíváme vysokých řezných rychlostí, proto se oxidační řezání používá u řezání běžných a konstrukčních ocelí. Na rozdíl od sublimačního či tavného řezání jsou řezné rychlosti dvakrát vyšší. Jako asistenční plyn se používá kyslík. Materiál je zahřát na teplotu vyšší než zápalnou, dojde k exotermické reakci, která dodává energii procesu řezání. Díky tomuto efektu lze dosáhnout u konstrukčních ocelí vysokých rychlostí řezu. Oxidační řezání není vhodné pro zhotovování ostrých geometrických tvarů, malých otvorů. Kvalita řezu je horší, s vyšší drsností a s větším tepelně ovlivněným pásmem. Celkově je řez širší, ale stále dostačující pro většinu aplikací. [13]

1.11 Výhody laserového řezání

- vysoká rychlost
- řezání i složitých tvarů
- možnost automatizace
- bezkontaktní působení
- dobrá kvalita řezu
- nepatrná šířka řezu a malá zóna tepelného působení
- žádné opotřebení nástroje
- čisté řezy, bez otřepů

- hospodárnost i při malých výrobních sériích
- přesnost
- minimální nároky na upnutí polotovaru

1.11.1 Nevýhody laserového řezání

- vysoké pořizovací náklady
- omezení v tloušťce řezaného materiálu
- omezení při řezání některých materiálů (PVC, PCB)
- nutnost přesného řízení vzdálenosti k povrchu obrobku
- u některých materiálů může dojít k opálení řezné hrany
- u lesklých povrchů je snížena stabilita procesu řezání
- menší účinnost (CO₂ - laser max. 25 %)

1.12 Laserové vrtání

Vrtání malých otvorů je jedna z prvních aplikací, pro kterou byl laser použit. S pomocí impulsního laseru s výstupní energií 1 J se povedlo vypálit kruhový otvor do tenké kovové folie jedním impulsem. Otvory se vrtají i do nekovových materiálů, u rubínových ložisek hodiniek se využívá rubínového laseru v impulsním režimu s opakovací frekvencí 1 Hz. Kvalita otvoru je perfektní. Stejným způsobem se vrtají otvory průvlaků do diamantů, které slouží k tažení jemných drátků. U materiálů, které mají silnou absorpci a malou tepelnou vodivost, se používají kontinuální lasery. Pro vypalování do křemenu se používají kontinuální CO₂ lasery s výkonem několik wattů. Vrtání o průměru 0,05 - 0,2 mm a tloušťce 1 mm zabere při fokusaci jednoduchou čočkou 2 - 3 sekundy. Při vrtání otvorů do skla, vznikají velké teplotní změny, což způsobuje jeho praskání. Z toho důvodu se k lokálnímu ohřevu využívá impulsní laser. Při mikroohřevu skla dochází k odštěpení malých úlomků za působení pnutí. [5]



Obr. 12. Produkty vyráběné laserovým vrtáním. [14]

1.13 Laserové gravírování a laserové značkování

Laserové značení, značkování je založeno na místním odpaření materiálu nebo změně barvy na povrchu daného elementu. Při dopadu záření na povrch materiálu vzniká na povrchové vrstvě obrazec daný předlohou. Znaky sloužící k identifikaci předmětů je možno nanášet na polovodičové, keramické a kovové povrchy, dále na papír, sklo, dřevo, plasty, feritové elementy. Laserový paprsek vytváří na povrchu materiálu mechanicky odolný, velmi přesný a kontrastní popis. Jeho trvanlivost je zaručena bez použití chemických přísad, barev nebo mechanických zásahů do struktury materiálu. Označovat se dá prakticky jakýkoli kovový i nekovový materiál, povrch výrobku může mít libovolný tvar a povrchovou úpravu. Změnou parametrů laseru je možno plynule měnit hloubku popisu od několika tisícín milimetru až po gravírování do větší hloubky. V technických aplikacích je důležitá hlavně trvanlivost popisu, reklamní použití klade důraz především na grafickou kvalitu popisu. Nejčastěji se používá Nd:YAG nebo CO₂ laser. Novou generací mezi popisovacími lasery je kontinuální Nd:YAG laser čerpaný laserovou diodou s hustotou výkonu 2,5 kW/mm², laser je chlazený vzduchem. Pro tento laser je charakteristická vysoká kvalita

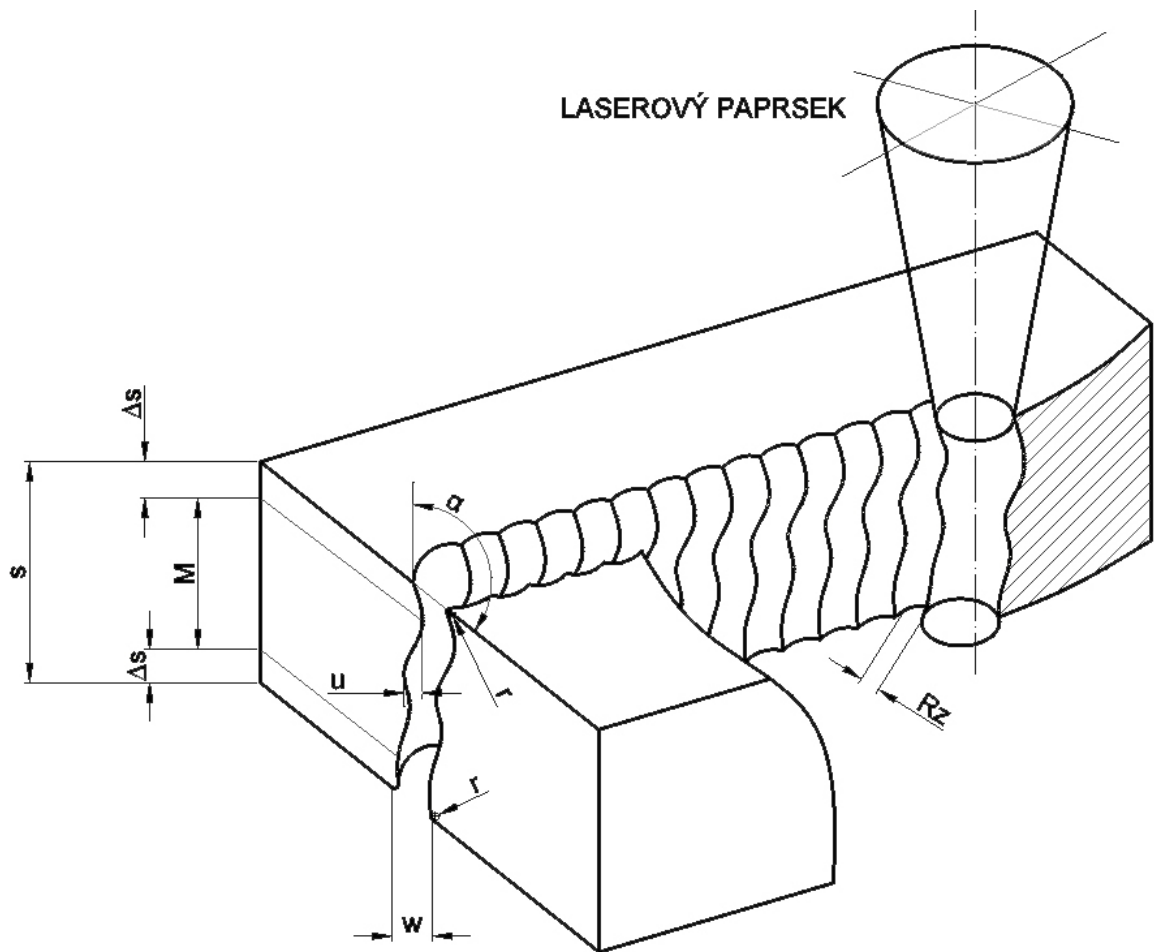
popisu. Popisovací rychlost je v závislosti na materiálu až 4000 mm za sekundu s rozlišením 0,002 mm s přesností od 0,01 do 0,025 mm (v závislosti na rychlosti).

Laserové značení a popisování má širokou škálu použití například pro vyznačení dnů pro ukončení platnosti, čárkové kódy a popisy produktů.



Obr. 13. Laserové gravírování na CO₂ laseru.

2 PARAMETRY KVALITY POVRCHU



Obr. 14. Kriteria pro hodnocení povrchu řezání laserem. [17]

Δs - náběhová a výběhová oblast při řezání

M - měřená oblast pro určení hodnot Rz , u , α

Rz - výška nerovností

u - nepravidelnost škáry

α - úhel vychýlení paprsku

r - zaoblení vlivem řezání

w - šířka řezu

s - tloušťka materiálu

Všeobecně je kvalita řezu určena podle tří základních parametrů:

1. řezná rychlost musí být co nejvyšší
2. šířka štěrbinu musí být co nejužší
3. kvalita povrchu - Ra dle ISO a Rz dle DIN

Do hodnocení struktury povrchu se nepočítají nedokonalosti povrchu, do kterých spadají chyby způsobené během výroby, skladováním či používání - rýhy, trhliny a mikrotrhliny, koroze.

2.1 Termíny a definice dle normy ČSN-EN-ISO-4287

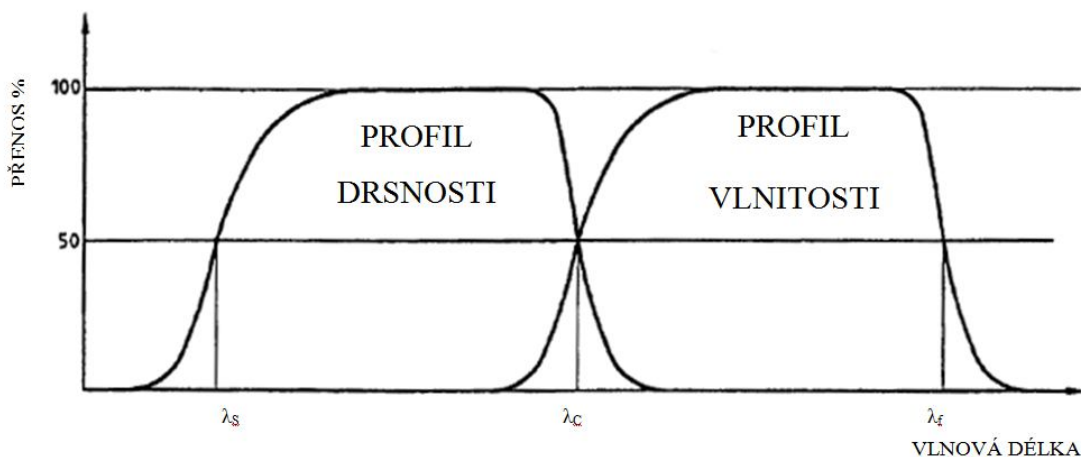
2.1.1 Filtr profilu

Tento filtr rozděluje profily na dlouhovlnné a krátkovlnné složky. Dělí se na 3 části:

λ_s filtr profilu - definuje předěl mezi drsnostmi a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu

λ_c filtr profilu - definuje předěl mezi drsnostmi a vlnitostí

λ_ξ filtr profilu - definuje předěl mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu [18]

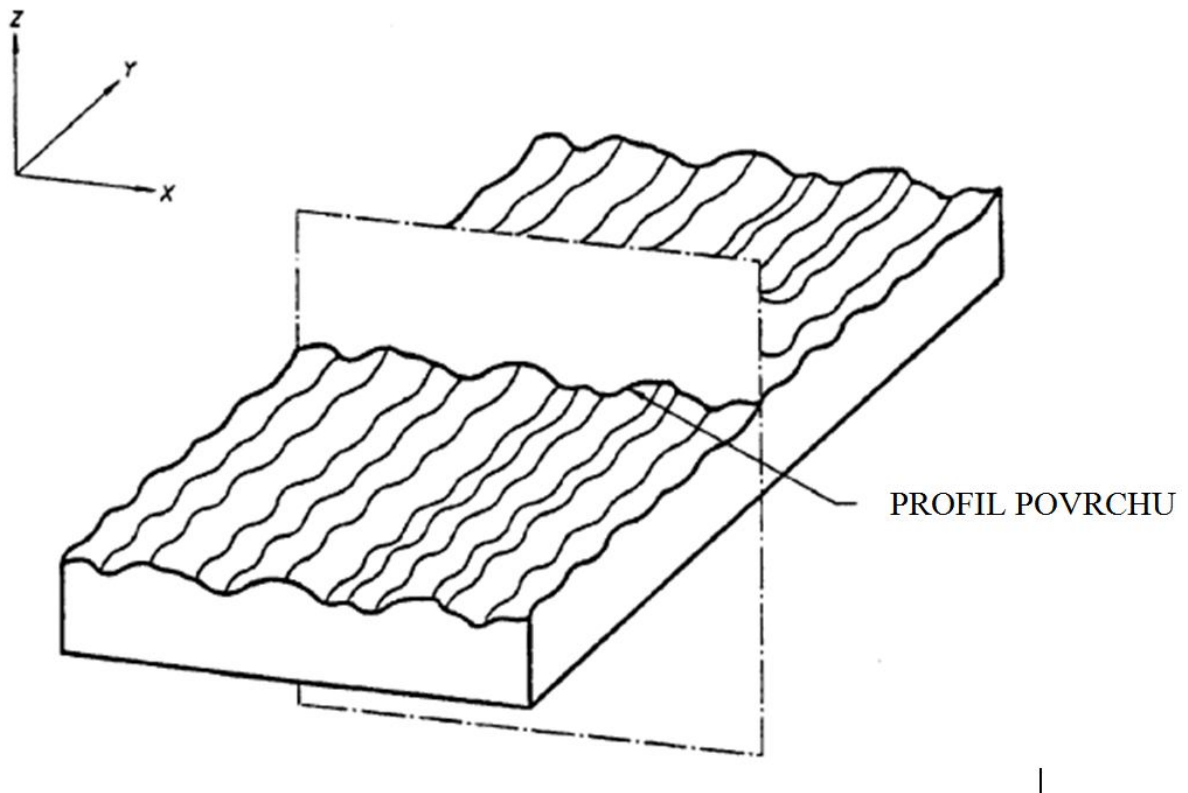


Obr. 15. Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti. [18]

Souřadnicový systém - nejčastěji se volí pravoúhlý a jsou v něm definovány parametry struktury povrchu.

Skutečný povrch - je povrch, který omezuje těleso a oddaluje ho od okolního prostředí

Profil povrchu - vznikne jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny, která je kolmá s povrchem ve vhodném směru. [18]

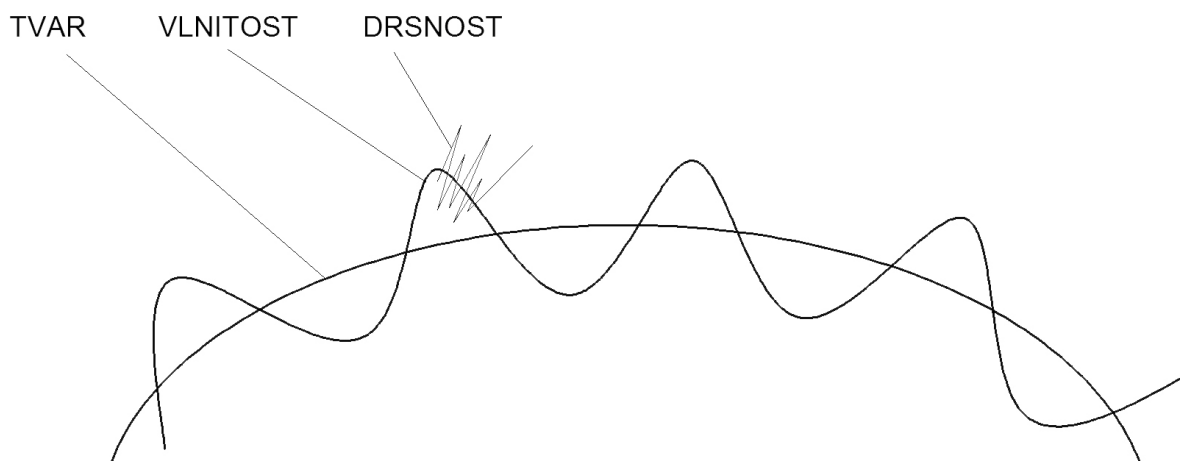


Obr. 16. Profil povrchu. [18]

Základní profil (tvar) - je základem pro číslkové zpracování profilu povrchu a pro výpočet parametrů profilu. Má největší rozteč nerovností.

Profil drsnosti - odvozuje se od základního profilu. Při použití filtru profilu λ_c se potlačuje u něho dlouhovlnná složka a profil je záměrně upraven.

Profil vlnitosti - vznikne při aplikaci filtru profilu λ_c a λ_f na základní profil, potlačuje dlouhovlnné složky filtrem λ_f a krátkovlnné složky filtrem λ_c a profil je záměrně upraven. [18]



Obr. 17. Profil struktury povrchu.

2.2 Definice parametrů profilu povrchu

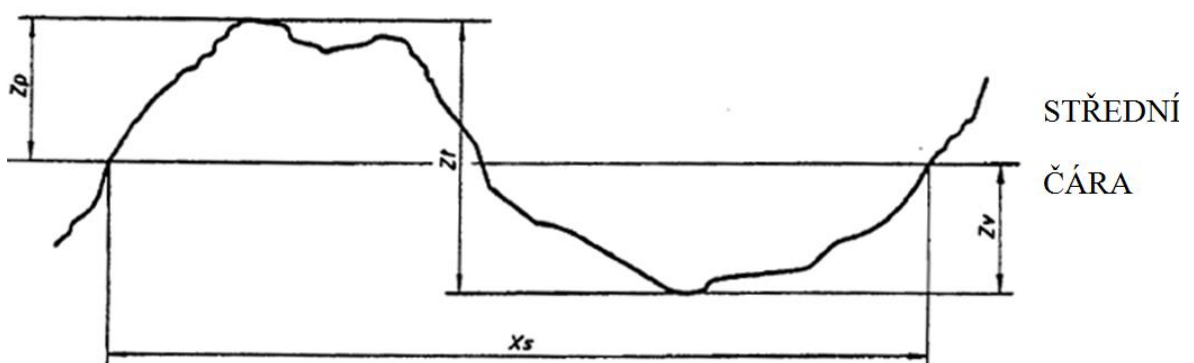
výstupek profilu - vystupuje z povrchu a spojuje dva přilehlé body na průřezu profilu s osou X

prohlubeň profilu - vstupuje do povrchu a spojuje dva přilehlé body na průřezu profilu s osou X

omezení výšky, rozteče - nejmenší výška a nejmenší rozteč výstupků a prohlubní posuzovaného profilu, které mohou být brány v potaz.

Nejmenší výška výstupků a prohlubní profilu se obvykle uvádí v procentech či jiných výškových parametřích a nejmenší rozteč v procentech základní délky. [18]

prvek profilu - součet výstupky a přilehlé prohlubně

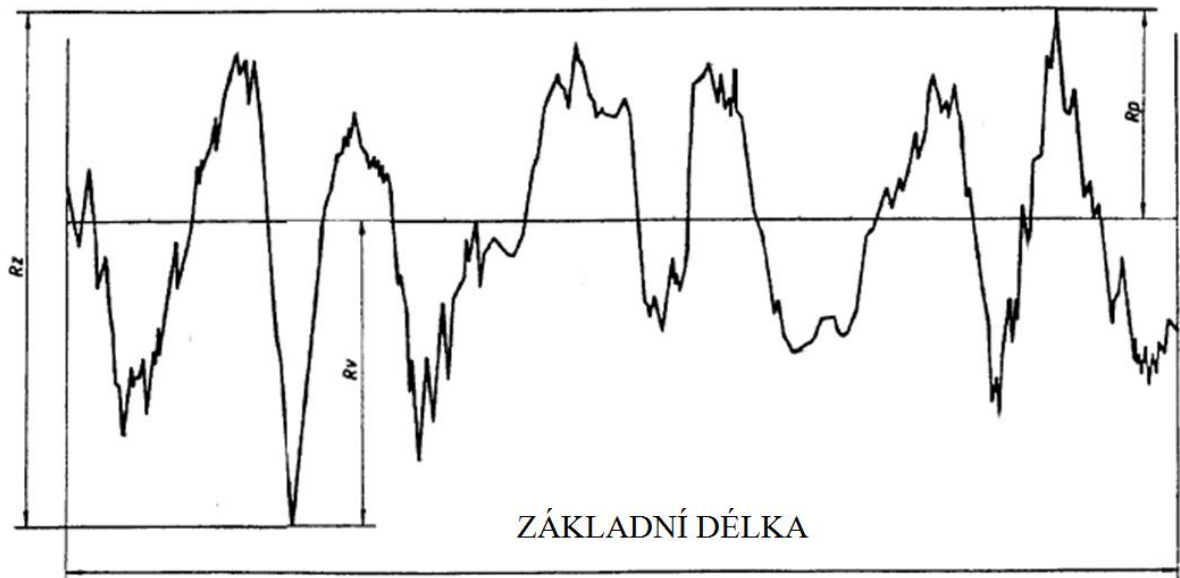


Obr. 18. Prvek profilu. [18]

R_p - největší výška výstupku profilu v rozsahu základní délky

R_v - největší hloubka prohlubně profilu v rozsahu základní délky

R_z - součet největší výšky výstupku profilu a největší hloubky prohlubně profilu v rozsahu základní délky



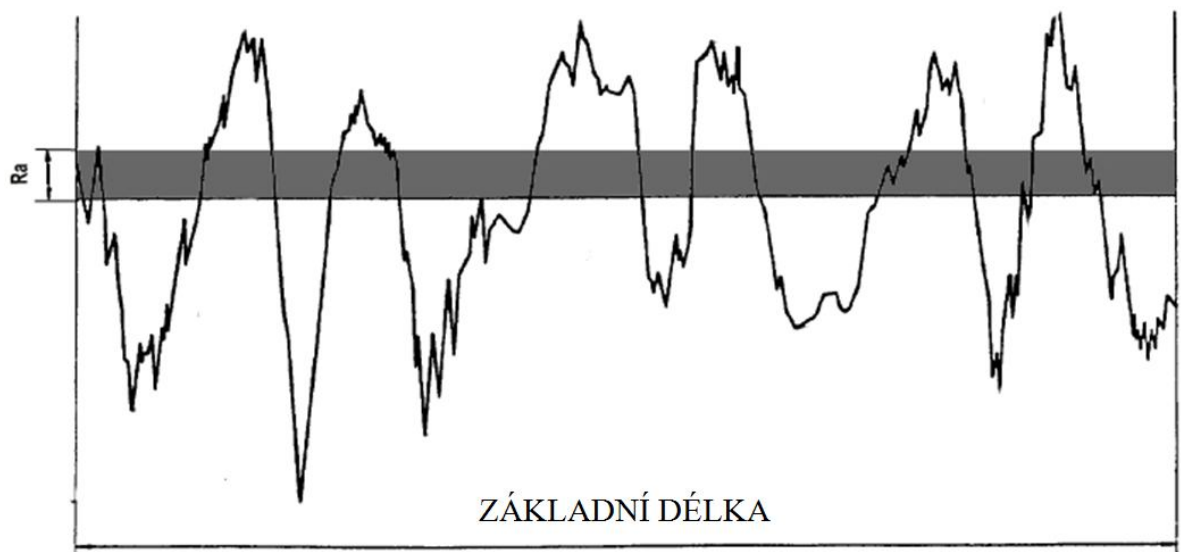
Obr. 19. Parametry profilu povrchu. [18]

R_c - průměrná výška prvků profilu. Jedná se o průměrnou hodnotu výšek prvků v rozsahu základní délky. Parametr vyžaduje omezení výšky v hodnotě 10 % a rozteče 1 % základní délky. Tyto předpoklady musí být splněny.

$$R_c = \frac{1}{m} \int_{i=1}^m Z t_i \quad (1)$$

R_a - průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu. Jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (2)$$



Obr. 20. Průměrná aritmetická úchylka.

Praktická řada hodnot parametru Ra [μm] - 50; 25; 12,5; 6,3; 3,2; 1,6; 0,8; 0,4; 0,2; 0,1; 0,05; 0,025

Tab. 2. Hodnoty Ra dle opracování

Střední aritmetická úchylka povrchu Ra [μm]						Typická metoda výroby povrchu
0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	Dokončovací metody (broušení, honování, superfinišování, lapování...)
0,8						
1,6	3,2	6,3	12,5			Běžné obrábění (soustružení, frézování, vrtání...)
25	50	100	200	400		Povrch polotovarů (výkovky, odlitky...)

2.3 Módová struktura

Elektromagnetické záření se v optickém rezonátoru může šířit podél jeho osy nebo pod určitým úhlem. Pokud je tento úhel velký, tak jsou i ztráty značné a záření uniká přes otevřené stěny rezonátoru dříve, než zesílení přesáhne ztráty v rezonátoru. Záření šířící se podél osy rezonátoru se označuje jako podélné záření. Záření šířící se pod určitým úhlem určitým úhlem vzhledem k ose se nazývá příčný mód oscilace. Módy oscilace rezonátoru jsou módy TEM, kdy vektory elektrického a magnetického pole jsou převážně kolmé na podélnou osu rezonátoru. Tyto módy jsou totožné s homogenním rovinnými vlnami v mikrovlnném pásmu. [4]

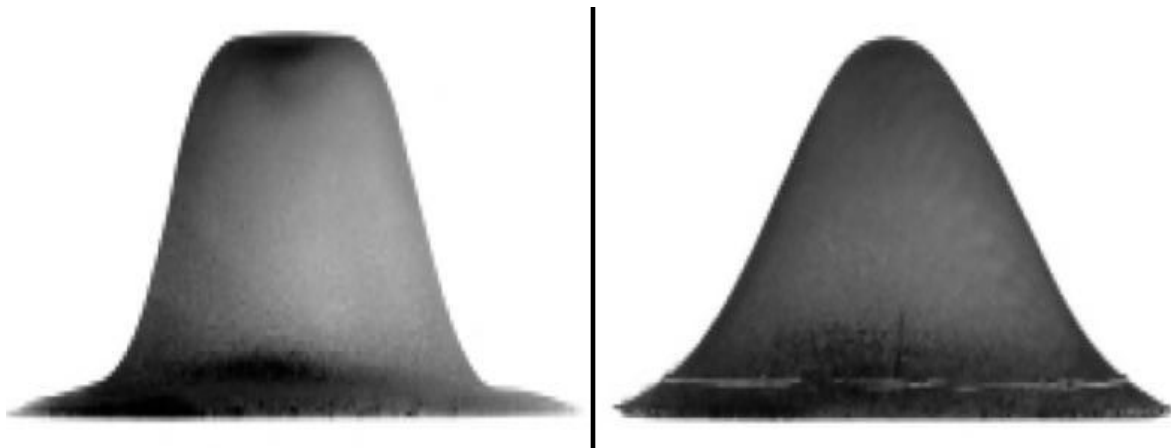
Rezonanční frekvence pro TEM_{mnq} se určuje ze vztahu:

$$\left(\frac{m \cdot \pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{q \cdot \pi}{L}\right)^2 - k^2 = \left(\frac{2 \cdot m \cdot f}{c}\right)^2 \quad (3)$$

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{q}{L}\right)^2} \quad (4)$$

kde: a, b, L [m] - rozměry rezonátoru

m, n, q [-] - celé kladné číslo

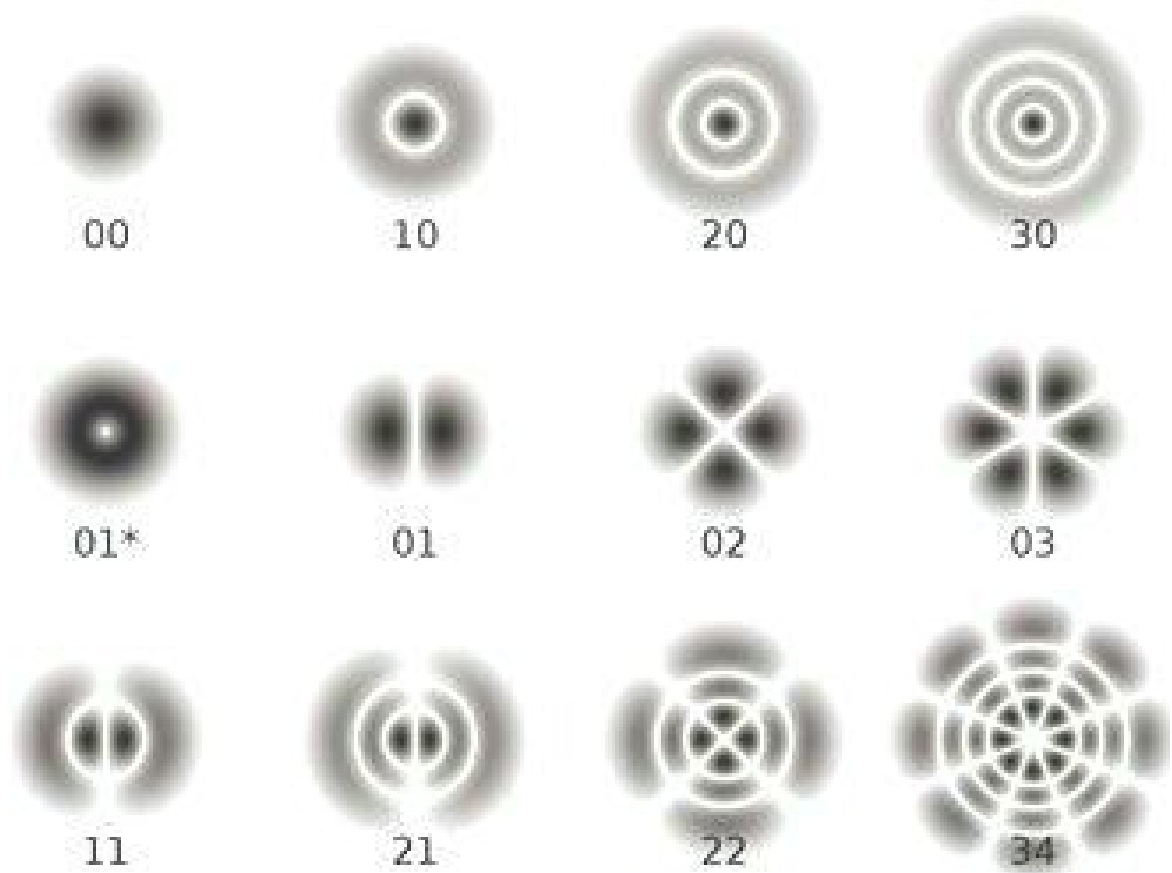


Obr. 21. Rozdělení intenzity záření v průřezu výstupního paprsku laseru TEM_{00} a TEM_{10} . [14]

Základní mód TEM_{00} - má rozložení energie svazku tvaru Gaussovy křivky četnosti s jedním maximem uprostřed svazku.

mód TEM_{01} - má průřez ve tvaru mezikružší s energií soustředěnou po obvodu

fokusovaného svazku.

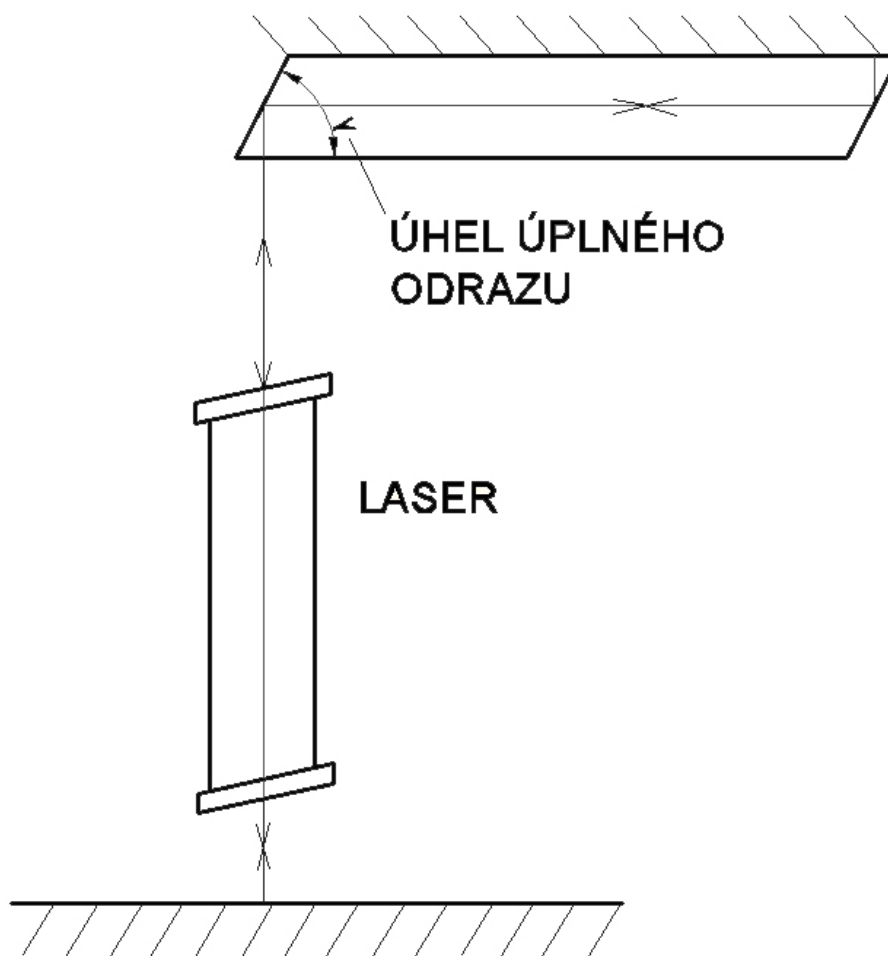


Obr. 22. Módy TEM. [19]

Současně se v rezonátoru může vybudit velké množství různých módů oscilace, které se od sebe liší frekvencí a amplitudou. Tím se zmenšuje spektrální čistota, koherentní záření a zvyšuje se rozbíhavost paprsku. Zhoršením těchto vlastností se zhorší kvalita systému, v kterém se používají lasery. [4]

2.3.1 Potlačení příčných módů oscilace

Příčné módy lze potlačit prostorovou selekcí pomocí clony. Ta se umístí mezi aktivní látku a jedno ze zrcadel. Módy o vyšším řádu se šíří tím více se vzdáleností od osy, čím větší je index módu oscilace. Příčné módy mohou být potlačeny prizmovými odrážkami, jelikož dojde k úplnému odrazu v blízkosti limitního úhlu. Další možností je zvětšením vzdálenosti zrcadel, což má za nevýhodu zvětšení rozměrů a váhy. [4]



Obr. 23. Prizma na potlačení příčných módů. [4]

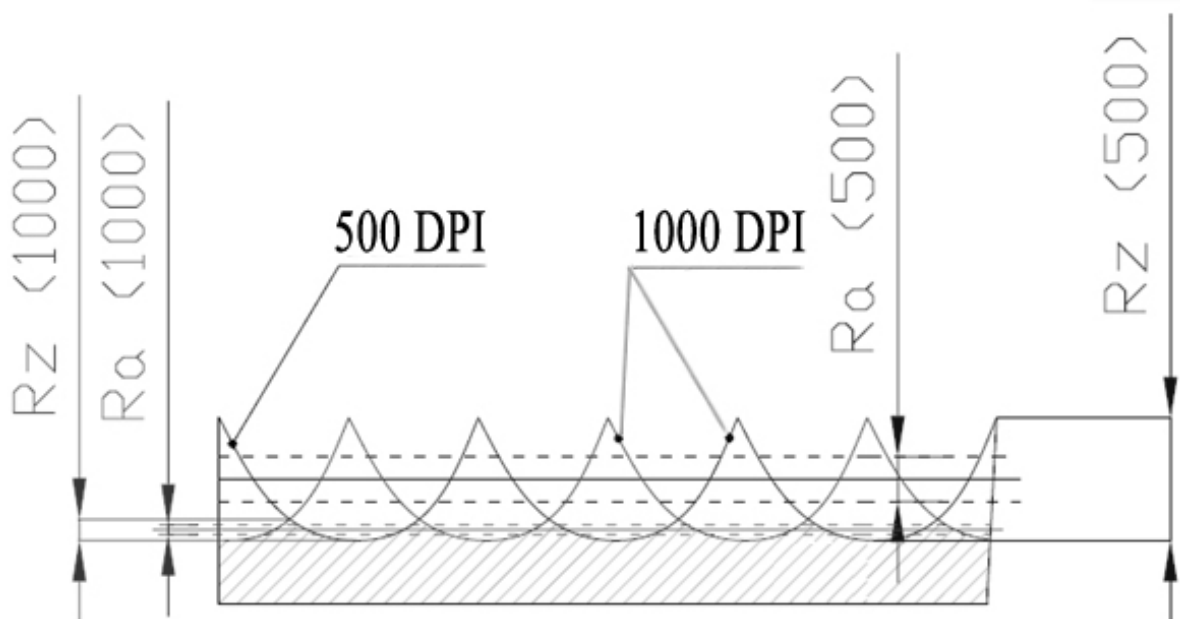
2.3.2 Potlačení podélných módů oscilace

Potlačit podélné módy můžeme zesílením módů s různou frekvencí v aktivní látce, změnou parametrů rezonátoru či doplňujícími prostředky, které mění jeho rezonanční charakteristiky. Jako selektor módů lze použít tenkou absorpční vrstvu vloženou kolmo do rezonátoru. Vybudí se ty módy oscilace, které mají své uzly umístěné v absorpční vrstvě, zbytek módů

se pohlcuje. Absorpční vrstva se dělá z křemenného plátku, kdy na jedné straně je stříbrná vrstva s menší tloušťkou, než je vlnová délka záření a na druhé straně je antireflexní vrstva.

2.4 Rozlišení DPI

Rozlišení DPI nám označuje krok posuvu laserového paprsku, tento parametr ovlivňuje velikost skoku na další řádek, tím se mění drsnost obráběné plochy. Při změně rozlišitelnosti se mění i doba obrábění, což se projevuje v ekonomické stránce.



Obr. 24. Změna drsnosti při obrábění s rozlišením DPI 500 a DPI 1000. [20]

3 TEORIE HYPOTÉZ

3.1 Statické hypotézy

Statistická hypotéza je daný určitý předpoklad o rozdělení náhodných veličin. Parametrické hypotézy jsou takové, kdy se tyto podmínky týkají hodnot parametrů rozdělení náhodné veličiny. Pokud je tomu naopak, tak hovoříme o hypotéze neparametrické. Hypotézy můžeme rozdělit na jednoduché a složené. U jednoduchých hypotéz jsou určeny všechny parametry, kdy se jedná o jednoznačné rozdělení. Když není nějaký z parametrů rozdělení určen jednoznačně (vymezen intervalem), pak se jedná o složenou hypotézu.

Parametrické hypotézy jsou předpoklady o parametrech rozdělení. Existují tři typy těchto hypotéz:

- o parametru jedné populace (o rozptylu, relativní četnosti...)
- o parametrech dvou populací (srovnávací testy)
- o parametrech více než dvou populací (ANOVA...)

Parametrické hypotézy můžeme popsat rovností mezi testovaným parametrem a jeho předpokládanou hodnotou nebo jako rovností mezi testovanými parametry. [21]

3.2 Nulová a alternativní hypotéza

U testování hypotéz proti sobě stojí dvě tvrzení. Jedna je nulová hypotéza H_0 , která představuje rovnovážný stav a je vyjádřena rovností. Jedná se o tvrzení o populaci, s kterým uvažujeme jako předpoklad při testování. Proti této hypotéze postavíme alternativní hypotézu H_A , která zastupuje porušení rovnovážného stavu a zapisuje se nerovností. Pokud ji popíšeme symbolem nerovnosti " \neq ", tak se jedná o oboustrannou alternativní hypotézu. Při popisu symbolem nerovnosti "<" nebo ">", tak se jedná o jednostrannou alternativní hypotézu. [21]

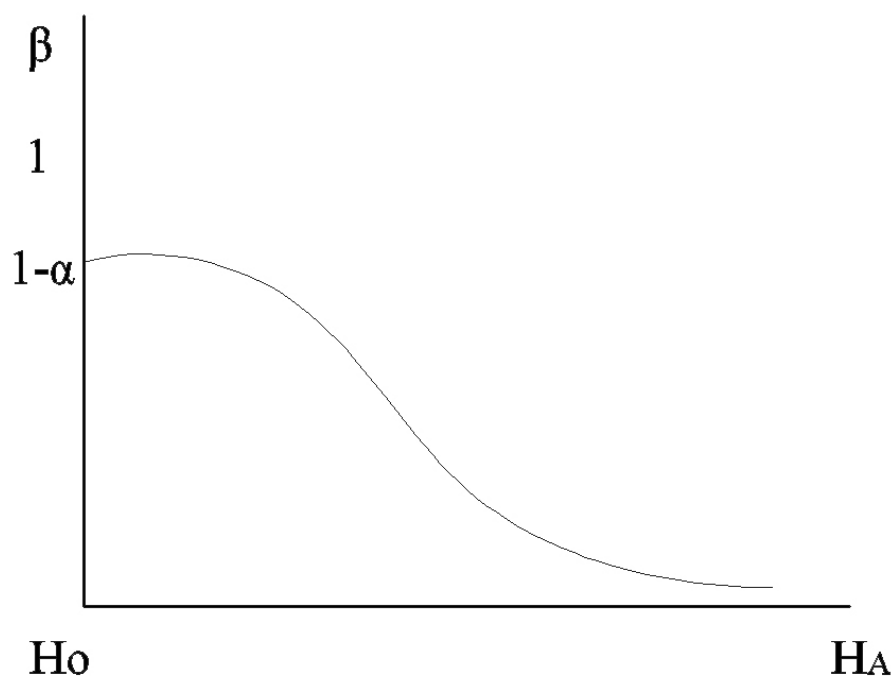
3.3 Chyba I. a II. druhu

Při rozhodování o nulové hypotéze vycházíme z výběrového souboru, který nemusí přesně odpovídat vlastnostem základního souboru, čímž může dojít k chybě.

Tab. 3. Možné existující situace, kdy mohou nastat chyby. [21]

	VÝSLEDEK TESTU	
	NEZAMÍTÁME H_0	ZAMÍTÁME H_0
PLATÍ H_0	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost rozhodnutí: $1-\alpha$	Chyba I. druhu Pravděpodobnost rozhodnutí: α
PLATÍ H_A	Chyba II. druhu Pravděpodobnost rozhodnutí: β	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost rozhodnutí: $1-\beta$

Chyba I. druhu nastává tehdy, jestliže je nulová hypotéza platná a my ji zamítneme. Pravděpodobnost, že k tomu dojde, nazýváme hladina významnosti a značí se α . Platí-li nulová hypotéza a my ji nezamítli, rozhodnutí je správné a nazývá se spolehlivost $1-\alpha$. Správné rozhodnutí je i zamítnutí nulové hypotézy, jestliže je alternativní hypotéza platná. Tohoto rozhodnutí se dopouštíme s pravděpodobností $1-\beta$ a nazývá se síla testu. Chyba II. druhu je nezamítnutí nulové hypotézy v případě, že je platná alternativní hypotéza a pravděpodobnost chyby β . Rozhodující parametr je pravděpodobnost chyby I. druhu, v technických oblastech se volí 5 % nebo 1 % hladina významnosti.



Obr. 25. Operativní charakteristika.

Operativní charakteristika znázorňuje závislost pravděpodobnosti chyby II. druhu na určité specifikaci alternativní hypotézy.

3.4 Testy o shodě úrovně

Testy o shodě ve dvou souborech se označují párovými testy. Volba testu závisí na souborech, zda jsou závislé či nezávislé a na srovnávaném parametru. Nezávislé výběry jsou takové, kde příslušné dvojice se netýkají stejných prvků. U závislých výběrů jsou příslušné dvojice fyzicky spjaté.

3.4.1 T-test

Jedná se o nejčastěji využitý test, porovná na základě dvou nezávislých výběrů dvě populace. Patří mezi parametrické testy, výběr pochází z normálního rozdělení. Každý výběr zahrnuje jiné prvky, tím je dodržena nezávislost výběru.

3.4.2 F-test

Nulové rozdělení testové statistiky je symetrické. Spolehlivé F-testy vznikají, když jsou modely složeny z údajů pomocí nejmenších čtverců. F-test je citlivý na anomálie.

3.4.3 Mann - Whitneyův test

Patří mezi neparametrické testy a používají se pro porovnání souborů statistických dat, u kterých nepředpokládáme normální rozdělení pravděpodobností sledovaného znaku. Tyto testy testují nulovou hypotézu, která se týká pouze obecných vlastností rozdělení sledované veličiny ve statistických souborech. Výpočty vycházejí z pořadových čísel jednotlivých hodnot variační řady, mohou být proto použity i u dat, která nemají přesný číselný význam a jsou ve skutečnosti jen pořadím.

4 CÍLE PRÁCE

1. Vypracování literární studie na dané téma (CO₂ lasery, módová struktura, rozlišení DPI, parametry kvality povrchu - Ra, Rz, vlnitost)
2. Provést experimentální obrábění vybraných polymerních materiálů při změně vstupních parametrů výkonu a posuvové rychlosti pro rozlišení DPI 200, 500, 1000
3. Získané výsledky vyhodnotit, provést statistické vyhodnocení

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 POSTUP PRÁCE A PŘÍSTROJE POUŽITÉ PŘI MĚŘENÍ

5.1 Laser ILS 3NM

ILS 3NM je plynový CO₂ laser vhodný pro řezání a gravírování především nekovových materiálů - akryláty (PMMA), polypropylen, polyoxymetylen, polyethyltereftalát, mirelon, nalepovací folie, syntetická vlákna, potažený textil, kůže, filtrační materiály, izolační a technické tkaniny, překližky, balza, těsnění, textil, lepenka, papír, karton, korek a další. Povrch řezu je čistý, hladký, lesklý. Maximální rozměry obrobku jsou dány pracovním stolem, který má rozměry 660 x 495 mm, dají se obrábět i dlouhé desky, při otevření čelních dvířek. Maximální tloušťka řezaného materiálu je 10 mm, výkon je 100 W. Zařízení je napojené na počítač, je kompatibilní se systémem Microsoft Windows. Pracuje s programem CorelDRAW, v kterém můžeme zpracovávat vektorové i rastrové data.



Obr. 26. Laser ILS 3NM.

Tab. 4. Technické parametry ILS-3NM-100W.

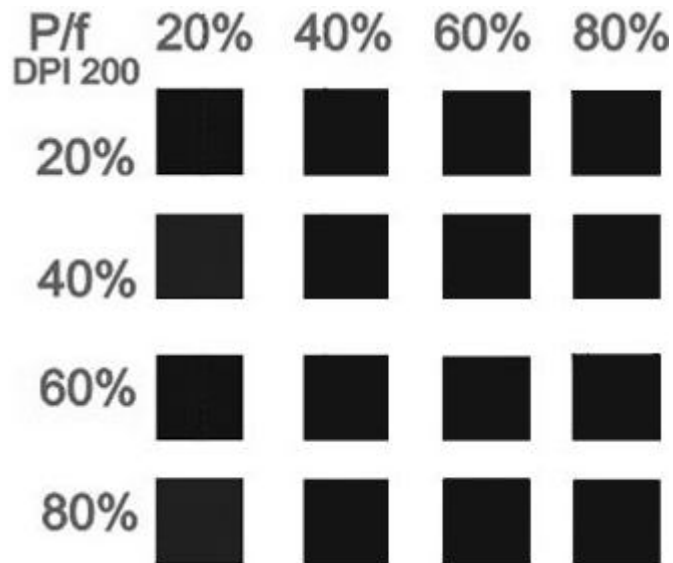
ZDROJ	100 W vzduchem chlazený CO ₂ laser
MAX. RYCHLOST	1524 mm/s
DPI	1000, 500, 333, 250, 200, 167
PRACOVNÍ PLOCHA	660 (Délka) x 495 (Výška) mm
Z - OSA	nastavitelná vzdálenost až 210 mm
MAX. VELIKOST OBROBKU	640 (Délka) x (Šířka) x 170 (Výška) mm
PAMĚŤ	64 MB
POČÍTAČOVÉ ROZHRAŇÍ	Paralelní port, Ethernet port
SOFTWARE	CAD nebo grafický software
PROVOZNÍ REŽIM	Nastavení uživatelem či pomocí LCD panelu
ENERGIE	230 V, 10 A, 50 ÷ 60 Hz
ROZMĚRY	970 (Délka) x 865 (Šířka) x 990 (Výška) mm
CHLAZENÍ	Vzduchem

5.2 Příprava a postup práce na laseru

Gravírovaná plocha je nastavena pro hodnoty DPI 200, 500 a 1000, rychlost posuvu v horizontálním sloupci a výkon ve vodorovném sloupci 20%, 40%, 60%, 80% dané veličiny.

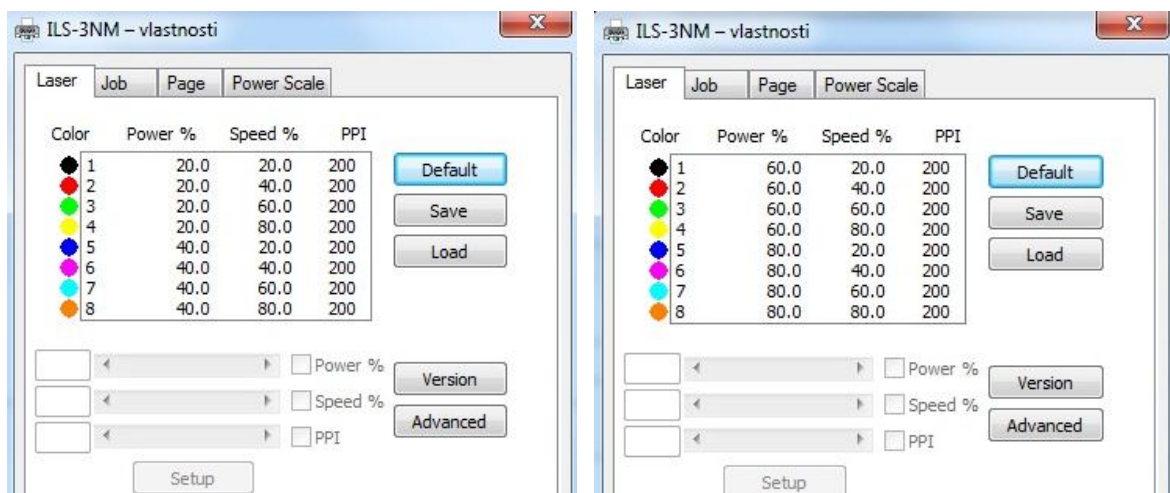
Tab. 5. Parametry nastavení obrábění.

[%]	20	40	60	80
P [W]	20	40	60	80
f [mm/s]	304,8	609,6	914,4	1219,2



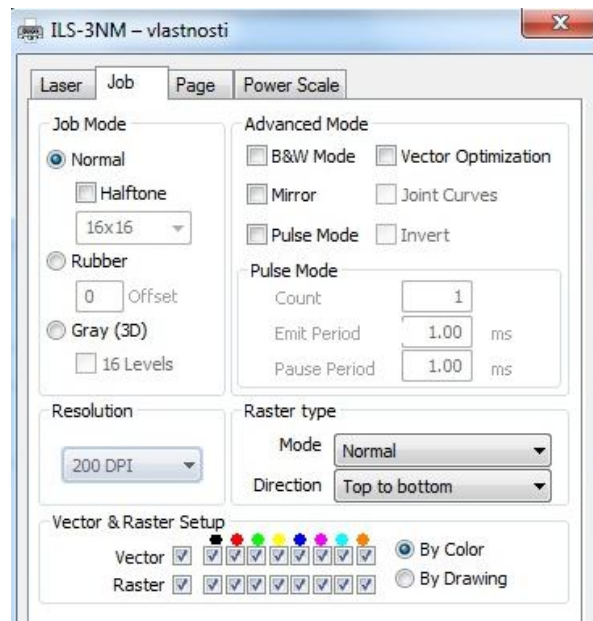
Obr. 27. Návrh obrobene plochy pro jednotlivé parametry.

Příprava se dělí na tvorbu programu a na práci s obrobkem. Samotné rýsování v programu CoreDRAW není závislé na laserovém pracovišti, data můžeme vytvořit na jakémkoliv PC a přenést je. Nastavení parametrů se provádí u laserového zařízení. Definované parametry řezání jsou přiřazeny k jednotlivým barvám. CoreDRAW pracuje s 8 základními barvami.



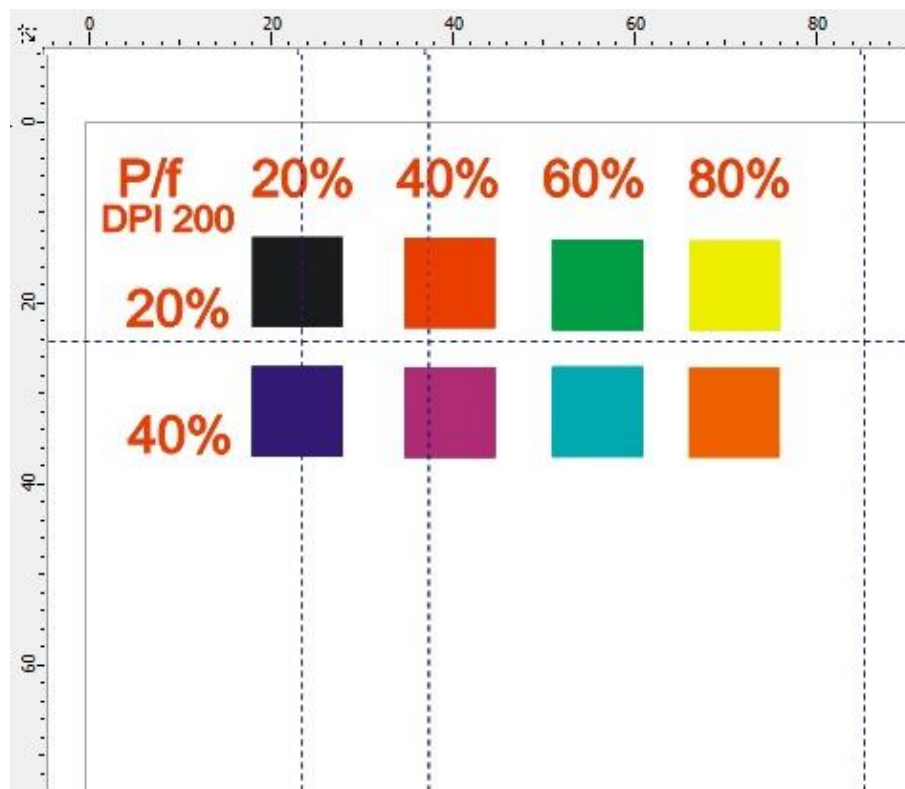
Obr. 28. Nastavení parametrů dle přiřazení barev.

V záložce Job se vybere hodnota DPI a zaškrtnou se všechny barevné varianty, jak pro vektor, tak i pro rastr.

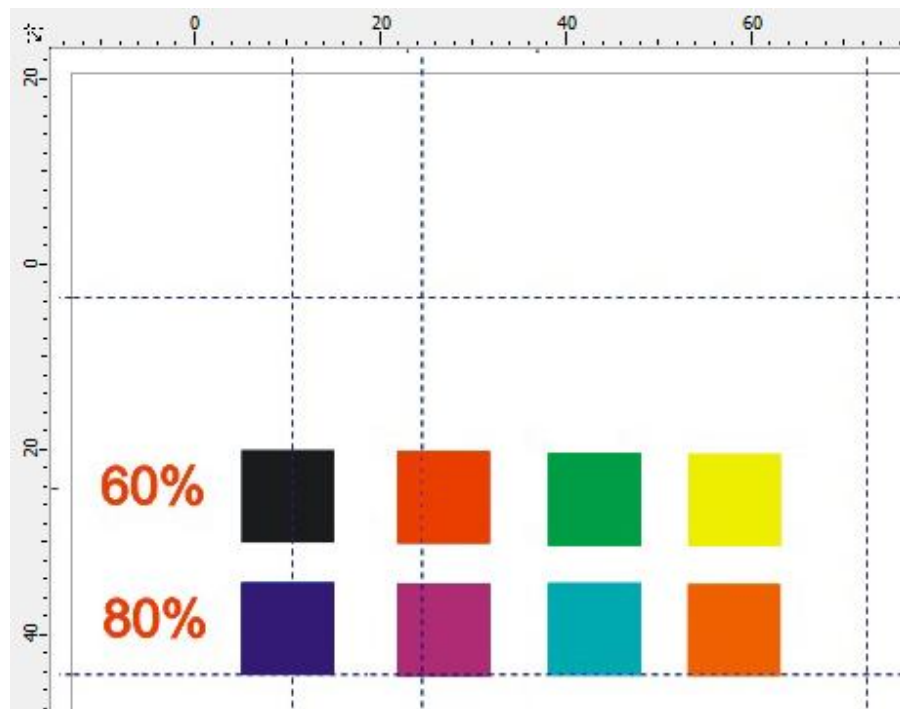


Obr. 29. Nastavení DPI a vektor & rastr.

Pro námi nastavené 4 různé hodnoty rychlosti posuvu a výkonu pro dané rozlišení DPI, vzniklo 16 variant. Proto musel být program rozdělen na dva (část A a B).

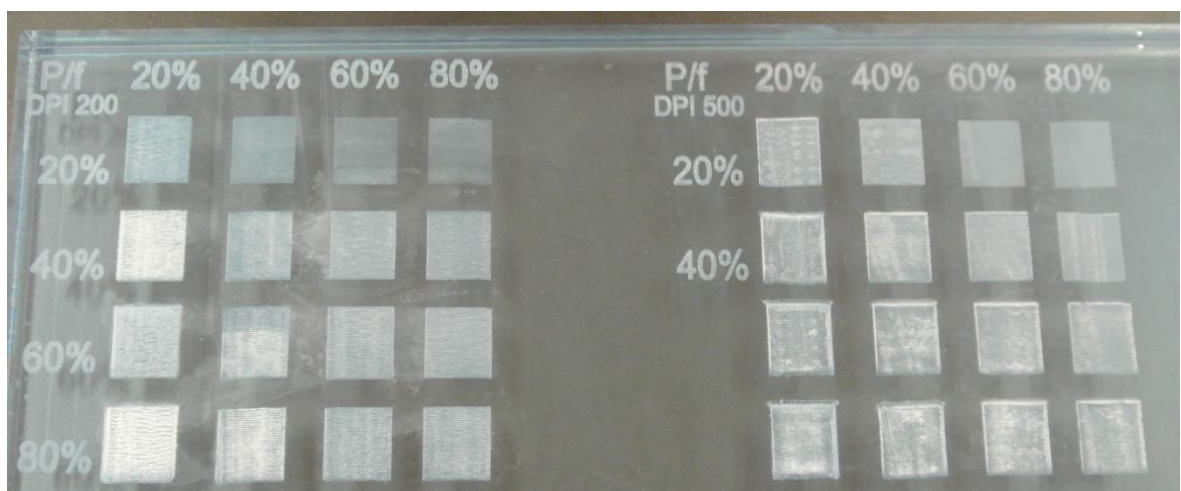


Obr. 30. Příprava výkresu část A.

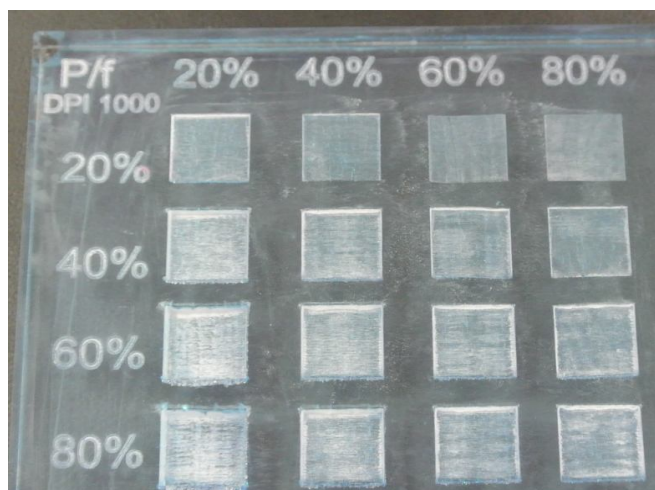


Obr. 31. Příprava výkresu část B.

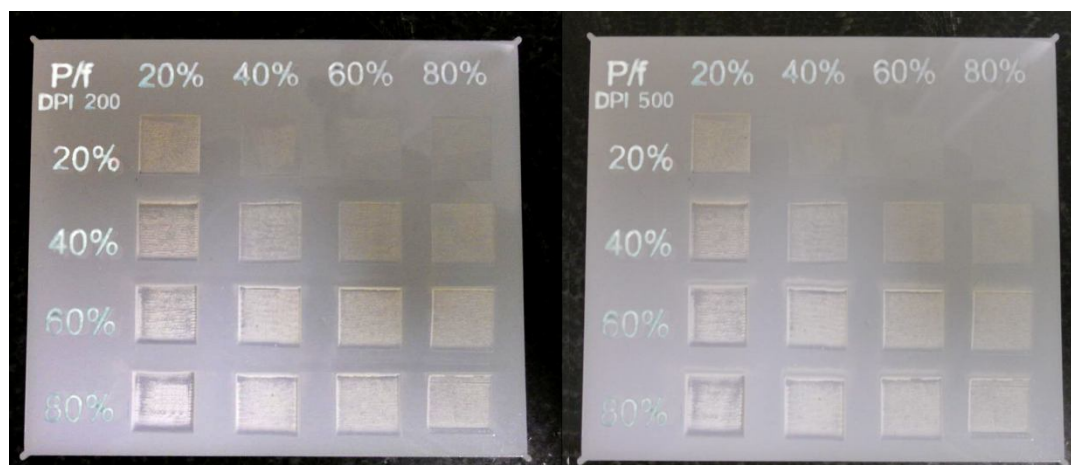
Po nastavení se veškerá data pošlou na laser. Na pracovní stůl se ustaví deska do rohu, jelikož zde je laser nepřesnější. Fokusaci provádíme pomocí etalonu. Pro odvod škodlivých zplodin se zapne odsávání. Samotné obrábění se spustí stlačením RUN a deska se začne obrábět.



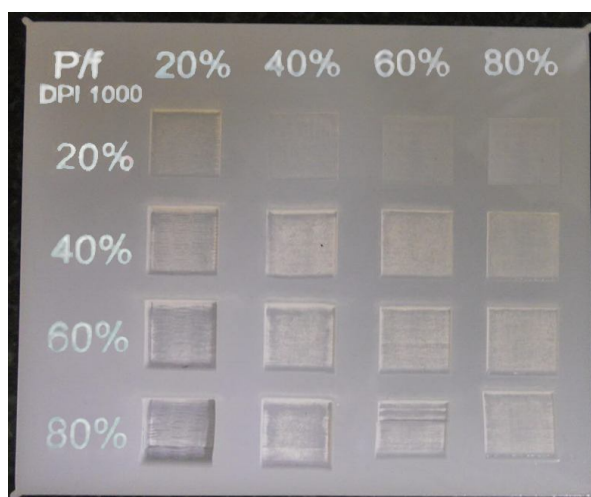
Obr. 32. Obrobený materiál PMMA pro DPI 200 a DPI 500.



Obr. 33. Obrobený materiál PMMA pro DPI 1000.



Obr. 34. Obrobený materiál PP pro DPI 200 a DPI 500.



Obr. 35. Obrobený materiál PP pro DPI 1000.

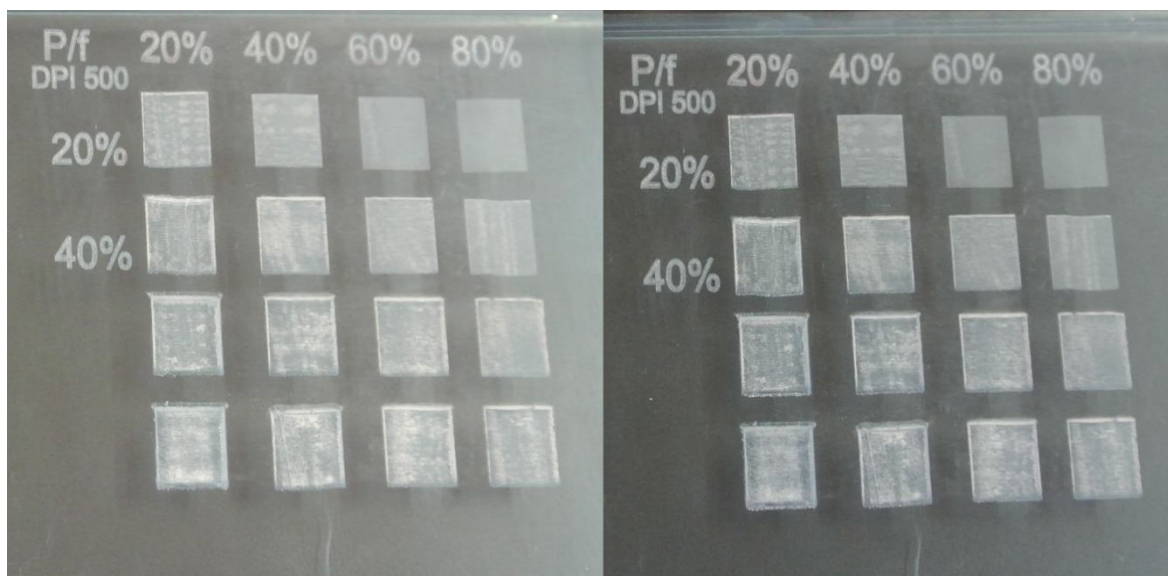
5.3 Mikroskop Carl Zeiss Jena

Mikroskop Carl Zeiss Jena je dílenský mikroskop, vybaven okulárem Dinocapture 2.0. Zvětšení je zvoleno patnáctinásobné a padesátinásobné.

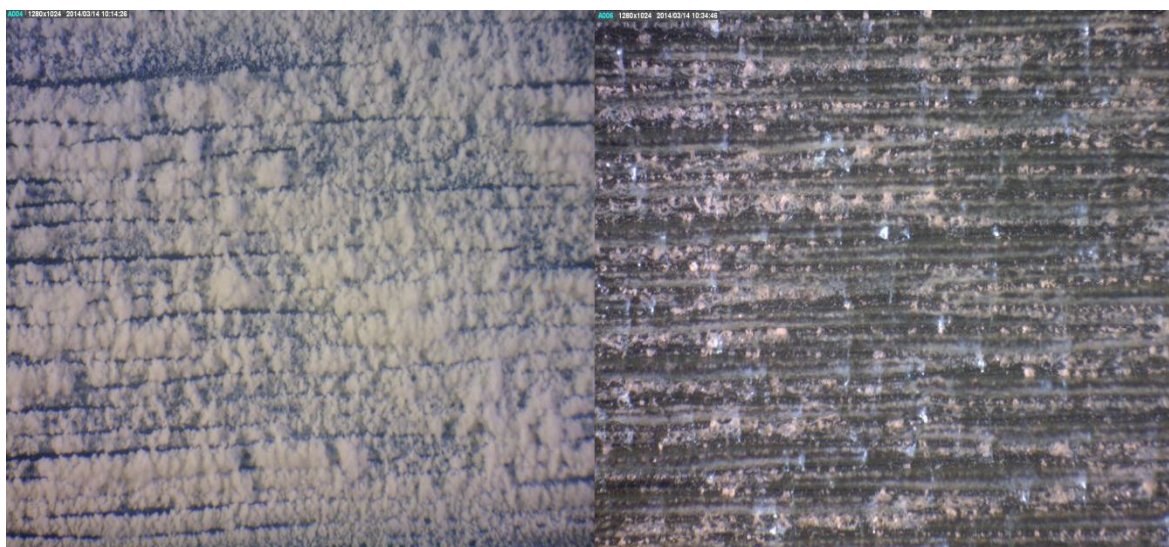


Obr. 36. Mikroskop Carl Zeiss Jena.

Před samotným zkoumáním musely být vzorky důkladně očištěny, jelikož by výsledky byly zavádějící. Při gravírování se materiál taval a odpařoval. Jelikož laser není vybaven ofukovacím zařízením, zbytky materiálu se usadili na povrchu obrobku. K očištění byl použit líh a následně vysušen vzduchem.

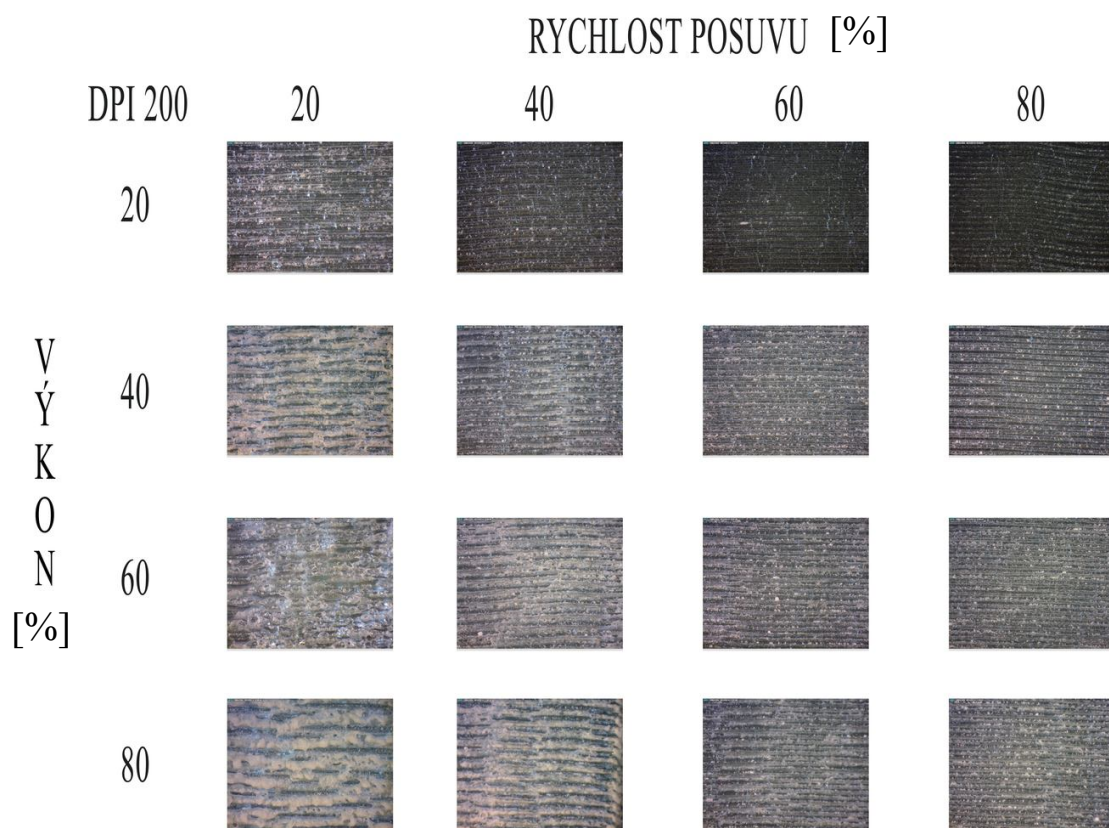


Obr. 37. Před (nalevo) a po (napravo) očištění vzorku.

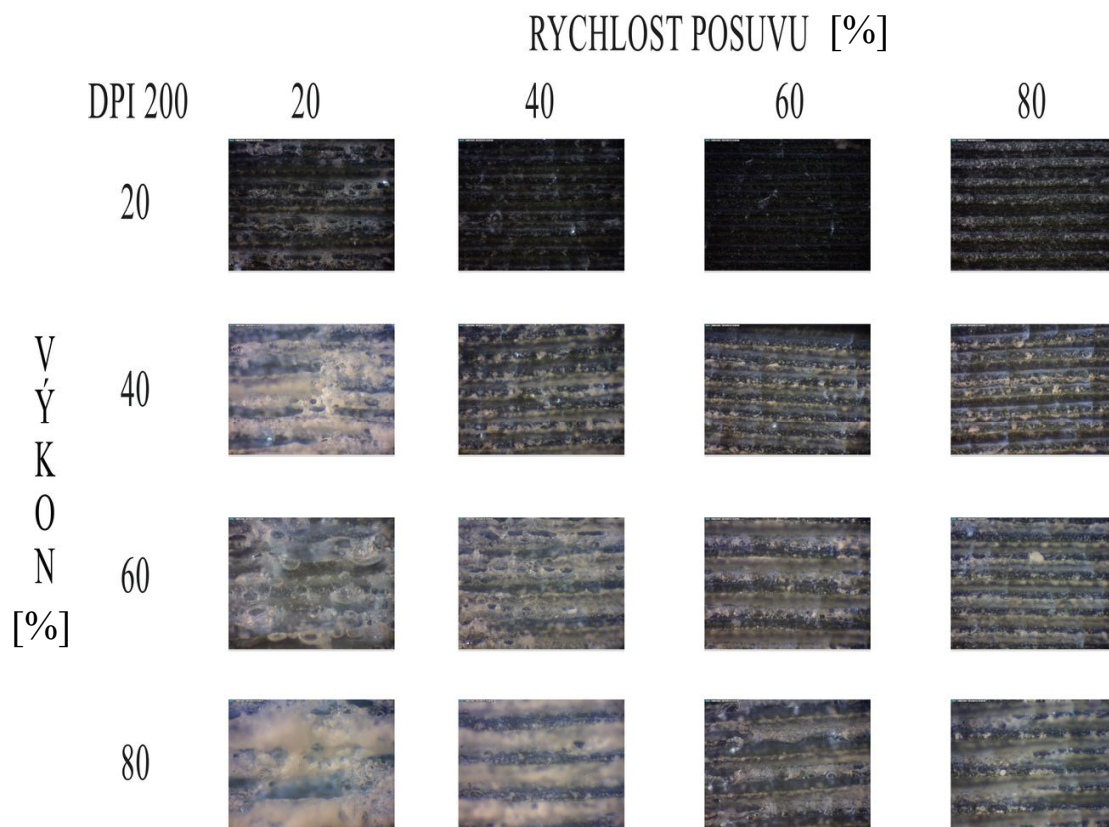


Obr. 38. Před (nalevo) a po (napravo) očištění vzorku při zvětšení 15x.

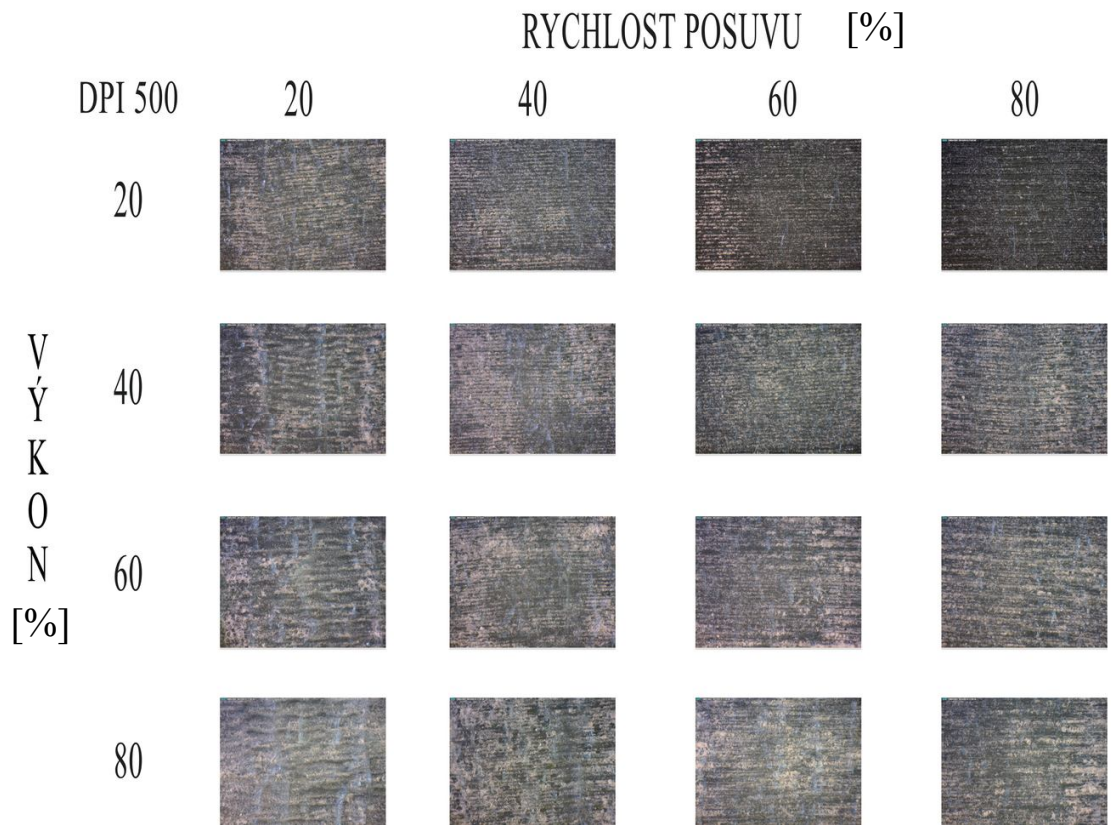
Při patnáctinásobném zvětšení je znečištění zcela viditelné a nezanedbatelné. Po důkladném vyčištění může dojít k samotnému měření.



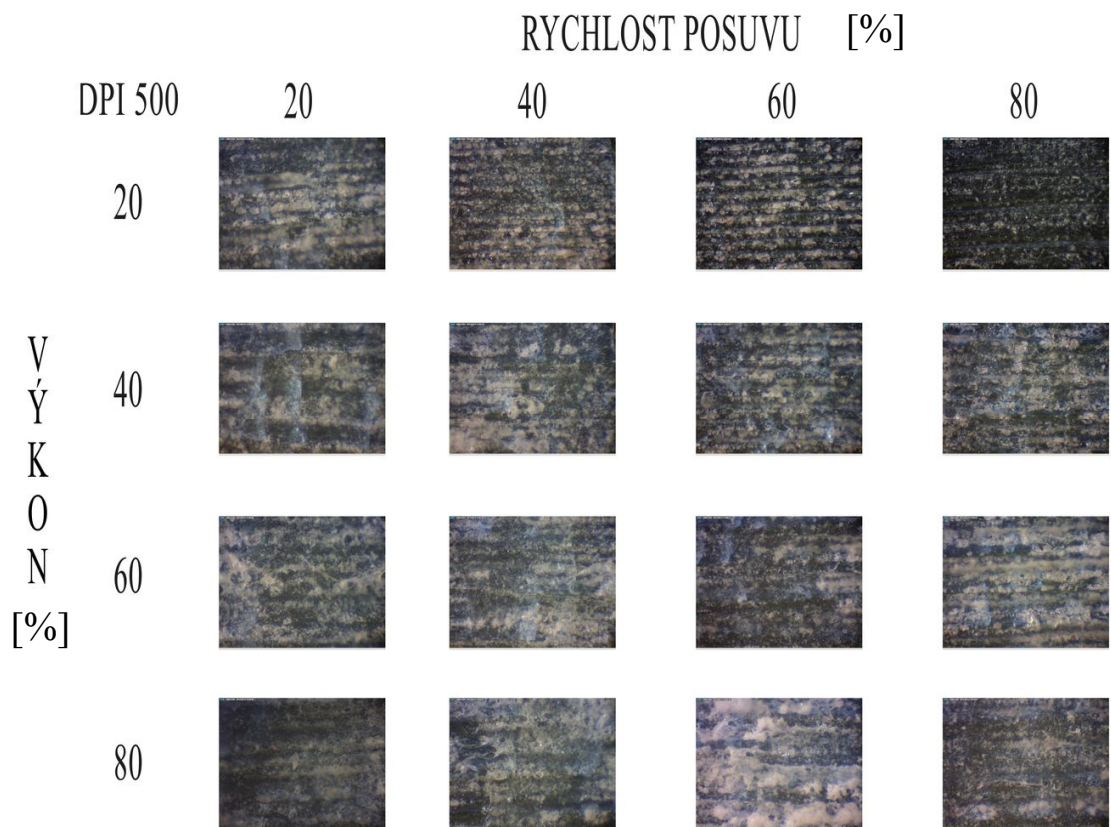
Obr. 39. Rozlišení DPI 200 při zvětšení 15x.



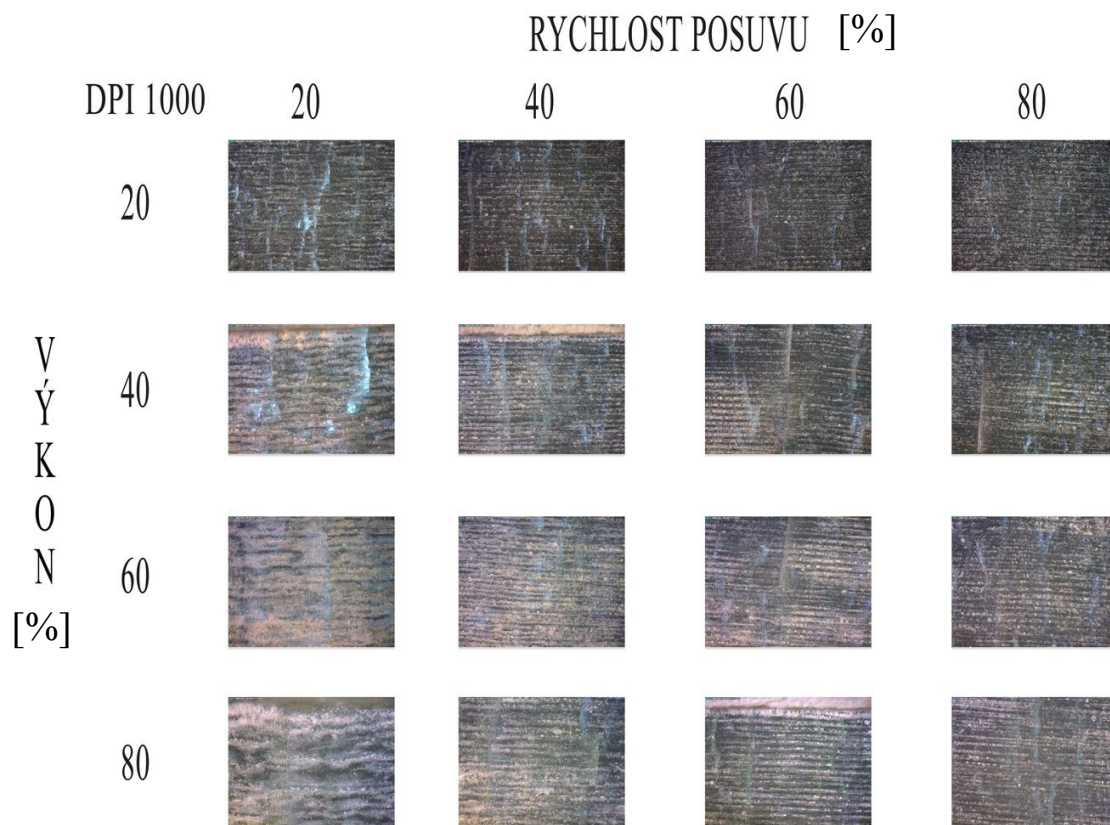
Obr. 40. Rozlišení DPI 200 při zvětšení 50x.



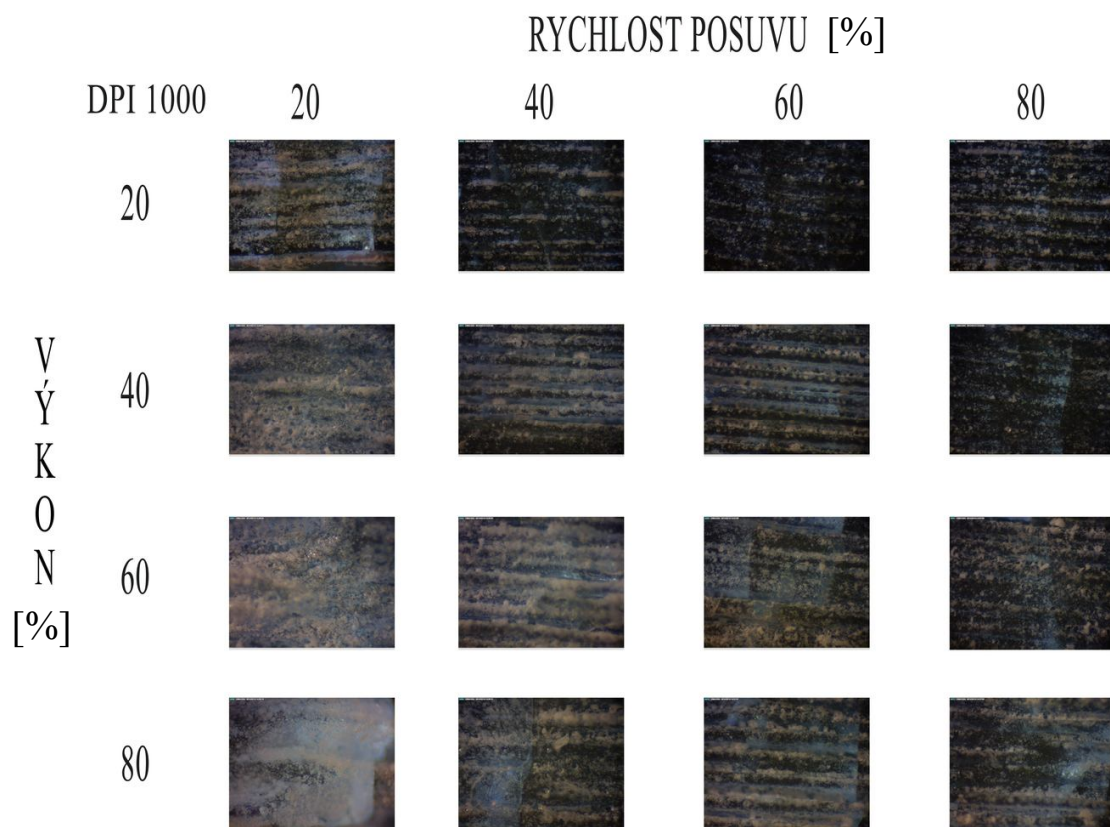
Obr. 41. Rozlišení DPI 500 při zvětšení 15x.



Obr. 42. Rozlišení DPI 500 při zvětšení 50x.



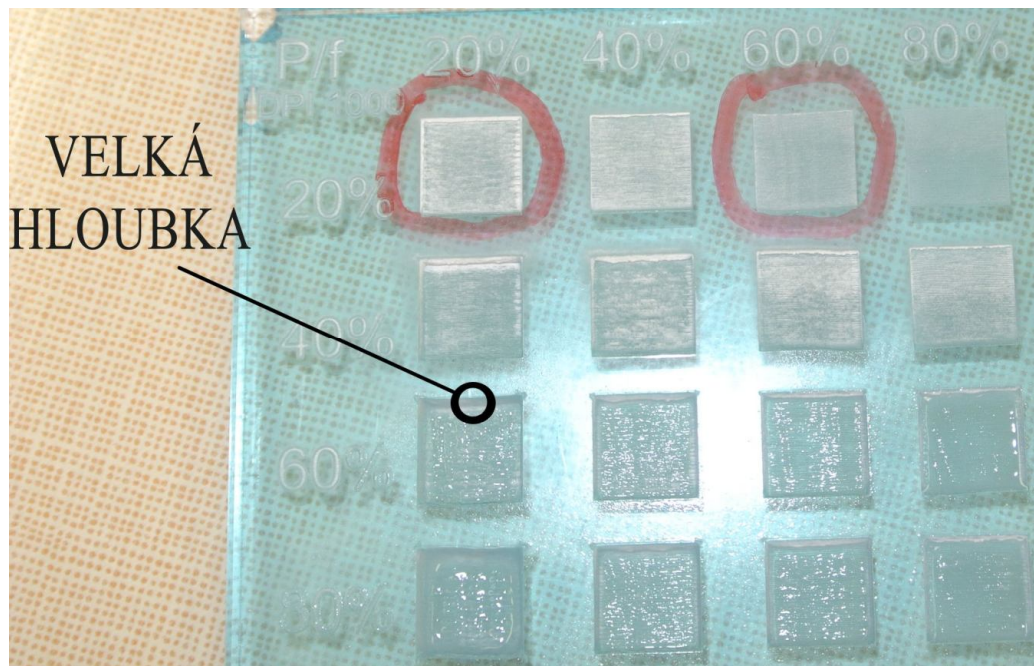
Obr. 43. Rozlišení DPI 1000 při zvětšení 15x.



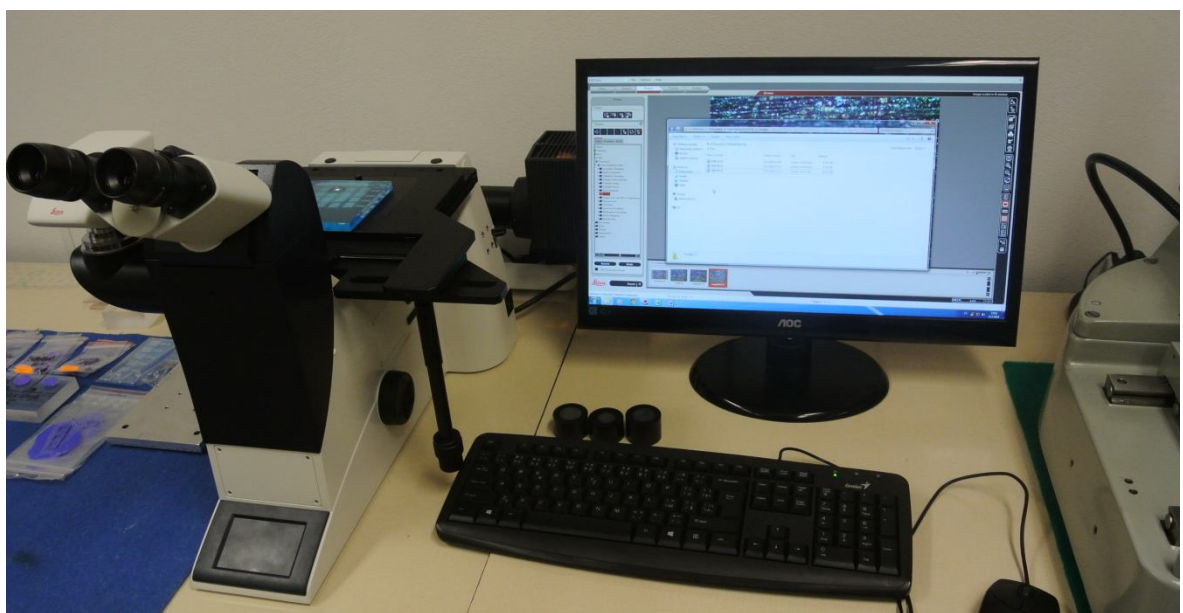
Obr. 44. Rozlišení DPI 1000 při zvětšení 50x.

5.4 Mikroskop Leica DMI3000 M

Ke zvětšení a zkoumání plochy byl použit inverzní metalografický mikroskop Leica DMI3000 M. Optika přístroje je propojena s digitální kamerou a počítačem. Použité zvětšení je padesátinásobné. Jelikož snímaná část musí být v úrovni pracovní stolku, tak nastal problém u ploch, které jsou hluboko obrobené (Obr. 45). Zde byly snímky rozmazané.



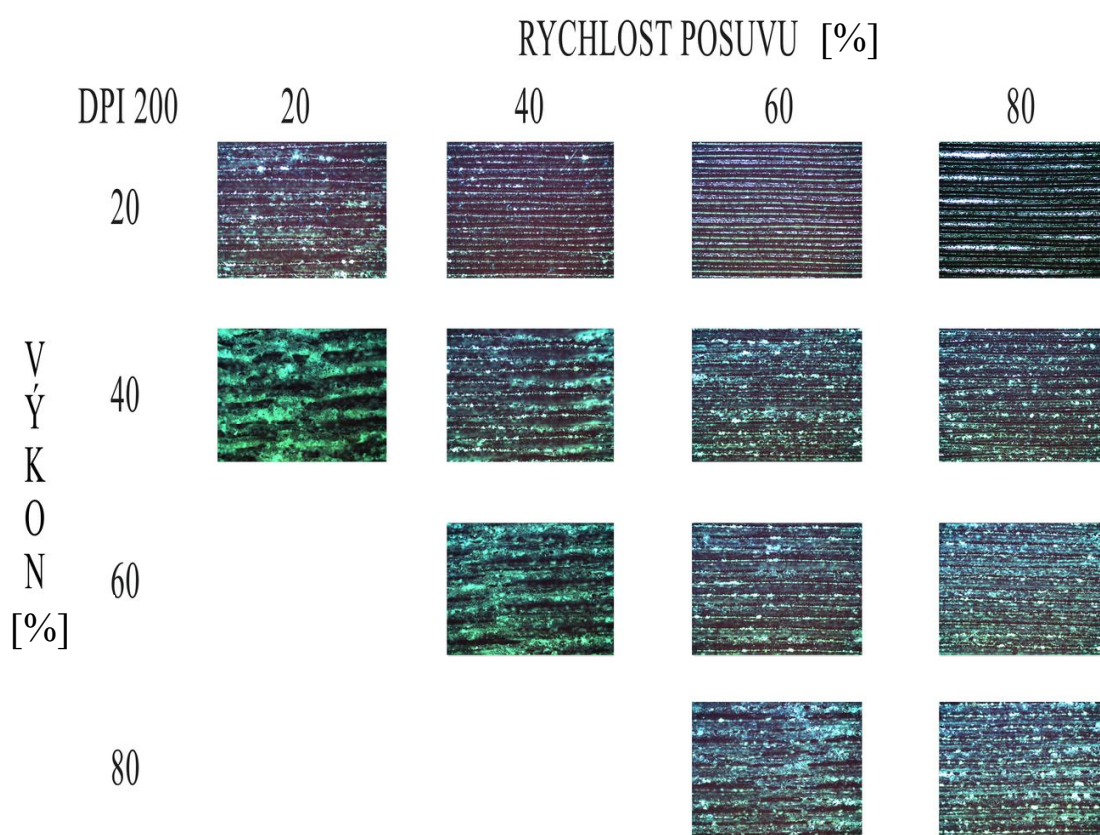
Obr. 45. Detail hloubky obrobené plochy.



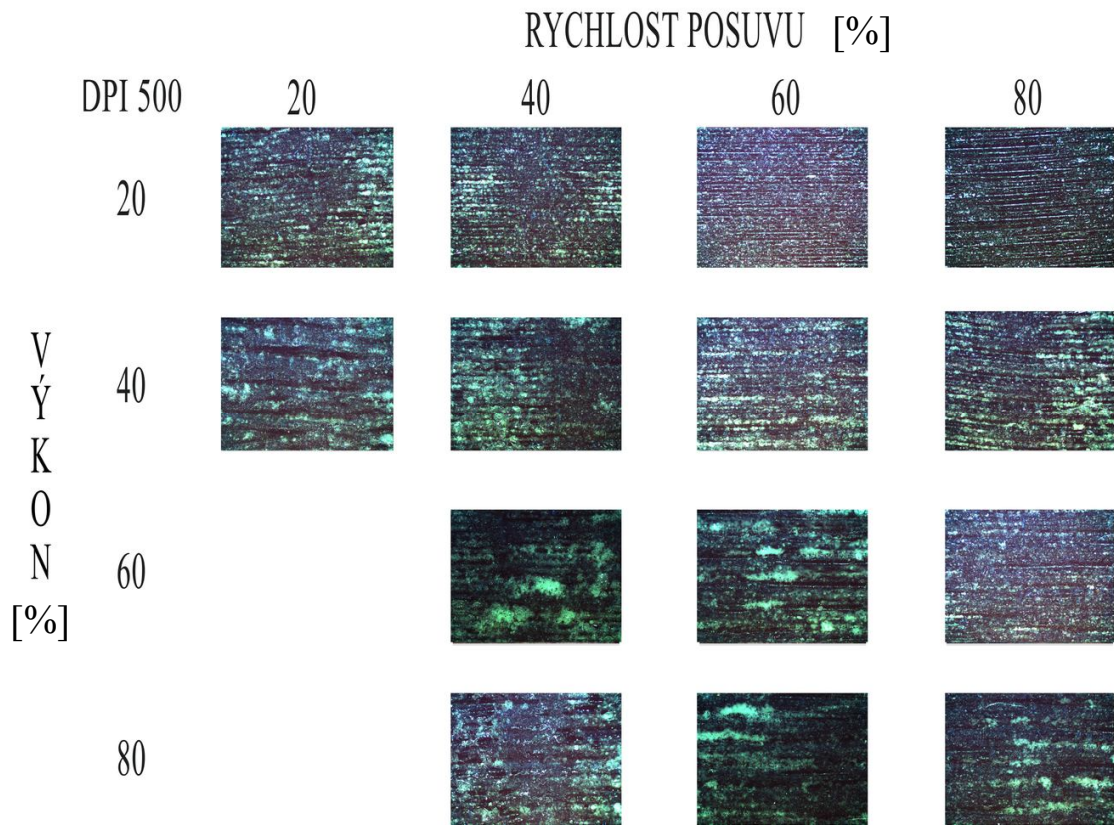
Obr. 46. Mikroskop Leica DMI3000 M.

Tab. 6. Technické parametry mikroskopu Leica DMI3000 M.

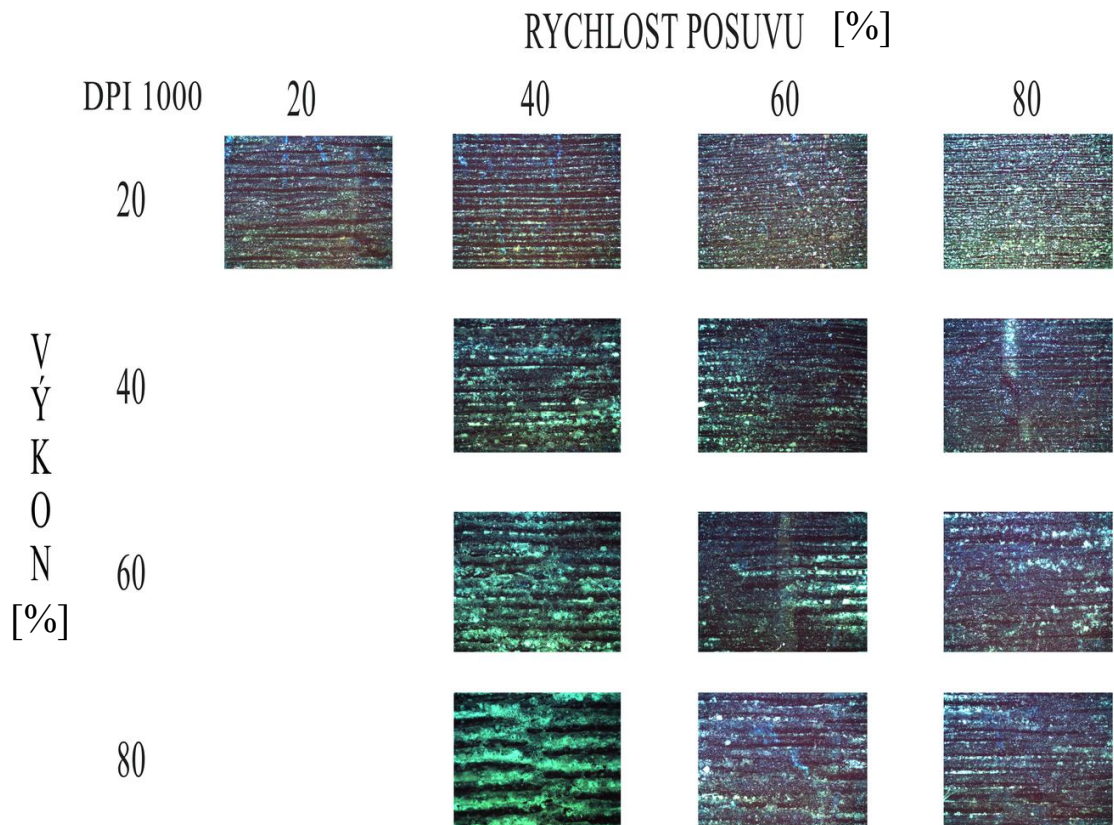
ZAOSTŘENÍ	ruční, hrubé a jemné nastavení
MAXIMÁLNÍ ZVĚTŠENÍ	1000x
DOPADAJÍCÍ SVĚTLO	spodní osvit, přímý osvit, diferenciální interferenční kontrast, fluorescence, polarizované světlo, fázový kontrast



Obr. 47. Rozlišení DPI 200 při zvětšení 50x na mikroskopu Leica DMI3000 M.



Obr. 48. Rozlišení DPI 500 při zvětšení 50x na mikroskopu Leica DMI3000 M.



Obr. 49. Rozlišení DPI 1000 při zvětšení 50x na mikroskopu Leica DMI3000 M.

Vypálené stopy po laseru neboli řádkování jde vidět na mikroskopem zvětšených snímcích. Porovnáním lze určit, že vzorky obrobené rozlišitelností DPI 200 jsou výraznější a větší než u DPI 500, tedy drsnost plochy je větší u vzorku obrobených s rozlišitelností DPI 200. U rozlišitelnosti DPI 1000 lze vidět hodně prasklin a tečení materiálu vlivem vysoké teploty.

5.5 Drsnoměr Taylor Hobson Talysurf CLI 500

Jedná se bezkontaktní 3D drsnoměr firmy Taylor Hobson pro měření struktury povrchu všech materiálů a povrchů. Je vybaven CLA konfokální hlavou, softwarem Talymap 3D verze GOLD. V kterém se dají data upravovat - zvětšení vybraného úseku, odstranění tvaru, odfiltrování vlnitosti či makroskopických chyb atd. Přístroj je určen hlavně pro 3D měření, ale bezproblémově naměří i 2D data. Talysurf se dodává ve třech typech, dle rozměrů a technických parametrů. Talysurf CLI 500 je vhodný pro měření malých součástí, je ekonomicky a prostorově nenáročný.

Tab. 7. Technické parametry drsnoměru Taylor Hobson Talysurf CLI 500.

PRACOVNÍ PROSTOR	50 x 50 x 50 mm
NOSNOST	10 kg
OSOvé ROZLIŠENÍ	0,5 μm
HMOTNOST	55 kg
RYCHLOST MĚŘENÍ	30, 15, 10, 5, 1,05 mm/s
RYCHLOST RYCHLOPOSUVU	30 mm/s



Obr. 50. Drsnoměr Taylor Hobson Talysurf CLI 500.

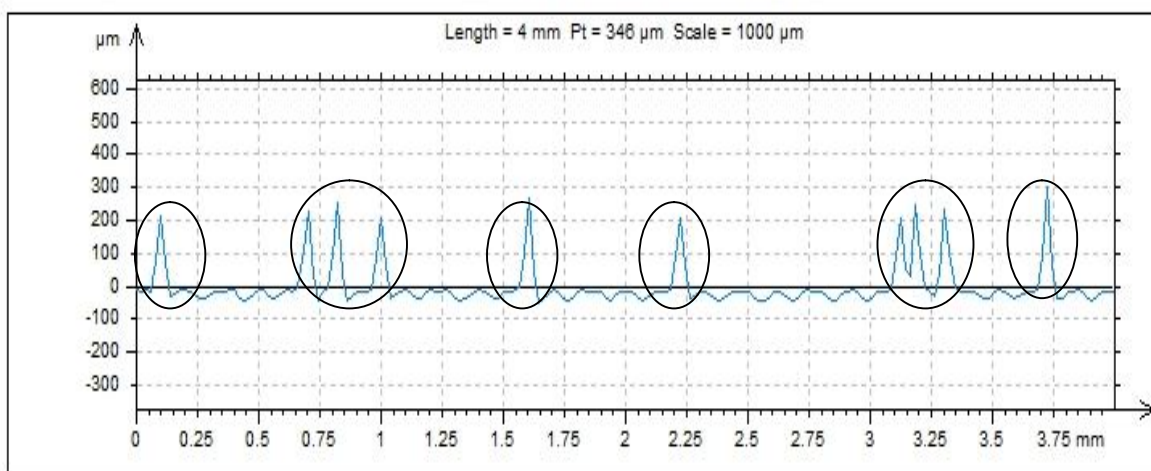
5.6 Měření drsnosti

Před samotným měřením byly vzorky důkladně očištěny od zbytků prachu a nastaveny jednotlivé parametry měření, tedy trajektorie, rychlost posuvu a rychloposuvu. Nastaveno bylo 8 měření o dráze 4 mm a rozestupu 1 mm.

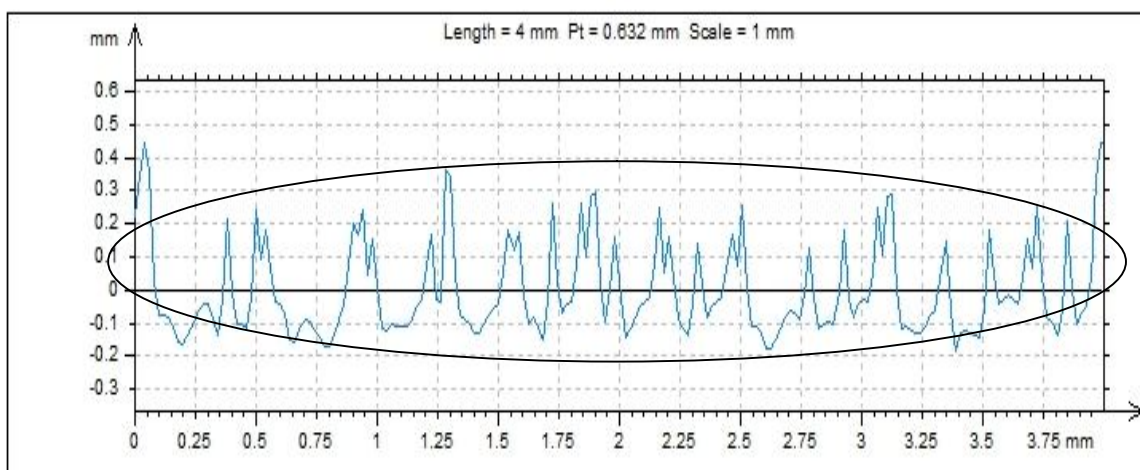


Obr. 51. Příprava před měřením drsnosti.

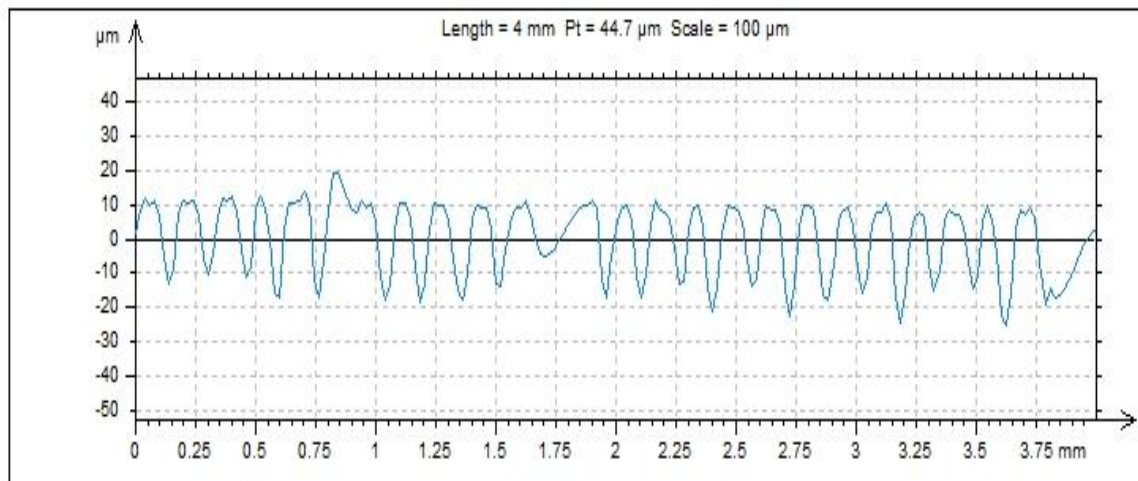
Po nastavení všech hodnot se spustí program tlačítkem scan. Odrazivost musí být minimálně kolem 20 %, ideální jsou hodnoty kolem 50 %. Naměřená data obsahují chyby, které se musí postupně upravit a odstranit. Nejprve se odstraní makroskopické chyby pomocí funkce Retouch profile points. Poté se odstraní tvar příkazem Form removal. Některé data obsahovaly tolik chyb, že byly pro vyhodnocování nepoužitelné. Na (Obr. 52) jsou chyby ojediněle ve formě píku, taková data se jednoduše opraví a hodnoty nejsou výrazně zkresleny. Na (Obr. 53) se chyb vyskytuje značně, po úpravě byly data nepřesné a zavádějící. Pokud bylo možno, tak taková data nejsou použita.



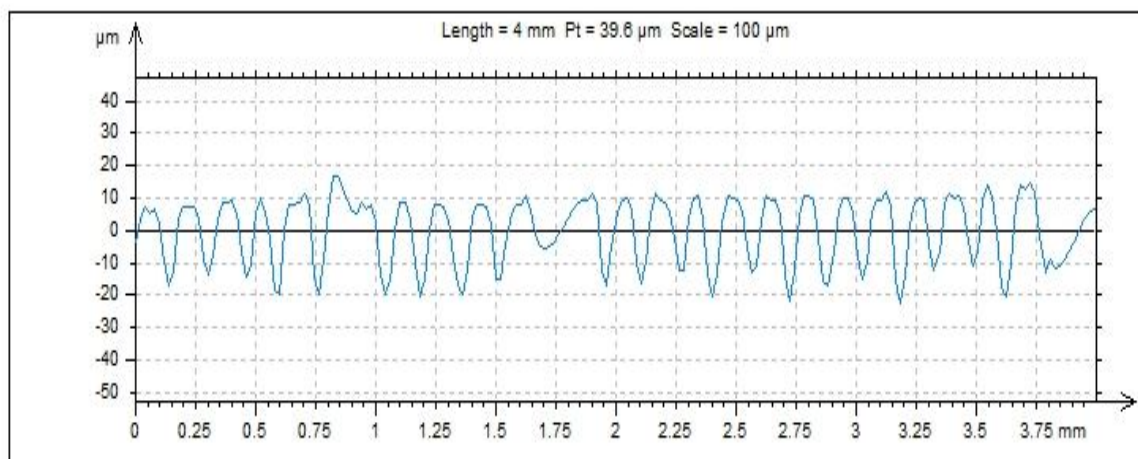
Obr. 52. Drsnost s makroskopickými chybami A.



Obr. 53. Drsnost s makroskopickými chybami B.



Obr. 54. Odfiltrování makroskopických chyb.



Obr. 55. Odfiltrování tvaru.

Po úpravě dat se určí drsnost dle normy ISO 4287 příkazem Parametr list, kde se nastaví Filter size 0,8 mm a povolí se manage end-effects.

ISO 4287		
Amplitude parameters - Rou		
Rp	11.6	µm
Rv	18.4	µm
Rz	29.9	µm
Rc	24.1	µm
Rt	34.8	µm
Ra	7.83	µm
Rq	8.9	µm
Rsk	-0.562	
Rku	2	
Material Ratio parameters - I		
Rmr	1.06	%
Rdc	19.6	µm

Obr. 56. Drsnost dle normy ISO 4287.

6 VYHODNOCENÍ DAT A DISKUZE VÝSLEDKŮ

6.1 Volba materiálu

Z důvodu časových nároků na měření, úpravu výsledku a vytíženosti měřicího přístroje pro vyhodnocení dat byl zvolen materiál PMMA. Polymethylmethakrylát patří do kategorie termoplastů, je průhledný, odolný vůči povětrnostním podmínkám. Vyrábí se blokovou polymerací.

Tab. 8. Vlastnosti PMMA. [22]

HUSTOTA	1,19 g/cm ³
MECHANICKÉ VLASTNOSTI	
PEVNOST V TAHU	73 MPa
TAŽNOST	3,5 %
MODUL PRUŽNOSTI V TAHU	3200 MPa
TVRDOST PODLE BRINELLA	195 MPa
TEPLOTNÍ VLASTNOSTI	
TEPELNÁ VODIVOST	0,19 W/Km
KOEFICIENT DÉLKOVÉ ROZTAŽNOSTI	80·10 ⁻⁶ /K
TEPLOTA TAVENÍ	110 °C
MAX. TEPLOTA KRÁTKODOBÁ	100 °C
MAX. TEPLOTA DLOUHODOBÁ	90 °C

6.2 Vyhodnocení drsnosti

Naměřeno bylo 8 hodnot pro každý vzorek. Z důvodu toho, že některá data obsahovala hodně chyb, tak nebyla použita. Nejnižší použitá četnost je 5 hodnot. Vyhodnocen je aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou.

Tab. 9. Drsnost pro DPI 200, P20, P40, P60.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	PRŮMĚRNÁ HODNOTA
P20/f20									
Ra [μm]	39,00	28,20	24,30	30,40	30,10				30,40 ± 5,39
Rz [μm]	155,00	127,00	112,00	131,60	132,00				131,50 ± 15,44
P20/f40									
Ra [μm]	27,30	26,40	25,00	24,00	29,20				26,38 ± 2,02
Rz [μm]	94,90	106,2	98,10	110,00	126,00				107,25 ± 12,20
P20/f60									
Ra [μm]	16,80	17,60	15,10	15,50	18,90				16,78 ± 1,55
Rz [μm]	62,60	73,20	56,80	61,40	59,10				62,63 ± 6,32
P20/f80									
Ra [μm]	11,60	10,20	7,83	9,26	8,62				9,50 ± 1,31
Rz [μm]	37,40	43,00	29,90	35,90	34,00				36,00 ± 4,29
P40/f20									
Ra [μm]	29,60	18,20	20,60	19,50	22,00				21,98 ± 4,48
Rz [μm]	163,00	98,10	104,00	102,00	115,80				116,78 ± 26,77
P40/f40									
Ra [μm]	44,60	27,90	21,50	28,20	30,50				30,55 ± 8,54
Rz [μm]	173,00	134,00	112,00	125,00	135,7				136,00 ± 22,75
P40/f60									
Ra [μm]	44,60	27,90	21,50	28,20	31,50				30,74 ± 7,65
Rz [μm]	173,00	134,00	112,00	125,00	119,00				132,60 ± 21,45
P40/f80									
Ra [μm]	28,40	24,10	25,50	25,50	26,20	25,40			25,85 ± 1,30
Rz [μm]	89,00	91,70	96,70	96,70	91,60	87,40			92,18 ± 3,52
P60/f20									
Ra [μm]	34,50	24,20	20,50	20,80	18,60	23,40			23,66 ± 4,81
Rz [μm]	186,00	133,00	117,00	109,00	104,00	122,00			127,71 ± 25,38
P60/f40									
Ra [μm]	51,90	21,80	26,80	30,30	28,50				31,86 ± 10,41
Rz [μm]	241,00	122,00	123,00	121,00	118,00				145,00 ± 48,03
P60/f60									
Ra [μm]	54,50	34,70	33,00	24,20	27,00				34,68 ± 11,88
Rz [μm]	172,00	145,70	175,00	120,00	116,00				145,75 ± 27,81
P60/f80									
Ra [μm]	38,20	31,50	31,10	34,70	33,90				33,88 ± 2,86
Rz [μm]	152,00	138,00	128,00	159,00	144,1				144,25 ± 12,05

Tab. 10. Drsnost pro DPI 200, P80.

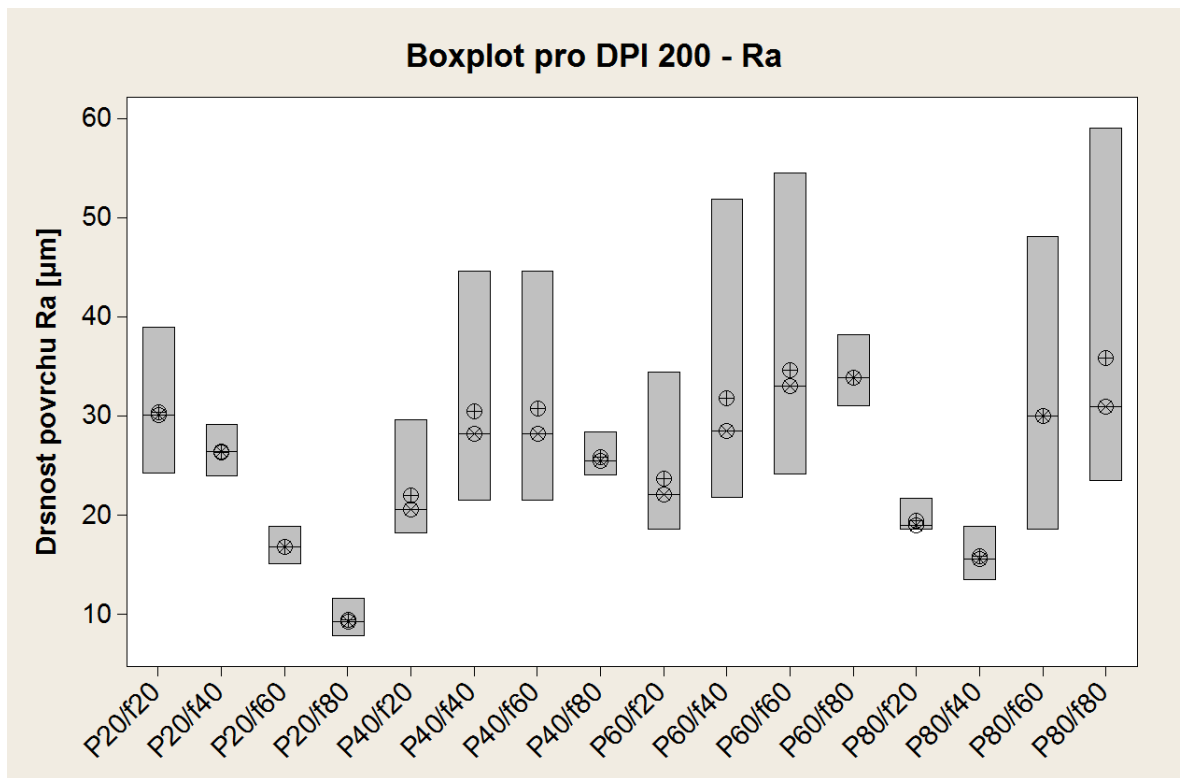
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	PRŮMĚRNÁ HODNOTA
P80/f20									
Ra [μm]	19,48	18,60	21,70	18,60	19,00				19,48 ± 1,29
Rz [μm]	104,5	99,30	120,00	99,30	101,00				104,90 ± 8,75
P80/f40									
Ra [μm]	18,90	14,50	15,60	16,70	13,50				15,63 ± 2,35
Rz [μm]	79,20	59,10	64,00	67,30	52,70				63,67 ± 11,29
P80/f60									
Ra [μm]	48,10	30,10	30,00	18,60	23,30				30,03 ± 11,21
Rz [μm]	185,00	119,00	127,00	89,70	114,00				126,93 ± 35,31
P80/f80									
Ra [μm]	59,10	23,50	31,00	29,70	36,00				35,83 ± 13,73
Rz [μm]	121,00	116,00	117,00	149,00	126,00				125,75 ± 13,55

Tab. 11. DPI 200, závislost drsnosti Ra na výkonu a posuvu.

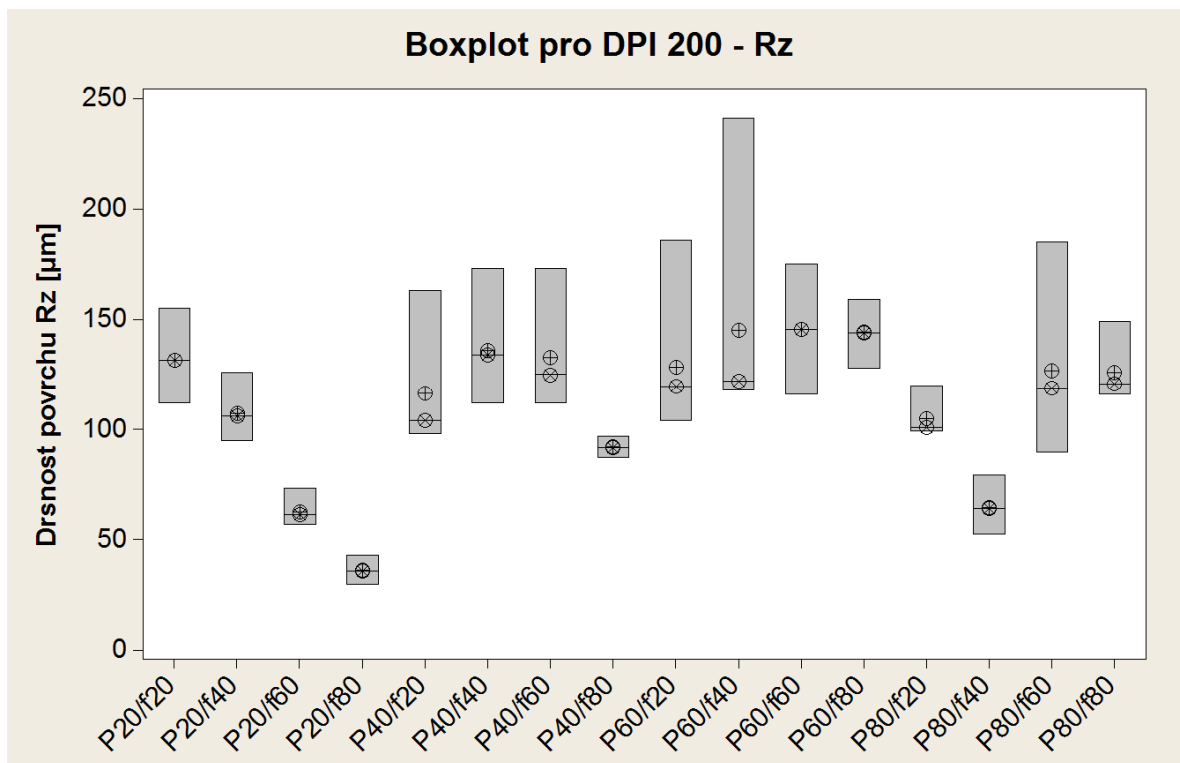
P / f	20	40	60	80
20	30,40 ± 5,39	26,38 ± 2,02	16,78 ± 1,55	9,50 ± 1,31
40	21,98 ± 4,48	30,55 ± 8,54	30,74 ± 7,65	25,85 ± 1,30
60	23,66 ± 4,81	31,86 ± 10,41	34,68 ± 11,88	33,88 ± 2,86
80	19,48 ± 1,29	15,63 ± 2,35	30,03 ± 11,21	35,83 ± 13,73

Tab. 12. DPI 200, závislost drsnosti Rz na výkonu a posuvu.

P / f	20	40	60	80
20	131,50 ± 15,44	107,25 ± 12,20	62,63 ± 6,32	36,00 ± 4,29
40	116,78 ± 26,77	136,00 ± 22,75	132,60 ± 21,45	92,18 ± 3,52
60	127,71 ± 25,38	145,00 ± 48,03	145,75 ± 27,81	144,25 ± 12,05
80	104,90 ± 8,75	63,67 ± 11,29	126,93 ± 35,31	125,75 ± 13,55



Obr. 57. Boxplot pro DPI 200 - Ra.



Obr. 58. Boxplot pro DPI 200 - Rz.

Tab. 13. Drsnost pro DPI 500, P20, P40, P60.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	PRŮMĚRNÁ HODNOTA
P20/f20									
Ra [μm]	8,94	11,50	14,80	11,50	8,48				11,04 ± 2,26
Rz [μm]	52,30	64,60	80,50	64,20	41,30				60,58 ± 13,16
P20/f40									
Ra [μm]	11,20	10,60	10,70	10,30	10,40	10,30			10,58 ± 0,31
Rz [μm]	54,80	50,10	53,20	55,50	51,20	48,50			52,22 ± 2,06
P20/f60									
Ra [μm]	10,60	3,99	6,01	4,77	6,30				6,34 ± 2,56
Rz [μm]	51,20	22,00	29,60	21,70	31,20				31,13 ± 12,01
P20/f80									
Ra [μm]	6,33	7,99	5,12	5,79	5,96				6,24 ± 0,48
Rz [μm]	23,60	40,90	25,20	27,70	28,60				29,1 ± 3,07
P40/f20									
Ra [μm]	11,30	17,30	10,20	11,20	13,70	10,30	14,60	8,65	12,66 ± 2,55
Rz [μm]	55,40	74,70	45,30	55,00	69,00	49,10	72,50	54,20	60,14 ± 10,58
P40/f40									
Ra [μm]	10,60	10,60	7,22	7,07	8,90				8,87 ± 1,73
Rz [μm]	56,10	60,00	31,80	35,60	46,20				45,88 ± 12,33
P40/f60									
Ra [μm]	13,80	13,30	13,20	13,80	12,20				13,27 ± 0,75
Rz [μm]	67,30	67,40	64,20	72,90	59,10				66,43 ± 5,67
P40/f80									
Ra [μm]	15,10	14,20	11,40	13,60	16,30	11,20			13,63 ± 1,64
Rz [μm]	67,10	72,70	53,70	60,30	82,00	49,50			64,22 ± 5,67
P60/f20									
Ra [μm]	11,30	12,30	11,40	21,40	14,10				14,10 ± 4,23
Rz [μm]	52,50	50,70	55,60	144,00	75,60				75,70 ± 39,47
P60/f40									
Ra [μm]	15,30	12,30	12,50	12,00	10,30				12,48 ± 1,80
Rz [μm]	77,80	61,90	62,70	59,20	51,70				62,65 ± 9,51
P60/f60									
Ra [μm]	12,60	9,10	12,30	19,30	13,30				13,33 ± 3,71
Rz [μm]	60,60	43,90	58,00	88,40	62,70				62,73 ± 16,13
P60/f80									
Ra [μm]	15,90	14,90	16,90	10,90	8,91				13,50 ± 3,07
Rz [μm]	79,00	71,50	80,60	51,70	41,30				64,82 ± 15,62

Tab. 14. Drsnost pro DPI 500, P80.

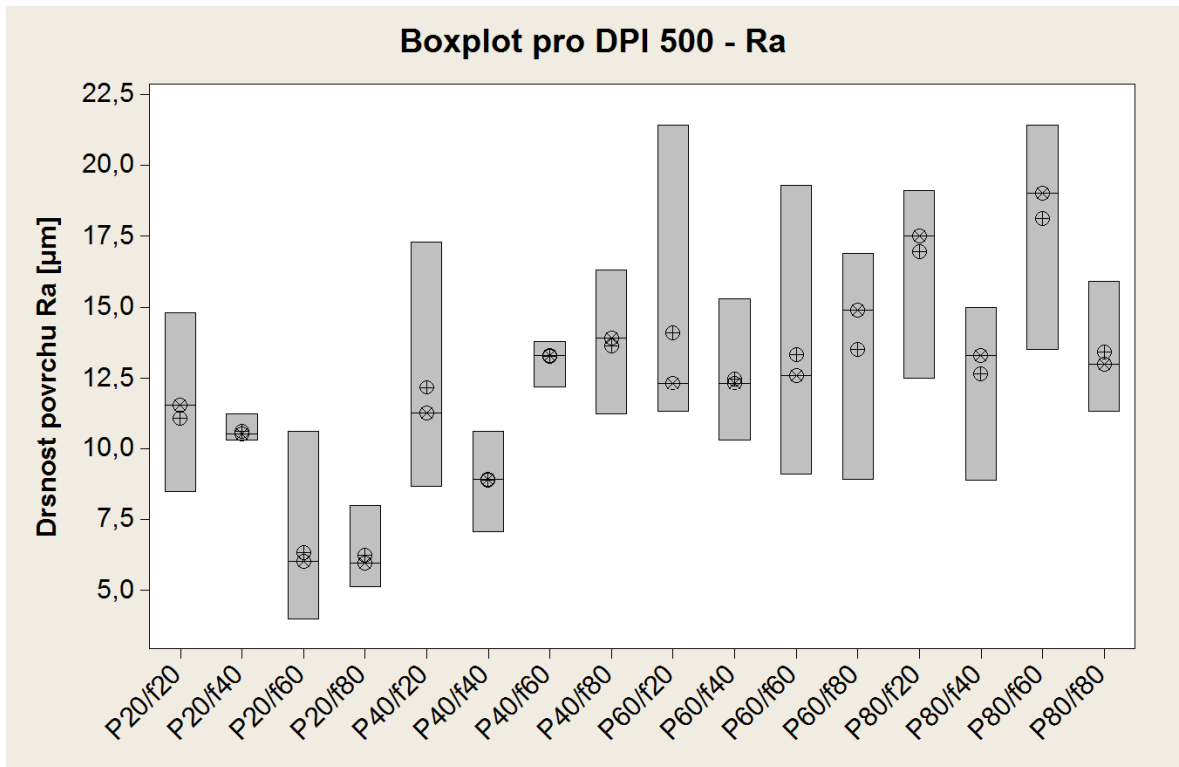
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	PRŮMĚRNÁ HODNOTA
P80/f20									
Ra [μm]	19,10	17,50	17,00	12,50	18,60				16,93 ± 2,62
Rz [μm]	88,60	84,60	75,90	56,70	75,10				76,25 ± 12,31
P80/f40									
Ra [μm]	15,00	13,30	8,88	13,60	12,50				12,66 ± 2,05
Rz [μm]	70,00	65,00	48,40	63,50	68,90				63,16 ± 7,76
P80/f60									
Ra [μm]	21,40	14,30	20,20	19,00	19,70	18,80	13,50		18,13 ± 2,44
Rz [μm]	98,80	75,20	98,20	80,10	83,60	85,00	66,00		67,51 ± 9,62
P80/f80									
Ra [μm]	13,50	13,00	11,30	12,20	12,10	15,90	15,90		13,41 ± 0,76
Rz [μm]	68,40	58,90	61,90	54,10	56,90	86,20	86,20		67,51 ± 4,89

Tab. 15. DPI 500, závislost drsnosti Ra na výkonu a posuvu.

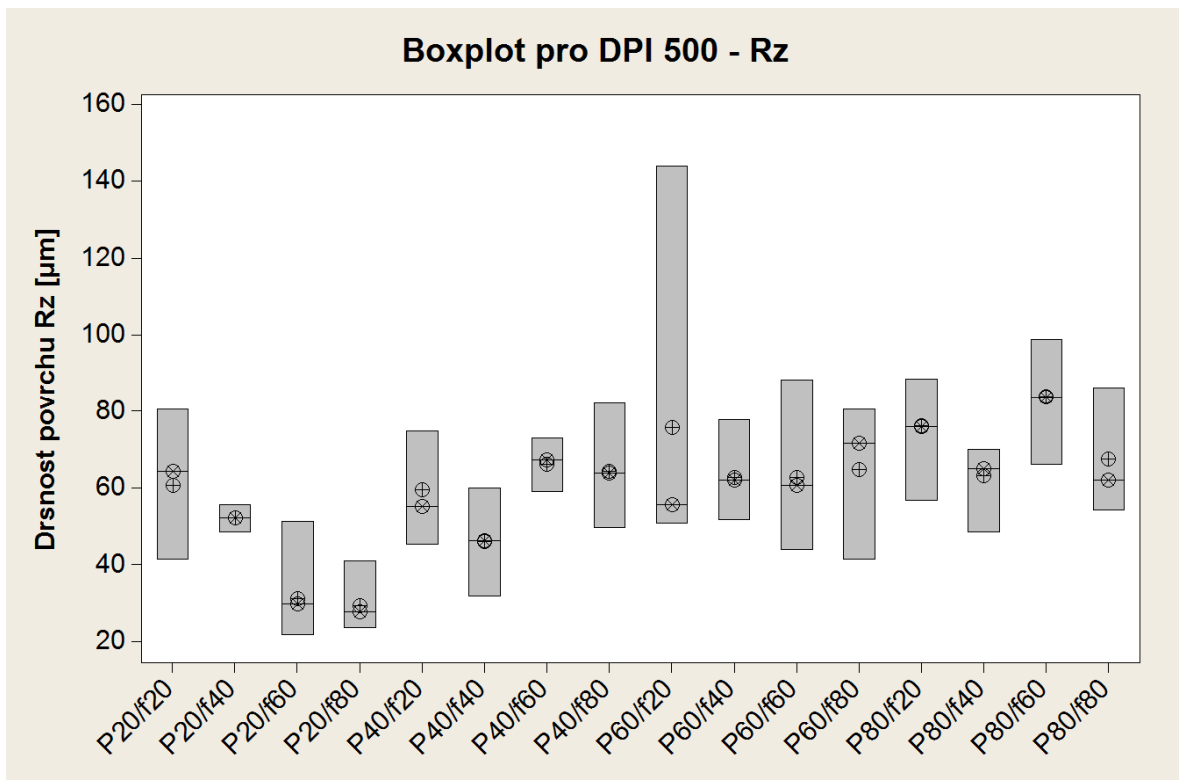
P / f	20	40	60	80
20	11,04 ± 2,26	10,58 ± 0,31	6,34 ± 2,56	6,24 ± 0,48
40	12,66 ± 2,55	8,87 ± 1,73	13,27 ± 0,75	13,63 ± 1,64
60	14,10 ± 4,23	12,48 ± 1,80	13,33 ± 3,71	13,50 ± 3,07
80	16,93 ± 2,62	12,66 ± 2,05	18,13 ± 2,44	13,41 ± 0,76

Tab. 16. DPI 500, závislost drsnosti Rz na výkonu a posuvu.

P / f	20	40	60	80
20	60,58 ± 13,16	52,22 ± 2,06	31,13 ± 12,01	29,1 ± 3,07
40	60,14 ± 10,58	45,88 ± 12,33	66,43 ± 5,67	64,22 ± 5,67
60	75,70 ± 39,47	62,65 ± 9,51	62,73 ± 16,13	64,82 ± 15,62
80	76,25 ± 12,31	63,16 ± 7,76	83,84 ± 9,62	67,51 ± 4,89



Obr. 59. Boxplot pro DPI 500 - Ra.



Obr. 60. Boxplot pro DPI 500 - Rz.

Tab. 17. Drsnost pro DPI 1000, P20, P40.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	PRŮMĚR. HODNOTA
P20/f20									
Ra [μm]	18,00	14,00	13,30	12,00	15,70				14,60 ± 2,08
Rz [μm]	92,30	62,40	79,10	58,90	70,80				72,70 ± 12,04
P20/f40									
Ra [μm]	17,00	6,30	12,10	14,40	22,40	17,90			15,02 ± 5,03
Rz [μm]	72,50	32,80	52,60	62,90	99,20	76,70			66,12 ± 20,62
P20/f60									
Ra [μm]	9,46	4,12	7,63	3,55	4,49	6,89	8,69	6,22	6,38 ± 2,04
Rz [μm]	39,40	21,90	34,20	21,30	21,20	33,20	42,50	31,50	30,65 ± 7,83
P20/f80									
Ra [μm]	5,64	4,91	4,95	3,85	5,48	4,96	6,29		5,15 ± 0,70
Rz [μm]	25,60	23,60	25,60	21,20	27,20	25,40	33,00		25,94 ± 3,38
P40/f20									
Ra [μm]	24,20	20,4	26,13	19,65	21,69				22,49 ± 2,71
Rz [μm]	96,2	90,1	108,00	86,40	85,50				93,30 ± 10,40
P40/f40									
Ra [μm]	16,40	12,20	18,50	22,90	14,40				16,88 ± 3,66
Rz [μm]	81,70	57,80	83,80	124,00	78,50				85,16 ± 21,52
P40/f60									
Ra [μm]	25,10	28,60	20,90	9,02	12,20	25,30	28,30		21,35 ± 7,24
Rz [μm]	95,40	111,00	87,30	45,20	52,00	121,00	107,00		88,41 ± 27,15
P40/f80									
Ra [μm]	18,00	14,00	12,00	15,70	15,00				14,93 ± 2,21
Rz [μm]	92,30	62,40	58,90	70,80	71,80				71,10 ± 12,98

Tab. 18. Drsnost pro DPI 1000, P60, P80.

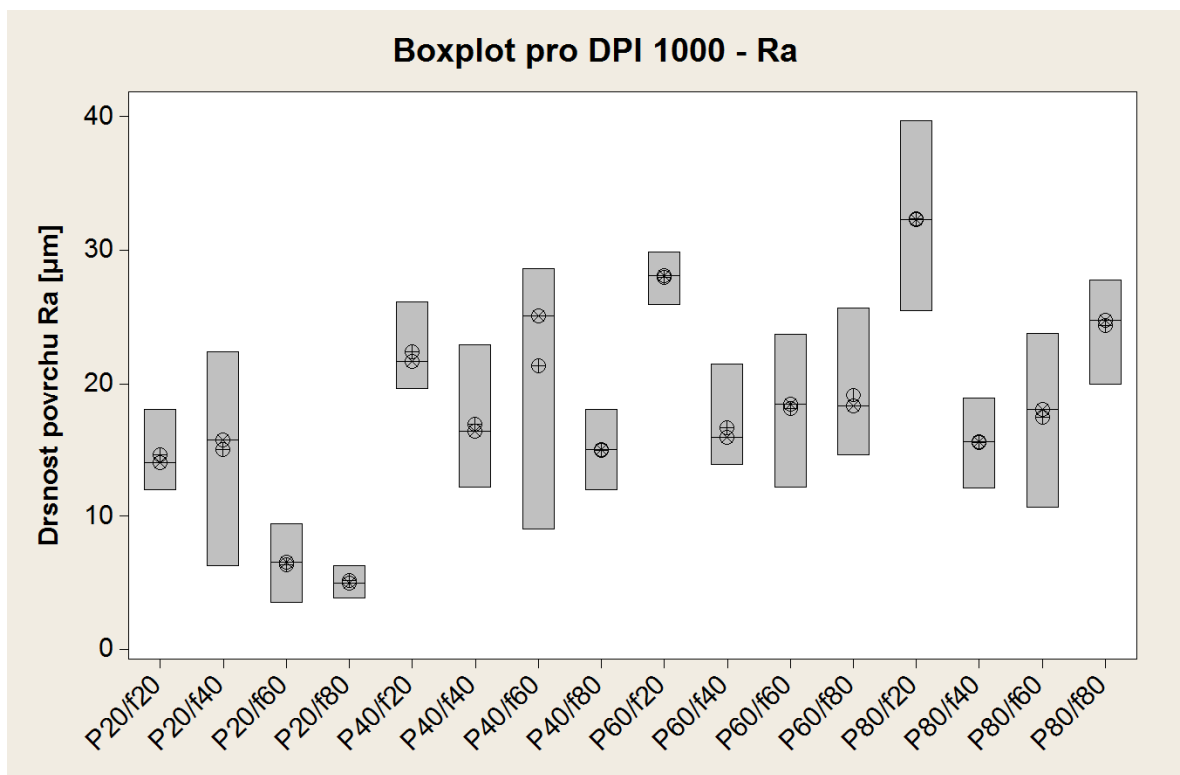
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	PRŮMĚR. HODNOTA
P60/f20									
Ra [μm]	25,92	27,00	29,1	28,14	29,85				27,97 ± 1,61
Rz [μm]	120,30	110,5	120,1	99,60	126,90				115,60 ± 11,63
P60/f40									
Ra [μm]	14,80	21,50	13,90	20,20	15,90	16,00	14,60	16,40	16,66 ± 2,56
Rz [μm]	79,90	100,00	67,40	88,50	75,50	80,30	69,40	80,60	80,20 ± 9,77
P60/f60									
Ra [μm]	23,70	22,10	16,70	13,20	12,20	20,10	21,00	15,70	18,09 ± 3,97
Rz [μm]	100,00	101,00	17,70	62,40	57,20	98,60	92,30	67,20	74,55 ± 27,33
P60/f80									
Ra [μm]	17,10	14,60	18,40	16,20	20,10	25,70	18,20	22,90	19,15 ± 3,41
Rz [μm]	76,90	60,10	74,50	74,70	89,80	103,00	82,90	98,00	82,49 ± 13,10
P80/f20									
Ra [μm]	39,70	25,50	32,30	28,70	35,60				32,36 ± 5,00
Rz [μm]	142,00	110,00	146,00	109,00	150,00				131,40 ± 18,06
P80/f40									
Ra [μm]	18,90	12,10	16,40	14,80	15,60				15,55 ± 2,47
Rz [μm]	85,70	59,20	98,10	75,00	80,00				79,50 ± 14,29
P80/f60									
Ra [μm]	18,30	17,70	12,00	10,70	12,40	22,10	22,60	23,80	17,45 ± 4,87
Rz [μm]	83,40	83,50	58,50	54,50	62,10	99,80	105,00	103,00	81,23 ± 19,34
P80/f80									
Ra [μm]	22,60	20,00	24,80	27,80	24,70	26,30			24,37 ± 2,52
Rz [μm]	123,00	101,00	129,00	129,00	115,00	130,00			121,17 ± 10,40

Tab. 19. DPI 1000, závislost drsnosti Ra na výkonu a posuvu.

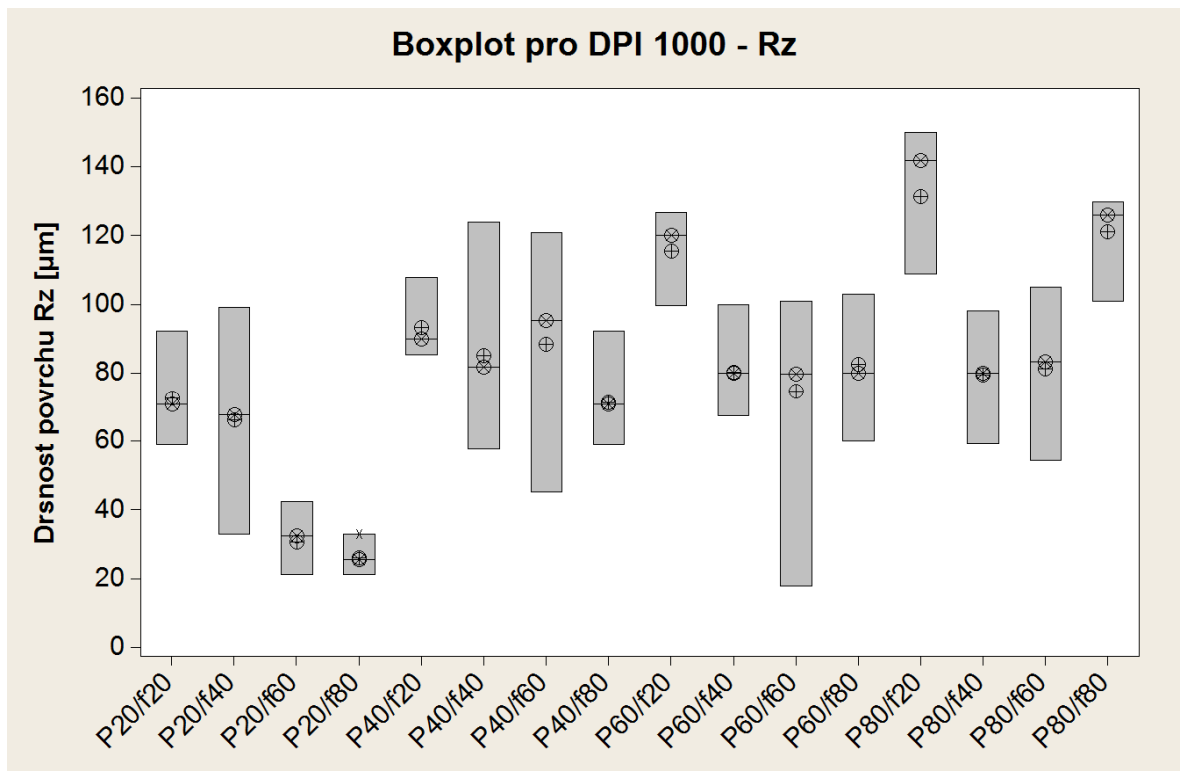
P / f	20	40	60	80
20	14,60 ± 2,08	15,02 ± 5,03	6,38 ± 2,04	5,15 ± 0,70
40	22,49 ± 2,71	16,88 ± 3,66	21,35 ± 7,24	14,93 ± 2,21
60	27,97 ± 1,61	16,66 ± 2,56	18,09 ± 3,97	19,15 ± 3,41
80	32,36 ± 5,00	15,55 ± 2,47	17,45 ± 4,87	24,37 ± 2,52

Tab. 20. DPI 1000, závislost drsnosti Rz na výkonu a posuvu.

P / f	20	40	60	80
20	72,70 ± 12,04	66,12 ± 20,62	30,65 ± 7,83	25,94 ± 3,38
40	93,30 ± 10,40	85,16 ± 21,52	88,41 ± 27,15	71,10 ± 12,98
60	115,60 ± 11,63	80,20 ± 9,77	74,55 ± 27,33	82,49 ± 13,10
80	131,40 ± 18,06	79,50 ± 14,29	81,23 ± 19,34	121,17 ± 10,40

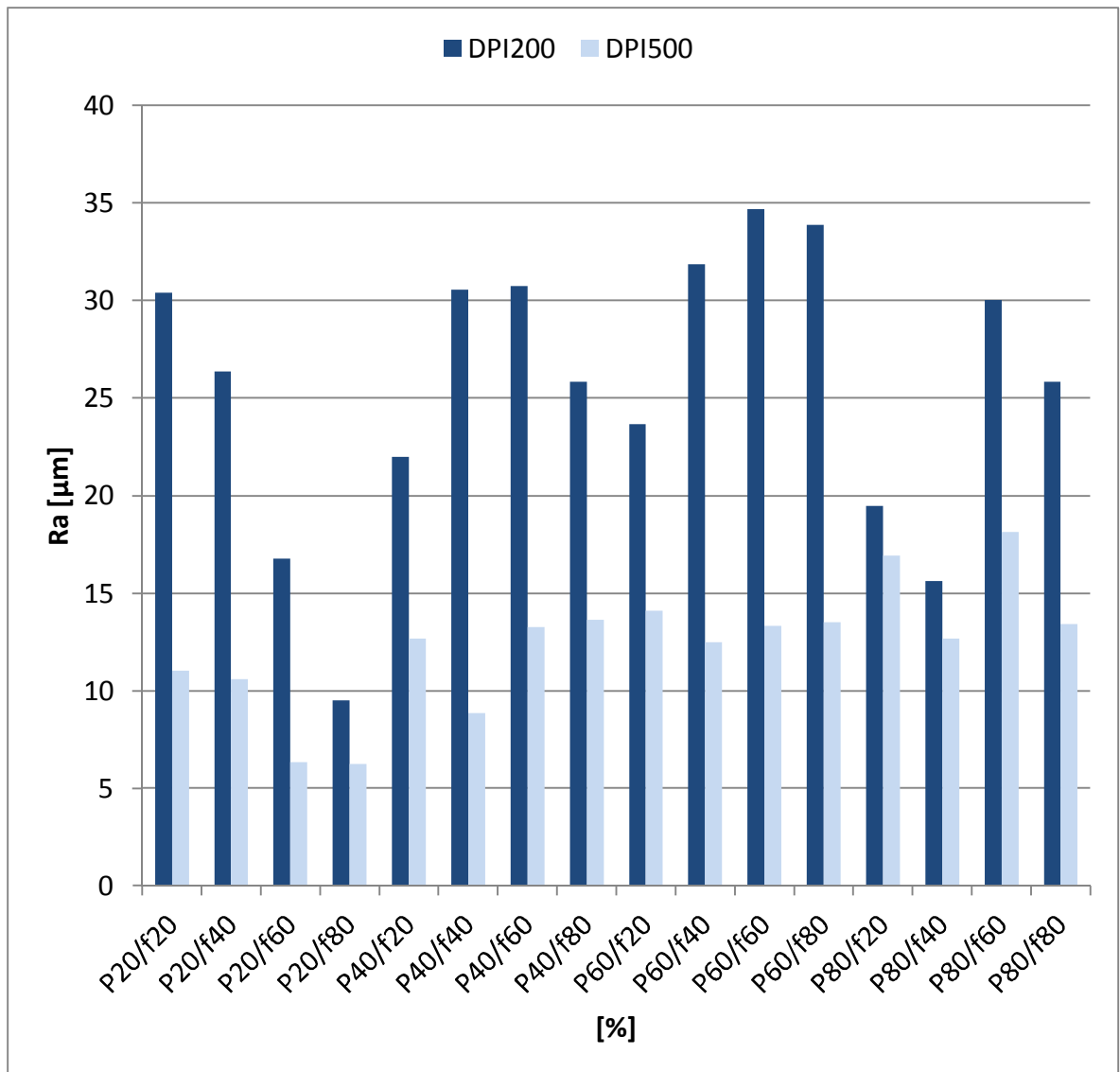


Obr. 61. Boxplot pro DPI 1000 - Ra.

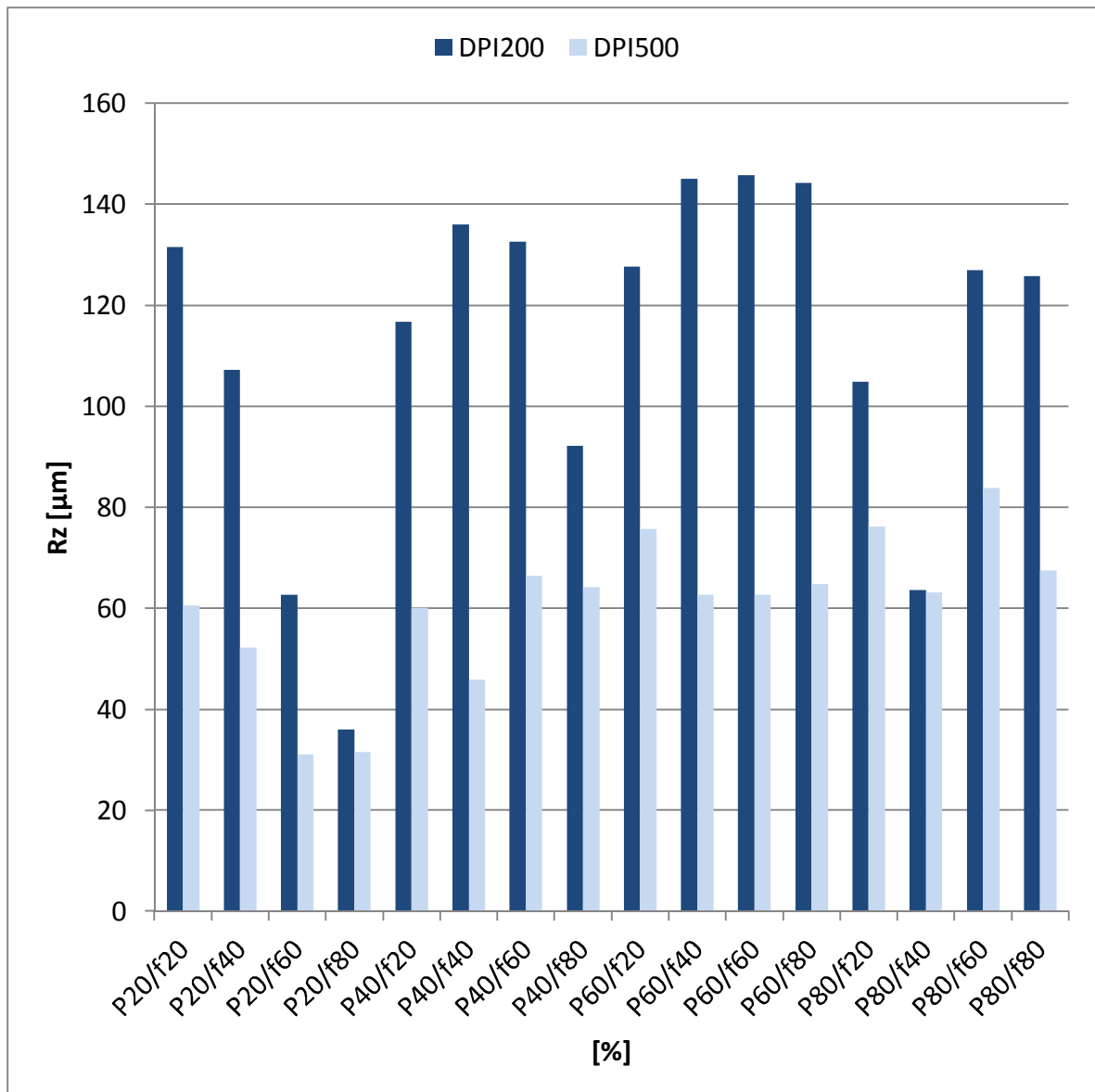


Obr. 62. Boxplot pro DPI 1000 - Rz.

Do tabulek byla zpracována naměřená data, z nichž se určil jejich aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou. Pro přehlednost jsou zkompletovány shrnující tabulky a grafy, kde se dá rychle určit naměřená drsnost povrchu. V boxplotovém diagramu je symbolem plus označen aritmetický průměr a křížkem medián. Medián není ovlivněn extrémními hodnotami, tudíž má lepší vypovídající hodnotu.



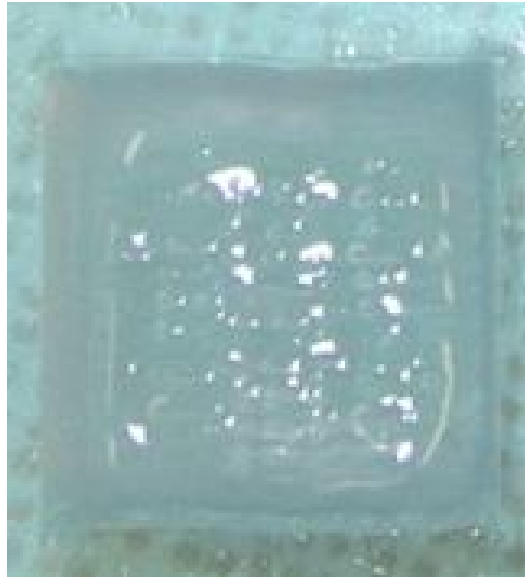
Obr. 63. Porovnání drsnosti R_a pro DPI 200 a DPI 500.



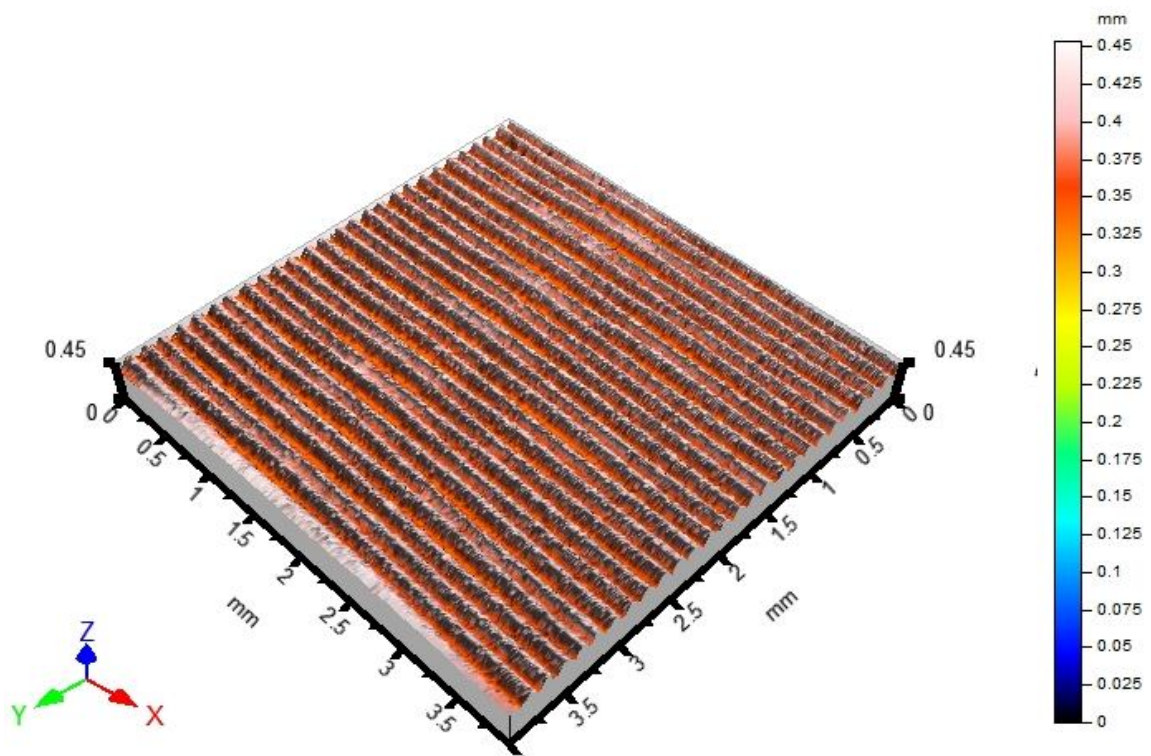
Obr. 64. Porovnání drsnosti Rz pro DPI 200 a DPI 500.

Nejvyšších hodnot drsnosti bylo naměřeno hlavně u vyšších výkonů 60 W a 80 W. U nízkého výkonu 20 W se se zvyšující se hodnotou posuvu zlepšuje kvalita obrobené plochy. Rozlišení DPI má značný vliv na kvalitu povrchu. Při nastavení DPI 200 dosahuje drsnost nejvyšších hodnot, při DPI 500 se jakost povrchu výrazně zlepší, někdy až na poloviční hodnoty. Rozlišení DPI 1000 ale tento trend nepotvrdil, průměrné hodnoty Ra i Rz se zvýšily. Příčinou toho je, že při takovém rozlišení DPI působí laserový paprsek dlouhou dobu na obráběnou plochu, tím se materiál zahřeje a začne se roztékat (Obr. 65). Rozlišení DPI 1000 není vhodné pro materiál PMMA, proto není zahrnuto v porovnání. Další faktorem je ekonomická stránka. Se zvyšujícím se výkonem a snižující se posuvovou rychlostí rostou

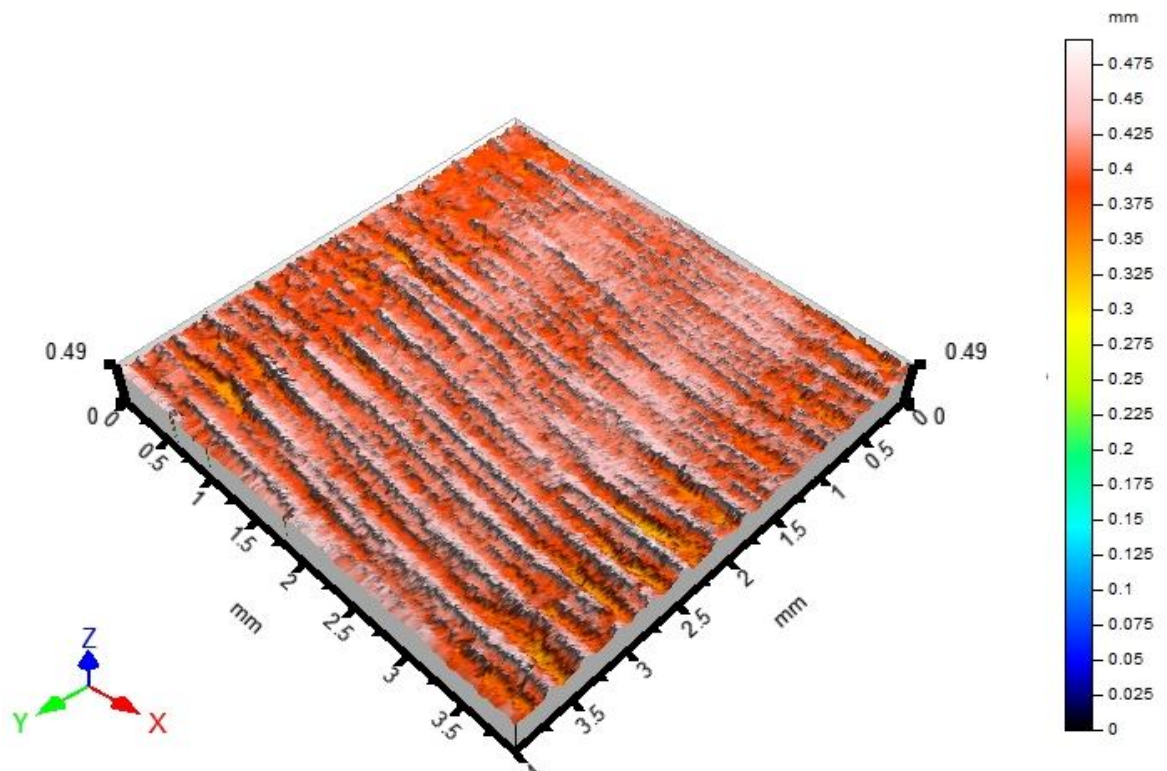
náklady na obrábění a tím se zvyšuje cena výrobku. Vysoký výkon a nízká rychlost posuvu zvyšují odebranou hloubku materiálu. Všechny tyto aspekty se musí zohlednit při výběru daných optimálních obráběcích podmínek.



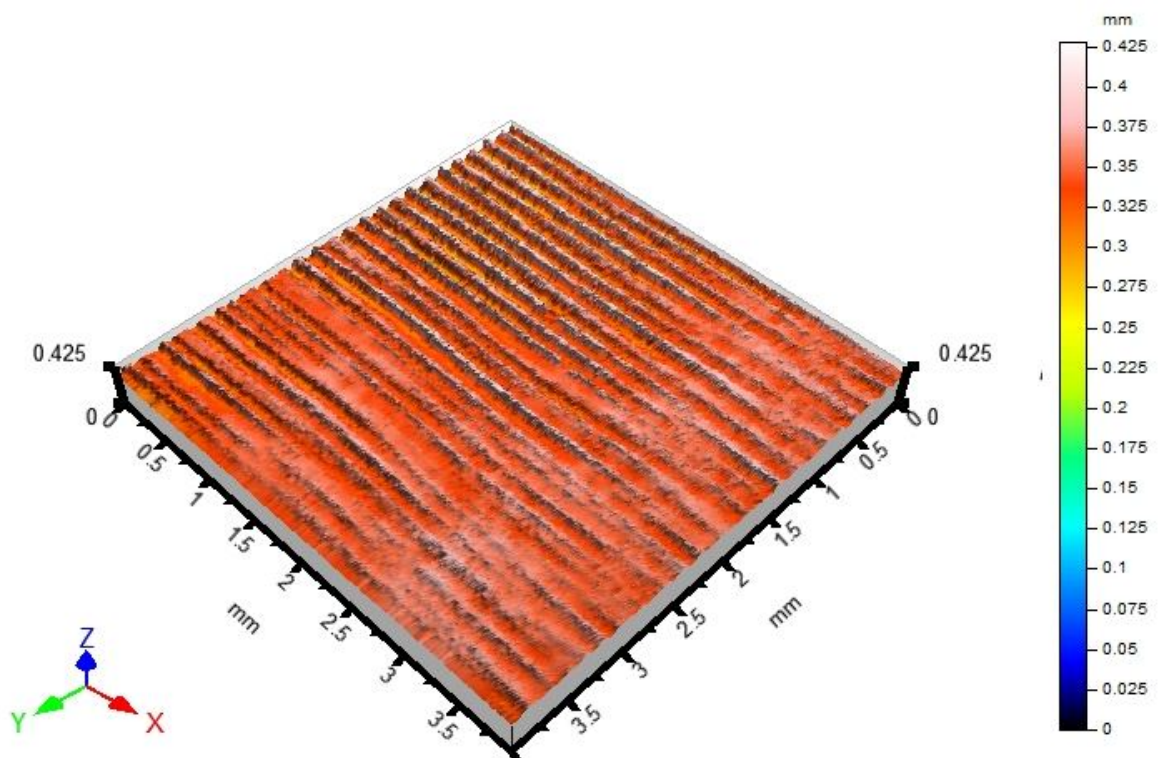
Obr. 65. Vliv dlouhého působení laserového paprsku na obráběnou plochu.



Obr. 66. 3D scan pro vzorek DPI 200, $P = 40$ W, $f = 1219,2$ mm/s.



Obr. 67. 3D scan pro vzorek DPI 500, $P = 40$ W, $f = 1219,2$ mm/s.



Obr. 68. 3D scan pro vzorek DPI 1000, $P = 40$ W, $f = 1219,2$ mm/s.

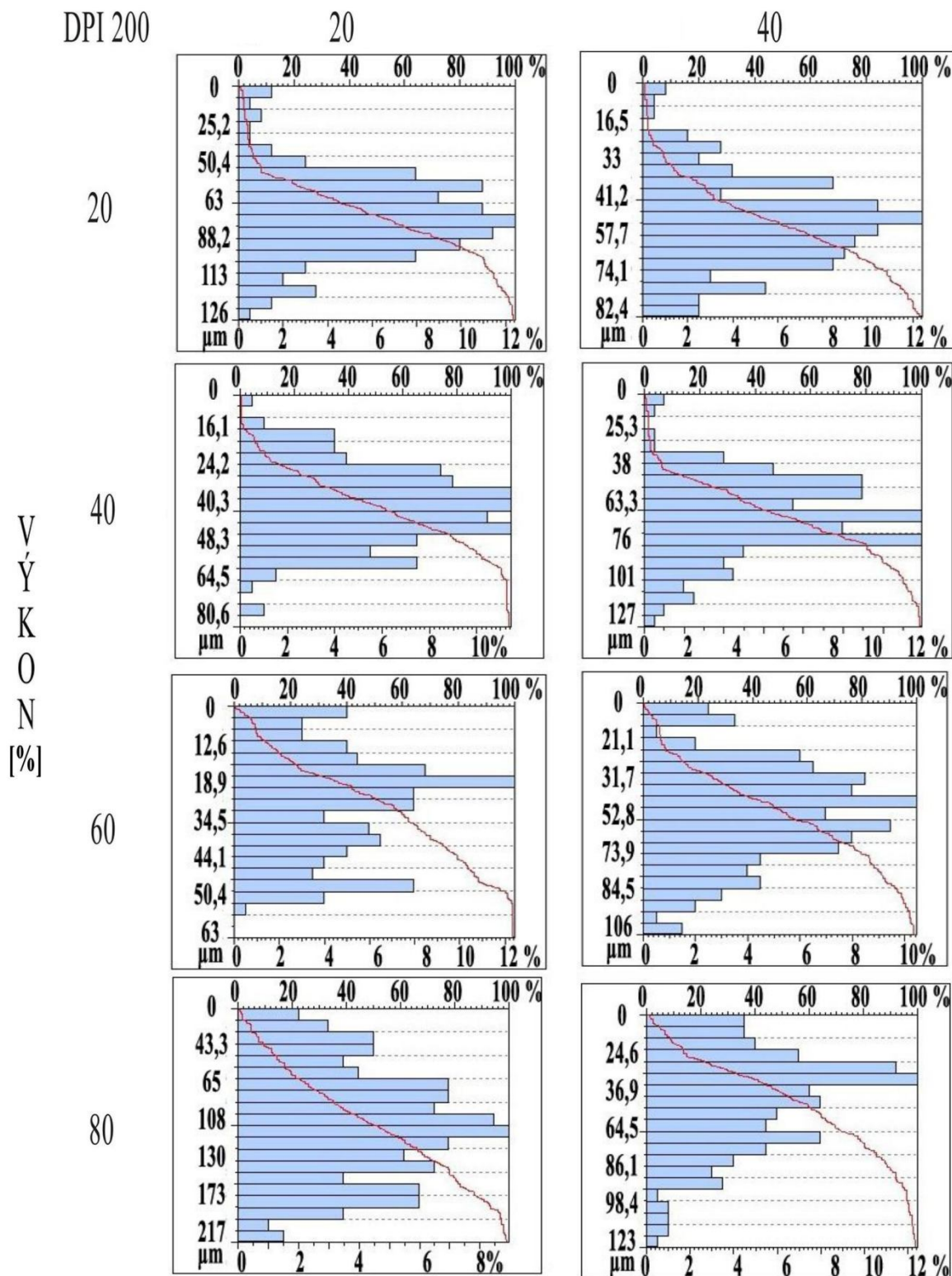
Vyhodnocení 3D struktury odpovídá stavu povrchu obrobené plochy. Viditelné jsou spečené stopy zanechané paprskem, zvláště u vyšších rozlišitelností DPI. U rozlišitelnosti DPI 1000 jde vidět, že se materiál začal roztékat.

6.3 Materiálový podíl drsnosti profilu Rmr

Materiálový podíl drsnosti profilu vyjadřuje procentuální podíl součtu délek materiálových přímek v dané výšce profilu k měřené délce.

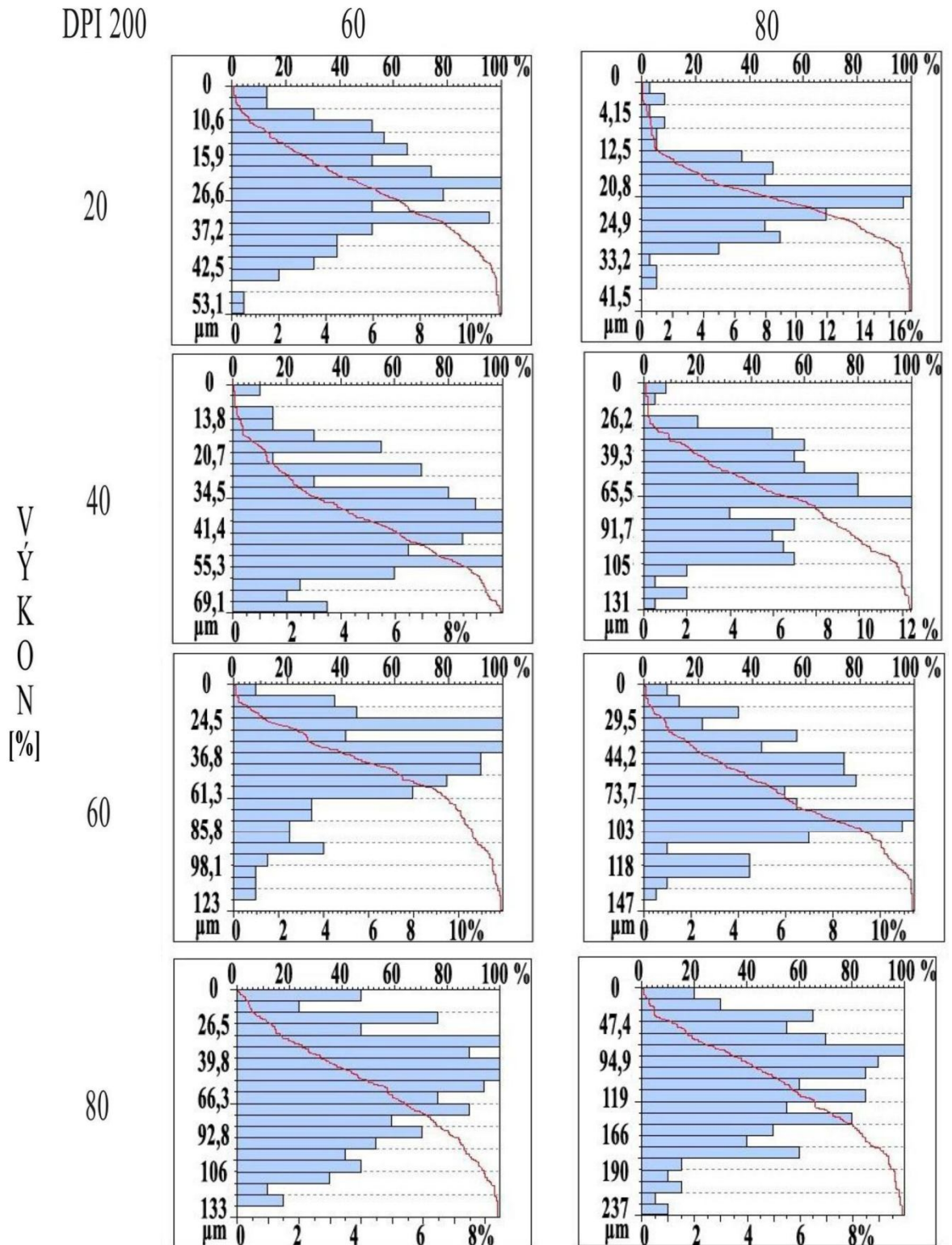
Na svislé ose se odečítá výška jednotlivých nerovností v μm , na spodní vodorovné ose je jejich procentuální obsah, tím pádem můžeme určit, kolik procent určité výškové nerovnosti se na vyhodnocované délce vyskytuje. Nosná křivka určí, kolik procent materiálu se v dané hloubce nachází. Povrch se definuje podle Abbott-Firestonovy křivky tak, že v místě nejstrmějšího klesání křivky má materiál nejmenší nosný podíl na měřené délce a čím má křivka plošší průběh, tím více materiálu se v dané hloubce vyskytuje.

RYCHLOST POSUVU [%]



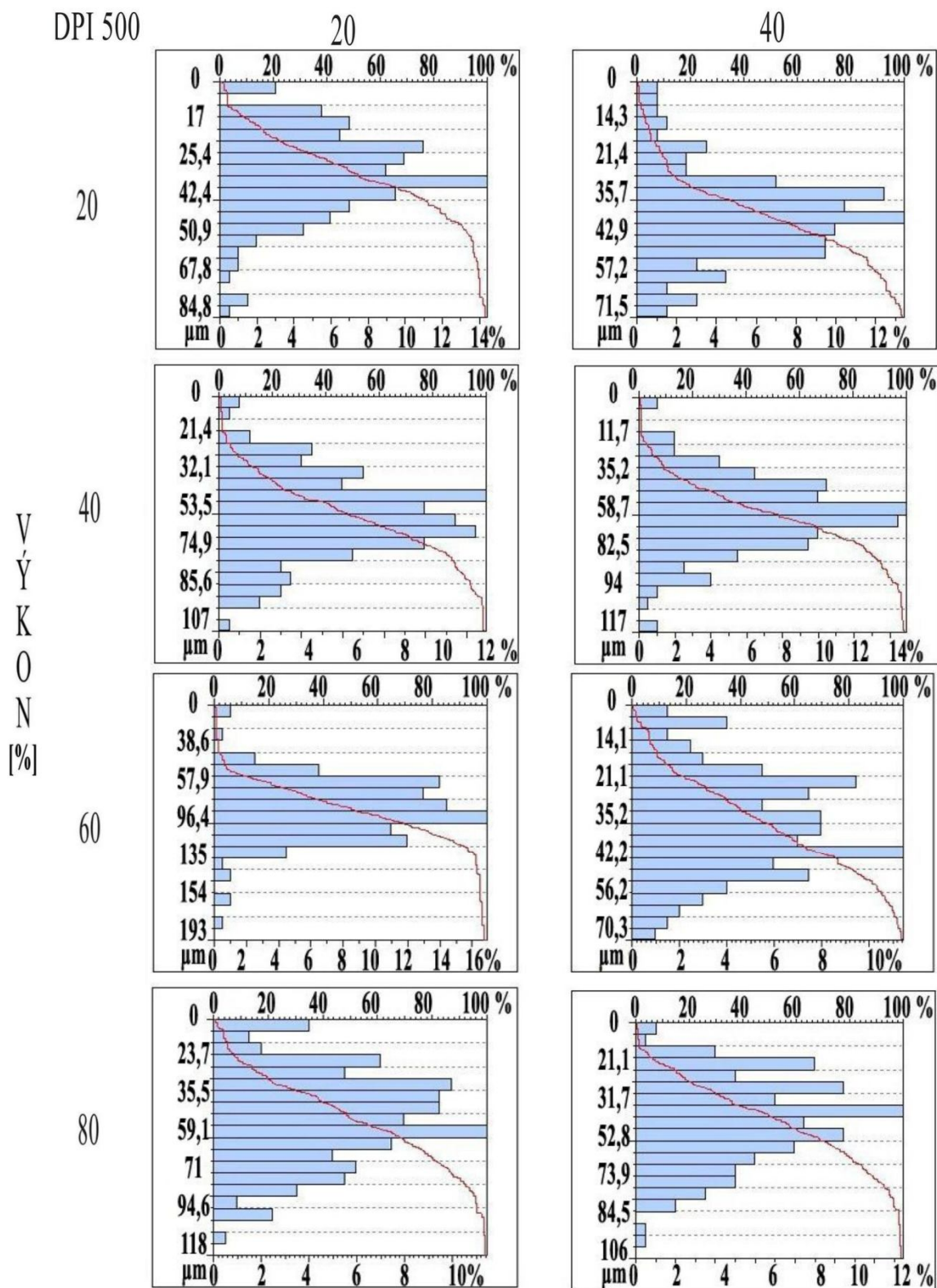
Obr. 69. Křivka materiálového podílu DPI 200, f20, f40.

RYCHLOST POSUVU [%]



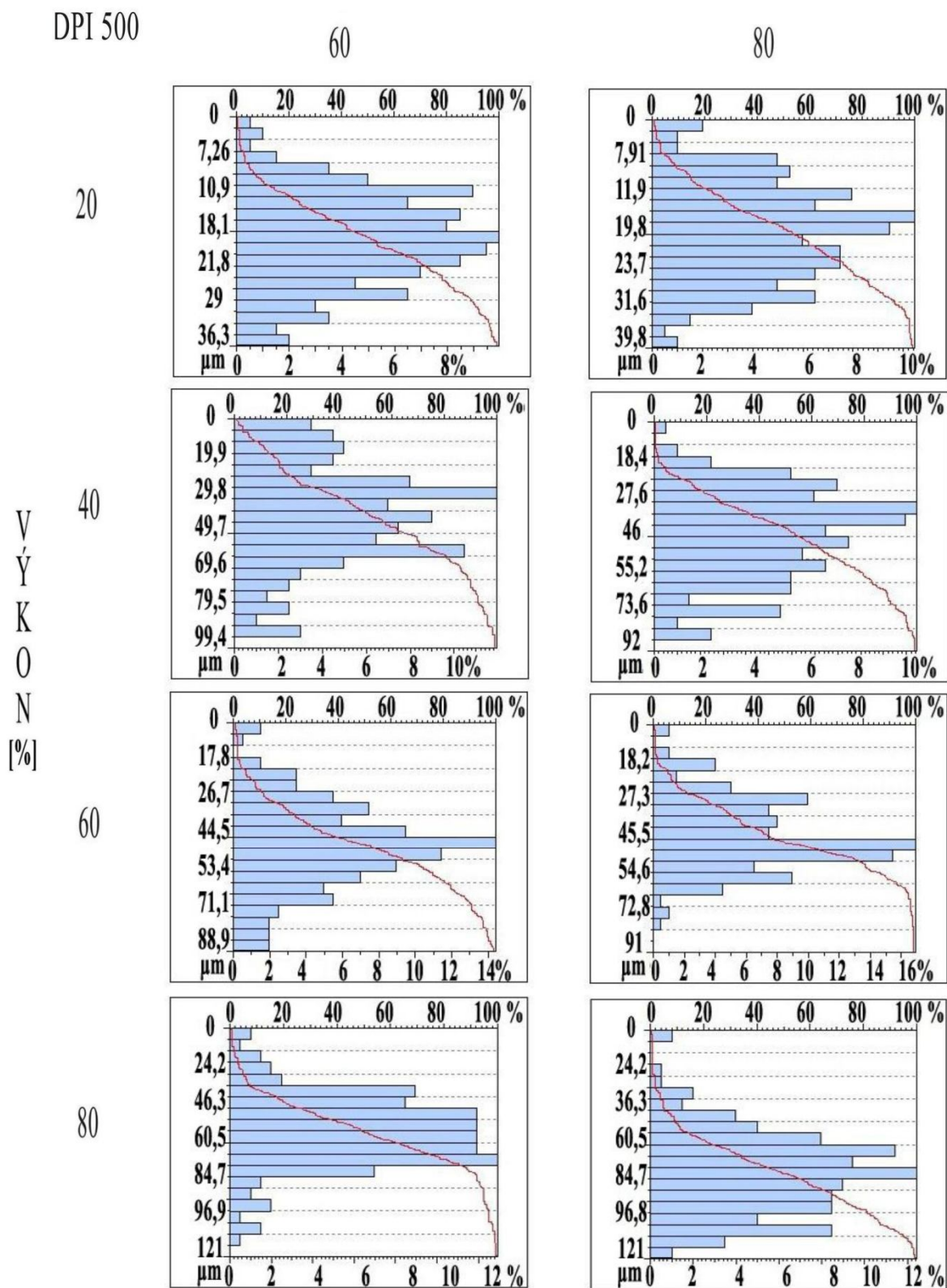
Obr. 70. Křivka materiálového podílu DPI 200, f60, f80.

RYCHLOST POSUVU [%]



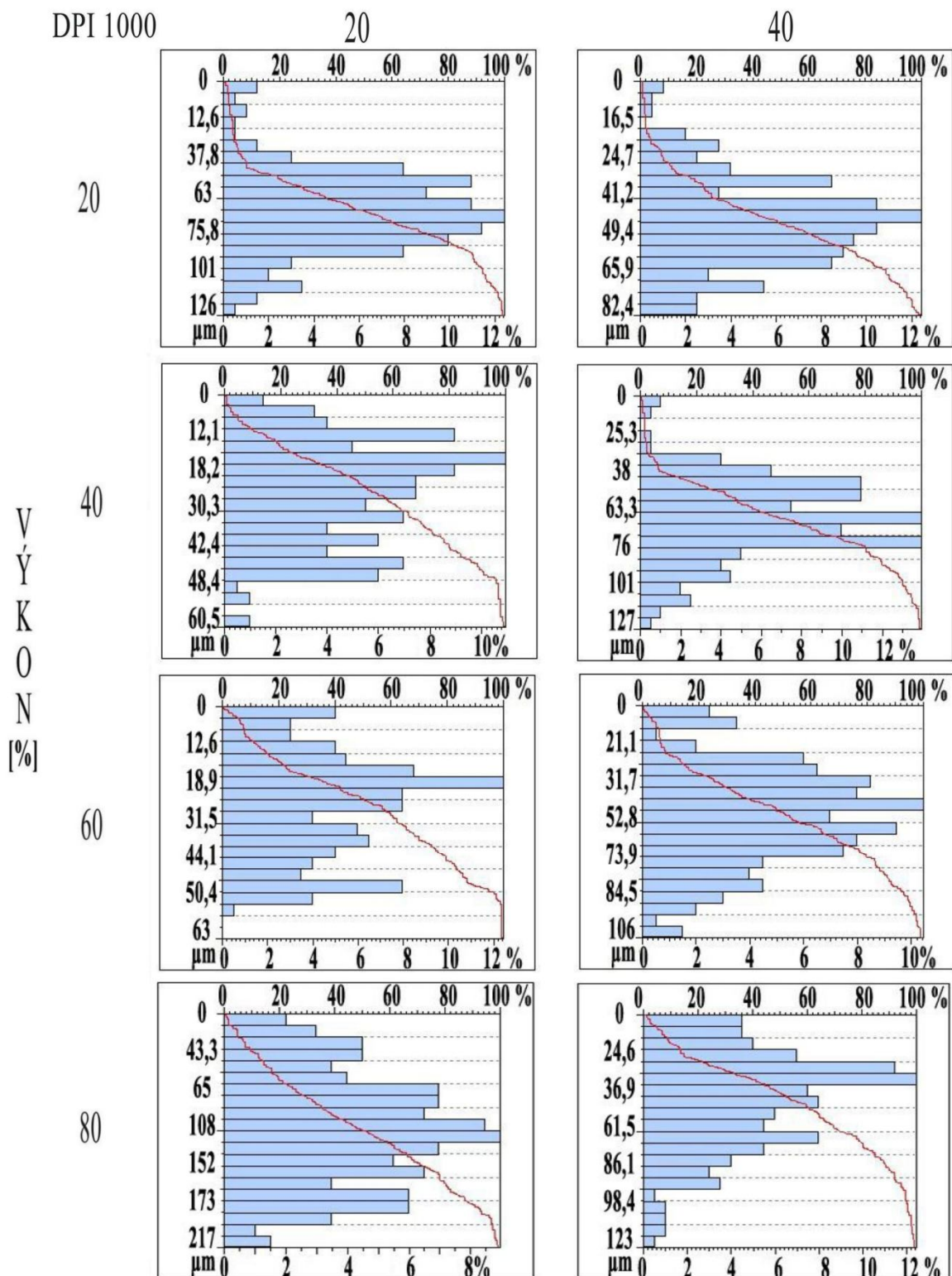
Obr. 71. Křivka materiálového podílu DPI 500, f20, f40.

RYCHLOST POSUVU [%]



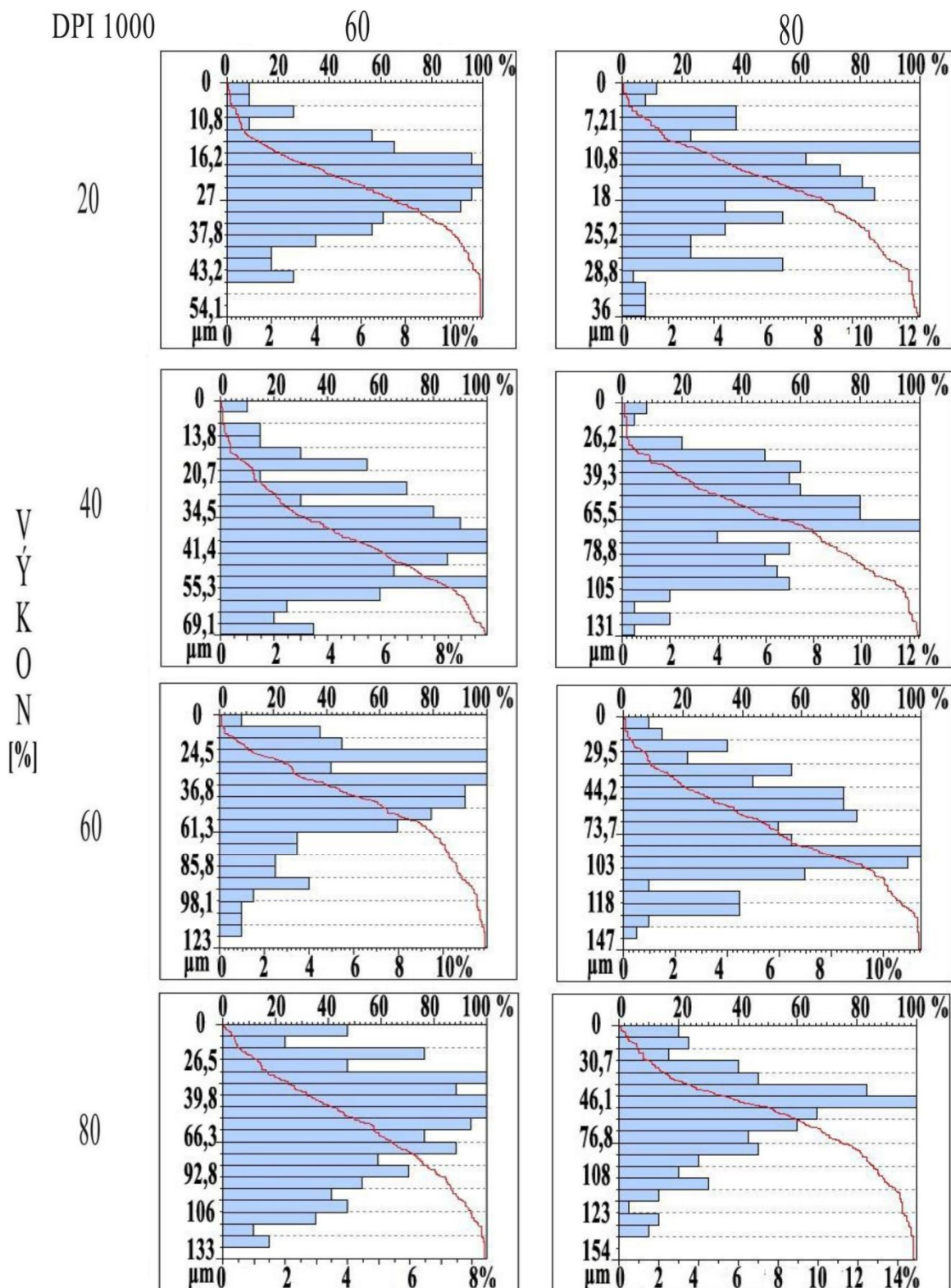
Obr. 72. Křivka materiálového podílu DPI 500, f60, f80.

RYCHLOST POSUVU [%]



Obr. 73. Křivka materiálového podílu DPI 1000, f20, f40.

RYCHLOST POSUVU [%]



Obr. 74. Křivka materiálového podílu DPI 1000, f60, f80.

6.4 Mann - Whitneyův test

Z důvodu nízké četnosti dat byl zvolen neparametrický test Mann - Whitneyův, při kterém vycházíme z mediánu.

Nulová hypotéza:

$H_0: \eta_{p=DPI\ 200} = \eta_{p=DPI\ 500}$, kde η je medián

Alternativní hypotéza:

$H_A: 1-\alpha = 0,95$

Výsledek:

$p < 0,05 \rightarrow$ zamítám H_0

Tab. 21. Mann - Whitneyův test pro Ra.

VZOREK	MEDIÁN DPI 200	MEDIÁN DPI 500	H_0, p	VÝSLEDEK
P20/f20	30,10	11,50	0,0119	Zamítám H_0
P20/f40	26,20	10,50	0,0081	Zamítám H_0
P20/f60	17,60	6,01	0,0122	Zamítám H_0
P20/f80	9,26	5,96	0,0216	Zamítám H_0
P40/f20	20,60	11,30	0,0058	Zamítám H_0
P40/f40	28,20	10,60	0,0119	Zamítám H_0
P40/f60	28,20	13,80	0,0119	Zamítám H_0
P40/f80	25,50	13,90	0,0050	Zamítám H_0
P60/f20	23,40	12,30	0,0348	Zamítám H_0
P60/f40	28,50	12,30	0,0122	Zamítám H_0
P60/f60	27,00	12,30	0,0122	Zamítám H_0
P60/f80	31,50	14,90	0,0122	Zamítám H_0
P80/f20	19,00	18,50	0,0947	Nezamítám H_0
P80/f40	18,90	13,30	0,0601	Nezamítám H_0
P80/f60	30,00	19,00	0,0513	Nezamítám H_0
P80/f80	29,70	13,00	0,0057	Zamítám H_0

Tab. 22. Mann - Whitneyův test pro Rz.

VZOREK	MEDIÁN DPI 200	MEDIÁN DPI 500	H ₀ , p	VÝSLEDEK
P20/f20	64,20	127,00	0,0122	Zamítám H ₀
P20/f40	52,20	110,00	0,0081	Zamítám H ₀
P20/f60	29,60	61,40	0,0122	Zamítám H ₀
P20/f80	28,15	35,90	0,3153	Nezamítám H ₀
P40/f20	55,40	104,00	0,0058	Zamítám H ₀
P40/f40	56,10	125,00	0,0122	Zamítám H ₀
P40/f60	69,80	125,00	0,0122	Zamítám H ₀
P40/f80	63,70	91,65	0,0051	Zamítám H ₀
P60/f20	55,60	122,00	0,1439	Nezamítám H ₀
P60/f40	61,90	122,00	0,0122	Zamítám H ₀
P60/f60	58,00	125,00	0,0122	Zamítám H ₀
P60/f80	71,50	145,00	0,0122	Zamítám H ₀
P80/f20	84,60	101,00	0,0122	Zamítám H ₀
P80/f40	65,00	59,10	0,8345	Nezamítám H ₀
P80/f60	83,60	114,00	0,0348	Zamítám H ₀
P80/f80	61,90	117,00	0,0057	Zamítám H ₀

Pokud p-hodnota Mann - Whitneyho W testu vyšla menší než 0,05, pak se H₀ zamítá s pravděpodobností 95%. Zamítá se hypotéza, že mediány obou základních souborů jsou stejné, což se prokázalo u většiny vyhodnocovaných dat.

= $p < 0,05 \rightarrow$ statisticky významný rozdíl

Jestliže je p-hodnota větší než hladina významnosti α , tak nulovou hypotézu H₀ nemůžeme zamítnout a předpokládáme, že platí. Výsledek testu průměrné aritmetické úchyly profilu Ra vzorku P80/f20, P80/f40 a P80/f60 a maximální výšky profilu Rz vzorku P20/f80, P60/f20 a P80/f40 nebyl zamítnut.

= $p > 0,05$ statisticky nevýznamný rozdíl

ZÁVĚR

Tato diplomová práce zkoumá vliv změny nastavení rozlišení laserového paprsku na výslednou jakost obrobeného povrchu. Zkoumané parametry byly rozlišitelnost DPI 200, 500 a 1000, výkon a rychlost posuvu, vždy 20%, 40%, 60% a 80% z maximálních hodnot 100 W a 1524 mm/s. K experimentálnímu obrábění se vybraly materiály PP a PMMA. Z časových důvodů a kapacitní vytíženosti drsnoměru Taylor Hobson Talysurf CLI 500 se pro zkoumání jakosti obrobené plochy zvolil materiál polymethylmethakrylát.

První část teorie je věnována popisu laseru a jeho použití k dané problematice. V druhé části je nastíněna všeobecná problematika jakosti povrchu a módová struktura.

V praktické části je zkoumána drsnost povrchu u materiálu PMMA opticky na mikroskopu Carl Zeiss Jena a Leica DMI3000 M a to při patnáctinásobném a padesátinásobném zvětšení. Pro tento typ vzorku nebyl vhodný mikroskop Leica DMI3000 M, jelikož u větších hloubek byly snímky rozmazané. Porovnáním lze určit, že vzorky obrobené rozlišitelností DPI 200 jsou výraznější a větší než u DPI 500, tedy drsnost plochy je větší u vzorku obrobených s rozlišitelností DPI 200. U rozlišitelnosti DPI 1000 lze vidět hodně prasklin a tečení materiálu vlivem vysoké teploty. Ke zkoumání drsnosti byl zvolen bezkontaktní 3D drsnoměr firmy Taylor Hobson pro měření struktury povrchu všech materiálů a povrchu. Pro porovnání se naměřila 3D data u vybraných vzorků, 2D data jsou vyhodnocena pro všechny zkoumané hodnoty. Některé data obsahovaly tolik chyb, že byly pro vyhodnocování nepoužitelné. Chyby ojediněle ve formě píku byly jednoduše opravitelné a hodnoty se výrazně nezkreslily. Pokud se v datech vyskytovalo hodně chyb, po úpravě byly data nepřesné a zavádějící. Pokud bylo možno, tak taková data nejsou použita.

Při nastavení rozlišitelnosti DPI 200 se drsnost povrchu ukázala jako nejhorší, při DPI 500 se jakost povrchu výrazně zlepšila a to až na poloviční hodnoty. Rozlišení DPI 1000 není vhodné pro materiál PMMA, proto není zahrnuto v porovnání a klesající tendenci hodnot drsnosti nepotvrdil, průměrné hodnoty Ra i Rz se zvýšily. Důvodem je, že při takovém vysokém rozlišení DPI působí laserový paprsek dlouhou dobu na obráběnou plochu, tím se materiál zahřeje a začne se roztékat. Nejvyšších hodnot drsnosti bylo zjištěno hlavně u vyšších výkonů 60 W a 80 W. U nízkého výkonu 20 W se se zvyšující se hodnotou posuvu zlepšuje kvalita obrobené plochy. Rozlišení DPI má značný vliv na kvalitu povrchu. Vyhodnocení 3D struktury odpovídá stavu povrchu obrobené plochy. U rozlišitelnosti DPI 1000 jde vidět, že se materiál začal roztékat.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Lasery včera a dnes. *Virtuální katedra fyzikálních věd a inženýrské* [online]. 2000 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/node92.html>
- [2] Laserové a plazmové řezání. 2010 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>
- [3] Wikipedie [online]. 2013 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: cs.wikipedia.org
- [4] HÁBOVČÍK, Peter. *Lasery a fotodetektory*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1989, 318 s. ISBN 80-050-0526-1.
- [5] ENGST, Pavel. *Aplikace laserů*. 1. vyd. Brno: SNTL, 1989.
- [6] STRUMBAN, E. J. *Lasery a optoelektronika*. 1. vyd. Praha: Panorama, 1989.
- [7] LETOCHOV, V. S. *Výkonné lasery a ich využitie*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1982.
- [8] Lasery [online]. 2009 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: lasery.kvalitne.cz
Emmelmann, C.: Introduction to industrial laser material processing, ROFIN Hamburg, 2008
- [9] Laserové svařování a řezání. 1999 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: http://www.messergroup.com/cz/Prospekty/Svarovani_a_deleni_materialu/Laserove_svarovani_a_rezani1.pdf
- [10] JANATA, M. *Průmyslové lasery a jejich aplikace* [online]. AIR PRODUCTS s.r.o., [cit. 2008-11-15]. Dostupný z WWW:
< http://www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/pdf/Lasery_clanek-MJ.pdf >
- [11] KUNCIPÁL, J., a kol. *Teorie svařování*. Praha: SNTL, 1986, 265 s.
- [12] ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. Nekonvenční metody obrábění – 5. díl. In *MM Průmyslové spektrum*, 2008, č.5, s. 68-72. ISSN 1212-2572
- [13] Laserové řezání. *LAO - lasery a optika* [online]. 2013 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/>
- [14] Průmyslové lasery - Laserové řezání. *Průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html>
- [15] Řezání kovů laserem a plazmou. 2010 [cit. 2013-12-04]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>

- [16] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989, 338 s.
- [17] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie* : 1.vyd. Viena Košice, 2000. 275 p.
- [18] ČSN-EN-ISO-4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [19] Budoucnost gravírovacích zařízení. *Svět tisku* [online]. 2009 [cit. 2014-01-29]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=5067
- [20] SUKUP, M. *Vliv změny technologických parametrů na kvalitu laserem obrobené plochy a ekonomičnost procesu obrábění PMMA*. Zlín, 2006. Diplomová práce. UTB.
- [21] PATA, Vladimír. *Počítačová podpora dat.: studijní materiály*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2012
- [22] Vlastnosti Polymethylmethakrylát (PMMA). *Lpm.cz* [online]. 2008 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.lpm.cz/cgi-bin/riweta.cgi?nr=2610&lng=1>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

2D	Plošné zobrazení
3D	Prostorové zobrazení
α_B	Brewsterův úhel [°]
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
DPI	Krok posuvu laserového paprsku
f	Rychlost posuvu [mm/s]
GaAS	Arsenid gallitý
IR	Infračervené záření
Nd:YAG	Neodymem (Nd ⁺³) dopovaný yttrito-hlinitým granátem
PVC	Polyvinylchlorid
PCB	Polychlor bifenyl
PMMA	Polymethylmethakrylát
P	Výkon [W]
PP	Polypropylen
Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu
Rmr	Materiálový poměr povrchu [μm]
Rz	Maximální výška profilu [μm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. První funkční laser. [1]	12
Obr. 2. Schéma zařízení obrábění laserem. [2].....	13
Obr. 3. Procentuální zastoupení laserů.....	14
Obr. 4. Konfigurace pevnolátkového laseru: L - laserový válcový krystal, P, T - polopropustné odrazné zrcadlo, α_B - Brewsterův úhel. [5].....	17
Obr. 5. Energetické hladiny v barvivu: S - singletní stavy, T - tripletní stavy, B - buzení, FL - fluorescence, FO - fosforescence. [5].....	17
Obr. 6. Schéma energetických hladin CO ₂ . [5].....	21
Obr. 7. Průběh intenzity emisních čar CO ₂ laseru. [5]	22
Obr. 8. TruFLOW rezonátor. [9].....	23
Obr. 9. Schéma SLAB laseru. [9]	24
Obr. 10. Laserové vyřezání překližky na CO ₂ laseru.....	25
Obr. 11. Schéma úběru materiálu při laserovém řezání. [13].....	27
Obr. 12. Produkty vyráběné laserovým vrtáním. [14].....	31
Obr. 13. Laserové gravírování na CO ₂ laseru.....	32
Obr. 14. Kriteria pro hodnocení povrchu řezání laserem. [17].....	33
Obr. 15. Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti. [18]	34
Obr. 16. Profil povrchu. [18]	35
Obr. 17. Profil struktury povrchu.....	36
Obr. 18. Prvek profilu. [18]	36
Obr. 19. Parametry profilu povrchu. [18].....	37
Obr. 20. Průměrná aritmetická úchylnka.....	38
Obr. 21. Rozdělení intenzity záření v průřezu výstupního paprsku laseru TEM ₀₀ a TEM ₁₀ . [14]	39
Obr. 22. Módy TEM. [19]	40
Obr. 23. Prizma na potlačení příčných módů. [4].....	41
Obr. 24. Změna drsnosti při obrábění s rozlišením DPI 500 a DPI 1000. [20].....	42
Obr. 25. Operativní charakteristika.....	44
Obr. 26. Laser ILS 3NM.....	48
Obr. 27. Návrh obrobené plochy pro jednotlivé parametry.....	50
Obr. 28. Nastavení parametrů dle přiřazení barev.....	50
Obr. 29. Nastavení DPI a vektor & rastr.....	51

Obr. 30. Příprava výkresu část A.	51
Obr. 31. Příprava výkresu část B.	52
Obr. 32. Obrobený materiál PMMA pro DPI 200 a DPI 500.	52
Obr. 33. Obrobený materiál PMMA pro DPI 1000.	53
Obr. 34. Obrobený materiál PP pro DPI 200 a DPI 500.	53
Obr. 35. Obrobený materiál PP pro DPI 1000.	53
Obr. 36. Mikroskop Carl Zeiss Jena.	54
Obr. 37. Před (nalevo) a po (napravo) očištění vzorku.	55
Obr. 38. Před (nalevo) a po (napravo) očištění vzorku při zvětšení 15x.	55
Obr. 39. Rozlišení DPI 200 při zvětšení 15x.	56
Obr. 40. Rozlišení DPI 200 při zvětšení 50x.	56
Obr. 41. Rozlišení DPI 500 při zvětšení 15x.	57
Obr. 42. Rozlišení DPI 500 při zvětšení 50x.	57
Obr. 43. Rozlišení DPI 1000 při zvětšení 15x.	58
Obr. 44. Rozlišení DPI 1000 při zvětšení 50x.	58
Obr. 45. Detail hloubky obrobené plochy.	59
Obr. 46. Mikroskop Leica DMI3000 M.	59
Obr. 47. Rozlišení DPI 200 při zvětšení 50x na mikroskopu Leica DMI3000 M.	60
Obr. 48. Rozlišení DPI 500 při zvětšení 50x na mikroskopu Leica DMI3000 M.	61
Obr. 49. Rozlišení DPI 1000 při zvětšení 50x na mikroskopu Leica DMI3000 M.	61
Obr. 50. Drsnoměr Taylor Hobson Talysurf CLI 500.	63
Obr. 51. Příprava před měřením drsnosti.	63
Obr. 52. Drsnost s makroskopickými chybami A.	64
Obr. 53. Drsnost s makroskopickými chybami B.	64
Obr. 54. Odfiltrování makroskopických chyb.	65
Obr. 55. Odfiltrování tvaru.	65
Obr. 56. Drsnost dle normy ISO 4287.	66
Obr. 57. Boxplot pro DPI 200 - Ra.	70
Obr. 58. Boxplot pro DPI 200 - Rz.	70
Obr. 59. Boxplot pro DPI 500 - Ra.	73
Obr. 60. Boxplot pro DPI 500 - Rz.	73
Obr. 61. Boxplot pro DPI 1000 - Ra.	76
Obr. 62. Boxplot pro DPI 1000 - Rz.	77

Obr. 63. Porovnání drsnosti Ra pro DPI 200 a DPI 500.	78
Obr. 64. Porovnání drsnosti Rz pro DPI 200 a DPI 500.	79
Obr. 65. Vliv dlouhého působení laserového paprsku na obráběnou plochu.	80
Obr. 66. 3D scan pro vzorek DPI 200, P = 40 W, f = 1219,2 mm/s.	80
Obr. 67. 3D scan pro vzorek DPI 500, P = 40 W, f = 1219,2 mm/s.	81
Obr. 68. 3D scan pro vzorek DPI 1000, P = 40 W, f = 1219,2 mm/s.	81
Obr. 69. Křivka materiálového podílu DPI 200, f20, f40.....	83
Obr. 70. Křivka materiálového podílu DPI 200, f60, f80.....	84
Obr. 71. Křivka materiálového podílu DPI 500, f20, f40.....	85
Obr. 72. Křivka materiálového podílu DPI 500, f60, f80.....	86
Obr. 73. Křivka materiálového podílu DPI 1000, f20, f40.....	87
Obr. 74. Křivka materiálového podílu DPI 1000, f60, f80.....	88

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Charakteristika jednotlivých laserů. [3].....	15
Tab. 2. Hodnoty Ra dle opracování.....	38
Tab. 3. Možné existující situace, kdy mohou nastat chyby. [21].....	44
Tab. 4. Technické parametry ILS-3NM-100W.....	49
Tab. 5. Parametry nastavení obrábění.	49
Tab. 6. Technické parametry mikroskopu Leica DMI3000 M.	60
Tab. 7. Technické parametry drsnoměru Taylor Hobson Talysurf CLI 500.....	62
Tab. 8. Vlastnosti PMMA. [22]	67
Tab. 9. Drsnost pro DPI 200, P20, P40, P60.	68
Tab. 10. Drsnost pro DPI 200, P80.	69
Tab. 11. DPI 200, závislost drsnosti Ra na výkonu a posuvu.....	69
Tab. 12. DPI 200, závislost drsnosti Rz na výkonu a posuvu.....	69
Tab. 13. Drsnost pro DPI 500, P20, P40, P60.	71
Tab. 14. Drsnost pro DPI 500, P80.	72
Tab. 15. DPI 500, závislost drsnosti Ra na výkonu a posuvu.....	72
Tab. 16. DPI 500, závislost drsnosti Rz na výkonu a posuvu.....	72
Tab. 17. Drsnost pro DPI 1000, P20, P40.	74
Tab. 18. Drsnost pro DPI 1000, P60, P80.	75
Tab. 19. DPI 1000, závislost drsnosti Ra na výkonu a posuvu.....	75
Tab. 20. DPI 1000, závislost drsnosti Rz na výkonu a posuvu.....	76
Tab. 21. Mann - Whitneyův test pro Ra.	89
Tab. 22. Mann - Whitneyův test pro Rz.	90